



بررسی موردی پارامترهای حفاظ نوترونی برای یک بلوک گرافیت صنعتی

اسمعیل بیات^{۱*}، پرویز قربانی^۲، نازیلا دیوانی ویس^۳

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون سازمان انرژی اتمی، تهران - ایران

۲. دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران - ایران

۳. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند - ایران

چکیده:

گرافیت در صنایع گوناگون از جمله در صنعت هسته‌ای کاربرد فراوان دارد. گرافیت گرید هسته‌ای خلوص بالایی داشته و به دلیل تحریم‌ها در دسترس نمی‌باشد. در این پژوهش، پارامترهای نوترونی یک بلوک گرافیت صنعتی به ضخامت بیست و پنج سانتیمتر از لحاظ عبور و بازتاب نوترون سریع و کندکنندگی آن بطور تجربی بررسی گردید. نتایج نشان داد که گرافیت در مقایسه با پلی اتیلن، کندکنندگی ضعیفی داشته اما بازتاب نوترون بیش از دو برابر دارد. لذا، این امکان وجود دارد که در چیدمان‌های مختلف از این خواص گرافیت (صنعتی) استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: نوترون، گرافیت، کندکنندگی، بازتاب.

Case study of neutron shielding parameters for an industrial graphite block

E. Bayat^{1*}, P. Ghorbani², N. Divani Veis³

1. Nuclear Science and Technology Research Center, AEOI, Tehran, Iran

2. Department of Nuclear Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, P.O.Box 14515-775, Tehran, Iran

3. Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Birjand, P.O.Box 97175-615, Birjand, Iran

Abstract:

Graphite is widely used in various industries, including the nuclear industry. Nuclear grade graphite has high purity and is not available due to sanctions. In this study, the neutron parameters of an industrial graphite block with a thickness of 25cm in terms of fast neutron transmission and reflection and its thermalization were investigated experimentally. The results showed that graphite had a weak slowing down compared to polyethylene but more than doubled neutron reflection ability. Therefore, it is possible to use these properties of graphite (industrial) in different experimental setting.

Keywords: neutron, graphite, thermalization, reflection.

۱. مقدمه

گرافیت یکی از آلوتروپ‌های (دگرشکلی‌های) کربن است که ساختار لایه-لایه داشته و از پیوند کوالانسی شش اتم کربن به صورت شش ضلعی منتظم پدید آمده و از طریق پیوند ضعیفی واندروالس به لایه‌های زیرین متصل است. گرافیت به عنوان الکترودهای کوره، روان‌کننده، ماده نسوز، قطعات الکتریکی، رنگ‌ها، فولادهای پرکربن، چدن‌ها، مداد گرافیتی و ... استفاده می‌شود. گرافیت پایدارترین شکل کربن در شرایط استاندارد است. از جمله مهم‌ترین خواص گرافیت می‌توان به بالاترین مقاومت طبیعی و سختی، ضدزنگ و مقاوم در برابر حرارت، روانکاری طبیعی بالا، مقاومت حرارتی بالا تا ۲۵۰۰ درجه سانتیگراد، رسانای الکتریکی و حرارتی، ثبات شیمیایی، اصطکاک کم و مقاومت فشاری بالا اشاره نمود. اولین کاربرد ویژه گرافیت در فیزیک هسته‌ای، با راه‌اندازی نخستین واکنش زنجیره‌ای خود پایدار با ساخت راکتور گرافیتی توسط فرمی شکل گرفت. امروزه نیز همچنان از گرافیت با خلوص بالا، به دلیل خاصیت جذب کم نوترون، هدایت حرارتی بالا و مقاومت زیاد در دمای بالا، به منزله بازتابنده و کندکننده نوترون‌ها در راکتورهای هسته‌ای استفاده می‌شود [۱ و ۲].

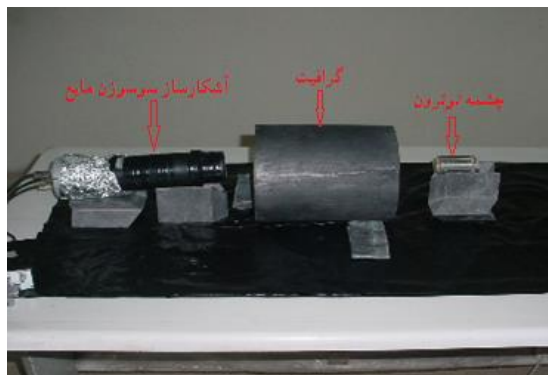
در کشور در زمینه کاربردهای مبتنی بر چشمه‌های رادیوایزوتوپی نوترون، مانند PGNA، از ترکیبات مختلف مواد حفاظ نوترون تند و کند و جاذب‌ها مانند آهن، تنگستن، آب، پلی‌اتیلن، پارافین، بور و لیتیم استفاده شده است [۳-۵]. اما به دلیل تحریم‌ها و در دسترس نبودن گرافیت گرید هسته‌ای، باعث گردیده در زمینه استفاده از گرافیت در چیدمان‌های نوترون، تحقیقات محدودی انجام گیرد [۶ و ۷]. بررسی امکان استفاده از گرافیت صنعتی و شناخت آن با توجه به وجود کارخانه‌های متعدد گرافیت در کشور، می‌تواند زمینه استفاده بیشتر از این ماده را حداقل در صنایع و کاربردهای با حساسیت و قابلیت اطمینان پایین را پدید آورد و سپس با رشد کاربردهای آن و ایجاد صرفه اقتصادی، صنایع مجاب به تولید گرید هسته‌ای خواهد شد.

۲. روش کار: چیدمان آزمایش و معرفی اجزا

نمونه گرافیت صنعتی موجود از نوع گرافیت‌هایی است که جهت ساخت بوتله ذوب کاربرد دارد. این قطعه گرافیت استوانه‌ای شکل به ابعاد $\text{Ø}17.5 \times 25\text{cm}$ و چگالی 1.8gr/cm^3 با درجه خلوص بالای کربنی می‌باشد. در ابتدا از این استوانه بصورت یکپارچه استفاده گردید. اما در نهایت بصورت بلوک‌های با ضخامت پنج سانتیمتری برشکاری شد. اندازه‌گیری‌ها توسط چشمه نوترون $^{241}\text{Am-Be}$ با اکتیویته 100mCi انجام گرفت و چیدمان‌های آزمایش بر روی یک میز با ارتفاع 90cm و در فاصله دو متری از دیوارهای اطراف قرار گرفت.

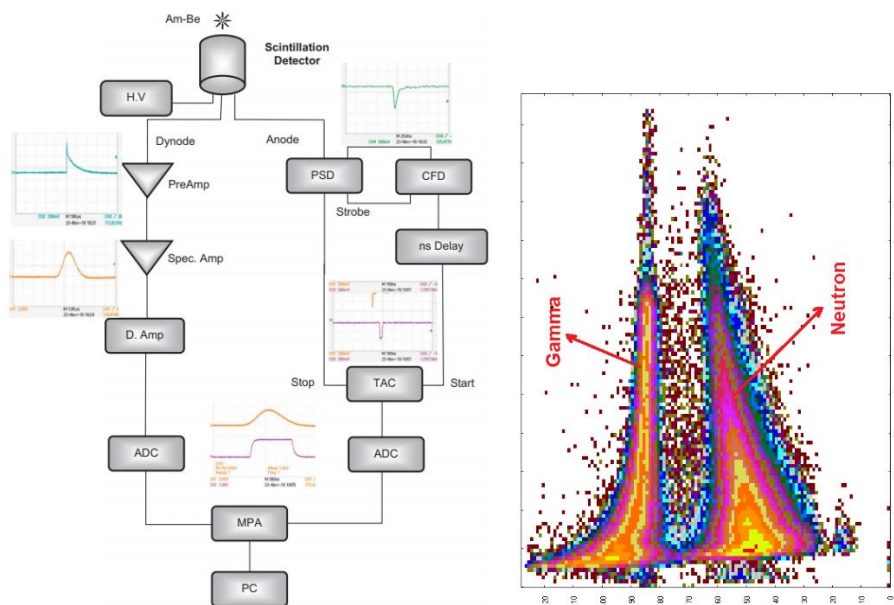
۱-۲- اندازه‌گیری عبور نوترون سریع از نمونه گرافیت

جهت اندازه‌گیری عبور نوترون سریع چیدمانی مطابق شکل ۱ آماده گردید. آشکارساز سوسوزن مایع با استفاده از لامپ PMT مدل Photonis-XP2020، سلول آلومینیومی حاوی مایع سوسوزن IAP-LS-701 (معادل NE-213) و مقسم ولتاژ IAP-2025Za مونتاژ شد و در فاصله 40cm از چشمه قرار گرفت. مدار الکترونیک جداسازی نوترون-گاما بر اساس روش گذر از صفر و با بلوک دیاگرام مطابق با شکل ۲ پیاده‌سازی گردید [۸ و ۹]. با استفاده از یک چشمه ^{22}Na و کالیبراسیون محور انرژی، میزان بایاس در جداسازی حدود 1MeV پروتون تعیین شد. به منظور داشتن آمار مناسب با خطای کم، شمارش ناحیه نوترون در حالت بدون گرافیت و با وجود گرافیت به ترتیب طی پنج ساعت و ده ساعت انجام گرفت. واپیچش طیف نوترون با استفاده از کد Forist صورت پذیرفت.

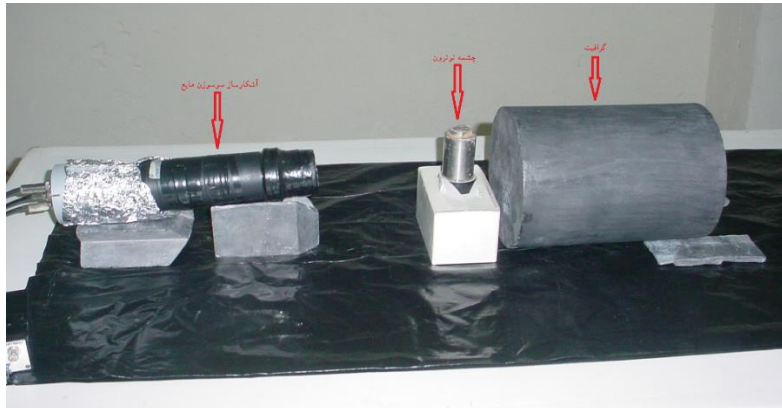


شکل ۱. چیدمان اندازه‌گیری عبور نوترون سریع از نمونه گرافیت

۲-۲- اندازه‌گیری بازتاب نوترون سریع توسط نمونه گرافیت
با حفظ مدار الکترونیک و تنظیمات آن، به منظور اندازه‌گیری میزان بازتاب نوترون سریع از نمونه گرافیت، چیدمان مطابق شکل ۳ تغییر داده شد. یعنی فاصله چشمه و نمونه به 20cm کاهش داده شده و نمونه گرافیت به پشت چشمه منتقل گردید. اندازه‌گیری با و بدون نمونه گرافیت و نیز جهت مقایسه، با یک قطعه پلی‌اتیلن به ابعاد $20 \times 10 \text{ cm}$ انجام گرفت.



شکل ۲. بلوک دیاگرام مدار الکترونیک جهت جداسازی نوترون-گاما



شکل ۳. چیدمان اندازه‌گیری بازتاب نوترون سریع از نمونه گرافیت

۲-۳- اندازه‌گیری نوترون گرمایی عبوری از نمونه گرافیت
جهت آشکارسازی نوترون کند از کریستال سوسوزن ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ ساخت شرکت scionix استفاده شد که بر روی لامپ PMT مدل XP2020 کوپل گردید. جهت حذف اثر میدان مغناطیسی زمین بر بازدهی PMT، حفاظ مغناطیسی (μMetal) مدل MS172 بکار رفت. در این آشکارساز، نوترون‌های حرارتی با ${}^6\text{Li}$ اندرکنش نموده و ذرات تولیدی ${}^4\text{He}$ و ${}^3\text{H}$ در درون آشکارساز منجر به سوسوزنی می‌شوند. چشمه نوترون ${}^{241}\text{Am-Be}$ در فاصله 40cm نسبت به آشکارساز قرار گرفت. مدار الکترونیک رایج طیف‌نگاری شامل آشکارساز، پیش تقویت‌کننده، تقویت‌کننده و تحلیلگر چندکاناله آماده گردید. ابتدا با استفاده از چشمه‌های ${}^{137}\text{Cs}$ ، ${}^{22}\text{Na}$ و ${}^{60}\text{Co}$ کالیبراسیون محور انرژی انجام شد و سپس، با استفاده از 4cm پلی‌اتیلن، ناحیه انرژی اندرکنش نوترون روی طیف تعیین شد (شکل ۴). با شمارش سطح زیر طیف، میزان نوترون گرمایی ناشی از کندکنندگی بلوک گرافیت مشخص گردید.



شکل ۴. چیدمان اندازه‌گیری نوترون گرمایی ناشی از نمونه گرافیت

۲-۴- ضخامت بهینه گرافیت برای کندکنندگی نوترون
به منظور تعیین ضخامت بهینه گرافیت جهت کندکنندگی نوترون، بلوک‌های گرافیتی به ضخامت‌های 5cm توسط برشکاری تهیه شد. آشکارساز BF₃ مدل LND-2029 و مدار الکترونیک طیف‌نگاری رایج استفاده گردید. چشمه و آشکارساز در فاصله 30cm از یکدیگر قرار گرفته و ضخامت گرافیت بین چشمه و آشکارساز با اضافه کردن بلوک‌ها افزایش داده شد و در هر مرحله طیف آشکارساز طی چهار دقیقه و با سه بار تکرار ثبت گردید. سطح زیر طیف در ناحیه نوترون، به معنای میزان شمارش نوترون گرمایی می‌باشد.

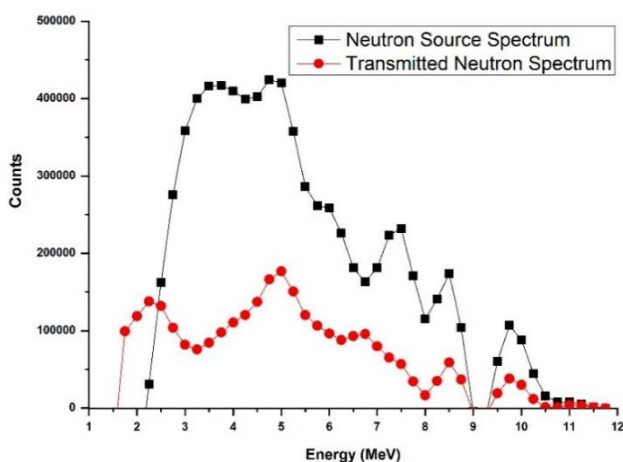
۳. نتایج

۳-۱- عبور نوترون سریع از بلوک استوانه‌ای شکل گرافیت:

در جدول ۱ میزان عبور نوترون سریع از نمونه گرافیت آورده شده است. بنابراین شار نوترون سریع در عبور از نمونه گرافیت به میزان ۸۰ درصد تضعیف شده است. طیف نوترون واپیچش شده در شکل ۵ آورده شده است. مشاهده می‌شود با توجه به طیف عبوری، شار نوترون کاهش پیدا کرده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش بررسی عبور نوترون سریع از گرافیت

شرایط تست	میزان شمارش
بدون حضور گرافیت	845908±919
با حضور گرافیت	166135±407



شکل ۵. طیف نوترون چشمه و نوترون عبوری از نمونه گرافیت

۳-۲- بازتاب نوترون سریع از بلوک استوانه‌ای شکل گرافیت:

میزان تغییرات شمارش نوترون سریع در حالت وجود بازتابنده گرافیت و پلی اتیلن در جدول ۲ آورده شده است. اثر وجود این مواد بازتابنده در میزان شمارش گاما نیز در همین جدول قابل مشاهده است.

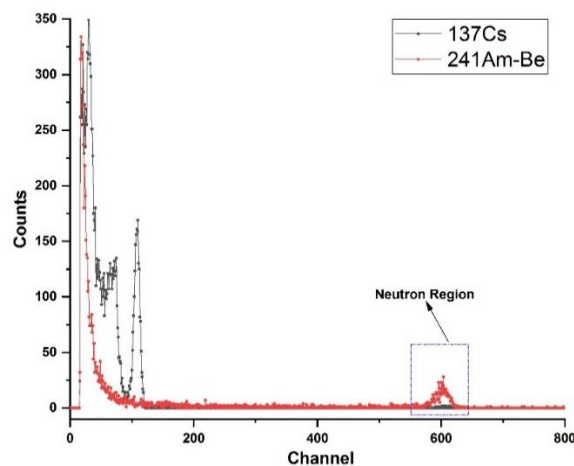
جدول ۲. نتایج آزمایش بررسی بازتاب نوترون سریع

شرایط تست	شمارش نوترون	افزایش شمارش نوترون ناشی از بازتاب	شمارش گاما	افزایش شمارش گاما
بدون حضور گرافیت	88789±296	0%	91801±302	0%
با حضور گرافیت	94633±307	6.5%	92319±303	0.5%

با حضور پلی‌اتیلن	91265±302	2.8%	93816±306	2.2%
-------------------	-----------	------	-----------	------

۳-۳- میزان نوترون گرمایی ناشی از نمونه گرافیت

در شکل ۶ طیف آشکارساز LiI(Eu) برای آشکارسازی نوترون‌های گرمایی عبوری از نمونه گرافیت آورده شده است. ناحیه نوترون با توجه به کالیبراسیون توسط چشمه‌های گاما در انرژی 3.7MeV قرار دارد. جدایش خوب طیف ارتفاع پالس نوترون از گاما، شمارش خالص نوترون را آسان می‌سازد. در جدول ۳ نتایج این اندازه‌گیری آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان نوترون گرمایی در آنسوی گرافیت با ضخامت 25cm، بسیار کمتر از نمونه پلی‌اتیلن است. این امر می‌تواند به دلیل خاصیت کندکنندگی ضعیف گرافیت و یا جذب نوترون گرمایی به دلیل وجود ناخالصی‌ها در گرافیت باشد.



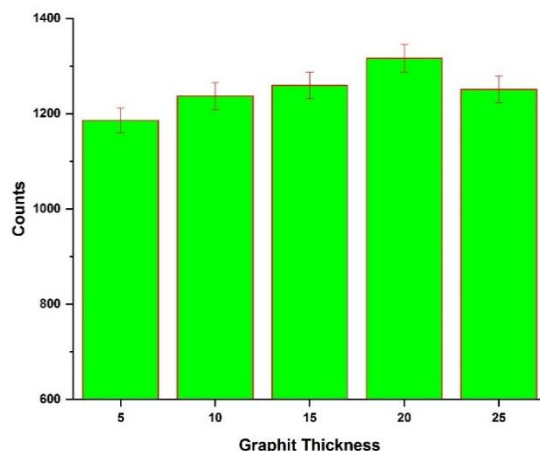
شکل ۶. طیف آشکارساز LiI(Eu) حاصل از چشمه گاما ^{137}Cs و نوترون عبوری از گرافیت

جدول ۳. میزان نوترون گرمایی پس از نمونه گرافیت و پلی‌اتیلن

شرایط تست	میزان شمارش
با حضور گرافیت (25cm)	475±21
با حضور پلی‌اتیلن (4cm)	1629±40

۴-۴- ضخامت بهینه کندکننده گرافیت

در شکل ۷ نمودار تغییرات شمارش نوترون گرمایی با افزایش ضخامت گرافیت آورده شده است. مشاهده می‌گردد که در ضخامت حدود 20cm میزان شار نوترون گرمایی، تقریباً بیشینه می‌باشد.



شکل ۷. تغییرات شمارش نوترون گرمایی با افزایش ضخامت گرافیت

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پارامترهای نوترونی یک نمونه گرافیت صنعتی مورد بررسی قرار گرفت. طبق جدول ۱ و شکل ۵ مشاهده می‌شود که نوترون سریع خروجی از بلوک گرافیتی (بازه انرژی بیشتر از 1MeV) حدود ۸۰ درصد کاهش یافته است. از جدول ۳ و شکل ۷ نیز چنین استنباط می‌شود که میزان کندکنندگی گرافیت (تا ناحیه حرارتی) کم بوده و با افزایش ضخامت گرافیت، شار نوترون حرارتی تغییر چندانی نداشته است. بنابراین، نوترون‌های سریع برخوردی به گرافیت به ناحیه انرژی بین گرمایی تا 1MeV شیفت نموده‌اند و لذا در این اندازه‌گیری‌ها مشاهده نشده‌اند. بنابراین نتایج شبیه‌سازی بصیری و همکاران [۱۰] که نشان‌دهنده افزایش صد برابری نوترون گرمایی پس از پنج سانتیمتر گرافیت است، جای تأمل دارد.

با توجه به اندازه‌گیری‌های جدول ۲، در مورد استفاده از نمونه گرافیت بعنوان بازتاباننده، نوترون سریع (با انرژی بیش از 1MeV) حدود 6.5% افزایش یافته است که بیش از دو برابر پلی‌اتیلن بوده و در عین حال شمارش گاما تنها 0.5% افزایش را نشان می‌دهد. در حالیکه پلی‌اتیلن شمارش گاما را 2.1% افزایش داده است. این نتایج نشان می‌دهد علیرغم اختلاف انرژی گامای ناشی از کربن (4439keV) با گامای هیدروژن (2223keV) و تفاوت بازدهی آشکارساز در این انرژی‌ها، پلی‌اتیلن بازتاب نوترون سریع خوبی نداشته و گاماهاى ثانویه زیادی تولید می‌کند. با توجه به اینکه مرجع قابل استنادی برای مقایسه نتایج حاصل از گرافیت صنعتی در بازه زمانی انجام این پژوهش یافت نشد، لذا آنالیز نمونه جهت شناخت ترکیب دقیق آن و شبیه‌سازی آزمایش‌ها در حال انجام است.

۵. مراجع

1. Thorsten Jonach, "Characterization of the neutron flux in beam tube B at the TRIGA reactor Vienna" thesis, 2019.
2. B. Salmasian, F. Salari, M. Rafiee, A. Shahriari, "Investigating the effect of using graphite as a neutron reflector in fuel consumption calculations related to HEU fuels Tehran Research Reactor" (in Persian), National Conference on Power Engineering and Nuclear Power Plants, 2016.
3. P. Ghorbani, D. Sardari, E. Bayat, V. Doostmohammadi, "Neutron beam preparation with Am-Be source for analysis of biological samples with PGNA method", J Radioanal Nucl Chem (2012) 291:839-842.



4. E. Bayat, A. Mohammadi, E. Asadi “Investigation about composition of Iron, polyethylene and bore for shielding of 241Am-Be neutron source (in Persian)”, 15th Iranian Nuclear Conference, Golestan University, 4-5 March 2009.
5. E. Bayat, M. Sabzian, V. Doostmohammadi, “Investigation about composition of Iron and polyethylene for detector shielding in PGNA setting (in Persian)”, 15th Iranian Nuclear Conference, Golestan University, 4-5 March 2009.
6. B. Moradpour¹, M. Hamdipour, “Investigation of the moderation effect of water, polyethylene and graphite on Am- Be neutrons by measuring activity of the irradiated samples (in Persian)”, Journal of Radiation and Nuclear Technology / Vol. 1 / No. 3 / winter 2015.
7. R. Izadi-Najafabadi R. Koochi-Fayegh H. Afarideh, “Measurement and calculation of high energy neutron flux in aluminum, graphite, water and paraffin assembly (in Persian)”, Iranian journal of physics research, Volume 4, Issue 1, Autumn 2003.
8. N. Divani-Vais, E. Bayat, M. M. Firoozabadi and N. Ghal-Eh, “Neutron–Gamma Discrimination with UGAB Scintillator Using Zero-Crossing Method”, Radiation Protection Dosimetry (2012), pp. 1–4.
9. E. Bayat, N. Divani-Vais, M. M. Firoozabadi, N. Ghal-Eh, “A comparative study on neutron-gamma discrimination with NE213 and UGLLT scintillators using zero-crossing method”, Radiation Physics and Chemistry 81(2012)217–220.
10. H Basiri, H Tavakoli-Anbaran, “Investigation of some possible changes in Am-Be neutron source configuration in order to increase the thermal neutron flux using Monte Carlo code”, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 956 (2018) 012010.