

بهینه سازی طیف پرتو نوترونها برای سیستم رادیوگرافی نوترونی*

کیومرث کمالی مقدم، فرهود ضیائی
گروه فیزیک نوترون، مرکز تحقیقات هسته ای
سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

اخیراً به دلیل تغییری که در سوخت رآکتور تحقیقاتی تهران از اورانیوم با غنای بالا (HEU) به اورانیوم با غنای پایین (LEU)، و همچنین به دلیل تغییرات دیگری که در قلب رآکتور صورت گرفت، کارایی سیستم رادیوگرافی نوترونی موجود جوابگوی نیازهای گروه، جهت گرفتن تصاویری با وضوح کافی و حد زمانی کوتاه برای استفاده در مطالعات توموگرافی نبود. بنابراین، تصمیم گرفتیم که با بهینه‌سازی سیستم فوق، شار نوترونها را افزایش دهیم و مشخصات قبلی آن را بهبود بخشیم. طیف انرژی نوترونها با استفاده از روش فعال‌سازی پولک و به کمک کد کامپیوتری SAND-II اندازه‌گیری و به طریق محاسباتی با استفاده از کد کامپیوتری ANISN/PC تعیین شد. محاسبات و اندازه‌گیری طیف نوترونها سازگاری قابل قبولی را در حد خطاهای تجربی نشان می‌دهند. با قرار دادن ضخامت‌های مختلفی از کندکننده و جاذب گاما، در پشت موازی ساز نوترونی، و با استفاده مجدد از کد کامپیوتری ANISN/PC مناسبترین توزیع شار نوترونها گرمایی در ورودی موازی ساز محاسبه شد.

با افزایش قطر دهانه ورودی موازی ساز نوترونی از مقدار $1/8$ سانتیمتر به ۵ سانتیمتر شار نوترونها گرمایی در محل نمونه‌گذاری، علی‌رغم افزایش جزئی در سایه و نیمسایه تصویر، حدود ۸ برابر افزایش می‌یابد. مشخصات جدید شار نوترونها گرمایی در محل نمونه‌گذاری به صورت زیر پیش بینی می‌شود: میانگین شار نوترونها گرمایی در حدود $10^6 \text{ n cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ و نسبت نوترون به گاما در حدود $10^6 \text{ n cm}^{-2} \text{ mR}^{-1}$.

مقدمه

طی چند سال گذشته یک سیستم رادیوگرافی با نوترونها گرمایی، در داخل رآکتور ۵ مگاواتی مرکز تحقیقات هسته‌ای، طراحی و راه‌اندازی شده است. برای این منظور از کانال نوترونی سرتاسری ۶ اینچی، به دلیل پایین بودن شدت گاماهاى زمینه آن، استفاده شده است. موازی ساز نوترونی این سیستم شامل دو بخش آهنی و سربی است که تماماً با کادمیوم، به طریقه الکترولیز پوشش داده شده است. قسمت آهنی

موازی ساز از جنس آهن (St-۶۰) به طول ۱۱۰ سانتیمتر و قطر ۱۵ سانتیمتر است و سوراخی به شکل نیم مخروط به قطر ورودی $1/8$ سانتیمتر و قطر خروجی ۱۰ سانتیمتر در درون آن ایجاد شده است. قطعات استوانه ای شکل، از جنس بیسموت و گرافیت، در پشت موازی ساز برای پایین آوردن شدت پرتوهای گاما و گرمایی کردن نوترونهاى سریع قلب رآکتور قرار داده شده‌اند [۱]. در شکل (۱) طرح ساده‌ای از این موازی ساز نشان داده شده است.

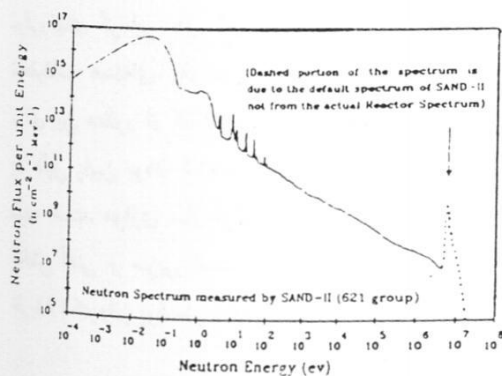
* اصل مقاله:

Modification of the neutron beam spectrum for neutron radiography at Tehran Research Reactor (TRR)

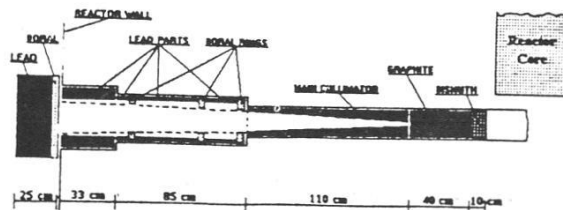
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 377 (1996)45-47

طیف انرژی نوترونها، اندازه‌گیری و محاسبات

برای محاسبه طیف انرژی نوترونها در مدخل ورودی موازی ساز ابتدا باید از میزان نوترونهای قلب رآکتور و همچنین میزان پرتوهای گامای آن باخبر شد. بدین منظور در اولین قدم با استفاده از روش فعال‌سازی پولکهای فلزی، شار نوترونها در وسط کانال سرتاسری در مقابل قلب رآکتور اندازه‌گیری شد. جنس پولکها از عناصری مثل $Ti, Se, Mg, Ni, Al, Fe, In, Au, Co$ انتخاب شد. هرکدام از این پولکها (گرمایی، تشدید، آستانه‌ای) به بخشی از طیف انرژی نوترونها حساس هستند. فعالیت خالص هر پولک با استفاده از روش طیف‌نمایی گاما و به کمک آشکارساز ژرمانیوم خالص (HPGe) و نرم افزار OMNIGAM (از کمپانی ORTEC) تعیین شد و سپس طیف انرژی نوترونها توسط کد کامپیوتری SAND-II محاسبه و رسم شد [۲]. در شکل (۲) طیف انرژی این نوترونها را می‌توان مشاهده کرد. همزمان با این محاسبات، با استفاده از کد کامپیوتری یک بعدی ANISN/PC برای رآکتوری با قلب همگن مشابه، طیف انرژی نوترون و گاما نیز از روش حل معادله ترابرد محاسبه شد [۳ و ۴].



شکل ۲- طیف انرژی نوترون اندازه‌گیری شده توسط فعال‌سازی پولکهای فلزی و استفاده از کد SAND-II در قدرت ۱۰KW رآکتور



شکل ۱- طرح موازی ساز قبل از بهینه‌سازی

مشخصات سیستم اولیه به شرح زیر است :

الف - میانگین شار نوترونهای گرمایی در محل نمونه گذاری برابر است با $6/1 \times 10^4 \text{ n cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
 ب - نسبت کادمیوم (نسبت فعالیت پولک طلا بدون پوشش کادمیوم به فعالیت آن با پوشش کادمیوم) برابر ۵۰ است.

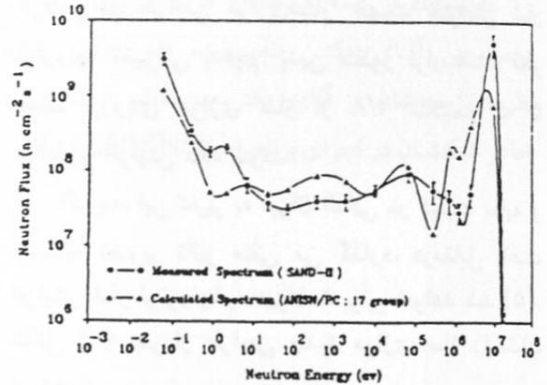
ج - نسبت نوترون به گاما برابر است با

$$5 \times 10^5 \text{ n cm}^{-2} \text{ mR}^{-1}$$

به دلیل استفاده از اورانیوم با غنای پایین تر، به جای اورانیوم با غنای بالا، در سوخت رآکتور و همچنین تغییرات دیگری که در شکل قلب رآکتور به وجود آمده، شکل طیف نوترونها در داخل قلب رآکتور تغییر کرده است به طوری که این تغییرات در محل ورودی کانالهای نوترونی نیز مشهود است. متأسفانه این تغییرات سبب پایین آمدن شار نوترونها در داخل کانال سرتاسری شد، به گونه‌ای که در محل نمونه‌گذاری سیستم رادیوگرافی با نوترون، شار نوترونها به میزان ۴ برابر کاهش یافت و این بدان معنی است که زمان پرتودهی باید ۴ برابر افزایش یابد. این مسئله موجب شد تا در مورد بهینه‌سازی سیستم فوق تصمیم‌گیری شود و شار نوترونها با توجه به شرایط جدید قلب افزایش یابد. در این مقاله روشهایی که برای دستیابی به این هدف به کار برده شده‌اند توضیح داده می‌شود.

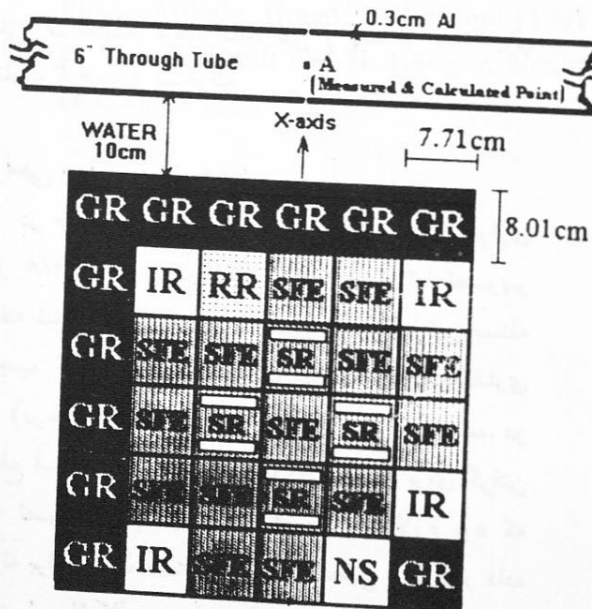
سازگاری نسبتاً خوبی بین طیف نوترونی اندازه‌گیری شده به کمک کد SAND-II و طیف نوترونی محاسبه شده به روش کد ANISN/PC دیده می‌شود. شکل (۴) نیز وضعیت قلب همگن معادل را در مقایسه با شکل قلب واقعی نشان می‌دهد.

پس از اطمینان از درستی نتایج محاسبه شده از طریق اجرای کد ANISN/PC، تصمیم گرفتیم برای مراحل بعدی نیز از این کد استفاده کنیم. بنابراین، نتایج حاصل را به عنوان داده‌های ورودی جدید به کار برده و برنامه را برای مرحله بعدی اجرا کردیم. در مرحله جدید با به کارگیری اندازه‌های مختلفی از گرافیت به عنوان کندکننده و بیسموت به عنوان جاذب پرتوهای گاما، شکل طیف بهینه شده نوترونها و پرتوهای گاما جهت استفاده در پشت موازی ساز و در محل مدخل ورودی آن به دست آمد. نتایج نهایی محاسبات فوق در شکلهای (۵ و ۶) در مقایسه با طیف نوترونها و پرتوهای گاما نشان داده شده‌اند.

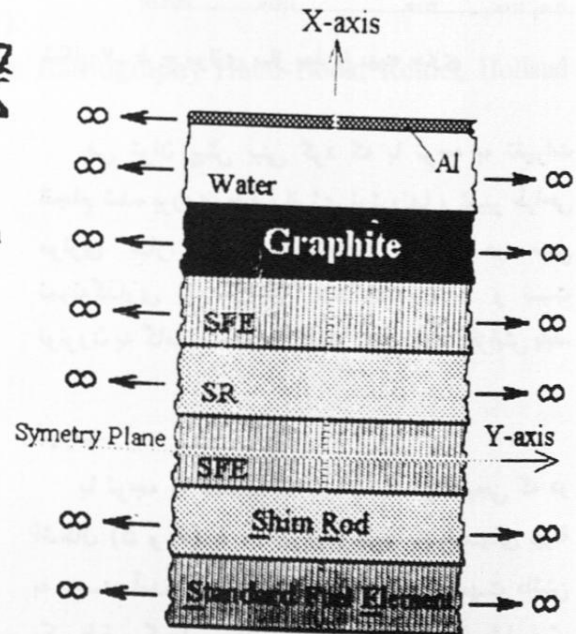


شکل ۳- مقایسه بین طیف نوترون محاسبه شده و اندازه‌گیری شده (در ۱۷ گروه انرژی)

برای این منظور فرض کردیم تمام مواد در داخل قلب راکتور به طور یکنواخت پخش شده است. سپس با فرض یک چشمه گسترده یکنواخت نوترونی در داخل قلب، کد ANISN/PC اجرا شد. در شکل (۳)



شکل ۴- (ب) آرایش واقعی میله های سوخت

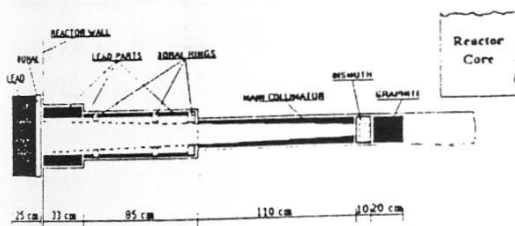


شکل ۴- (الف) قلب همگن فرضی در راستای محور X

گیرمتر کمالی مقدم و فرهود ضیائی. بهینه‌سازی طیف پرتو نوترونها برای سیستم رادیوگرافی نوترونی

با بهینه‌سازی طیف انرژی نوترونها گرمایی تصمیم گرفتیم در طراحی موازی‌ساز جهت افزایش شار نوترونها تغییراتی بدهیم. بدین منظور قرار است قطر دهانه ورودی موازی‌ساز از ۱/۸ سانتیمتر به ۵ سانتیمتر افزایش داده شود.

اگرچه، این تغییر به میزان اندکی در کیفیت سایه و نیمسایه تصویر تاثیر منفی می‌گذارد، درمقابل باعث افزایش شار نوترونها به میزان ۸ برابر خواهد شد [۵]. شکل (۷) نمودار طراحی جدید موازی‌ساز را نشان می‌دهد.

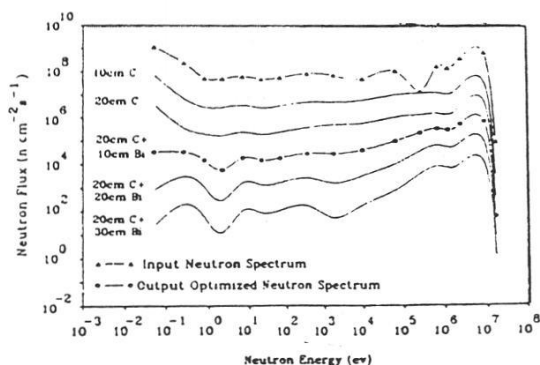


شکل ۷- طرح موازی‌ساز بعد از بهینه‌سازی

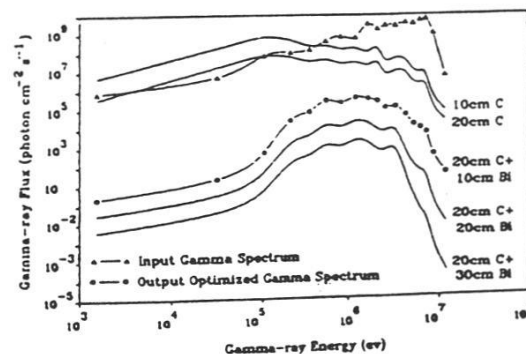
می‌توان پیش‌بینی کرد که با توجه به تغییرات انجام شده بر روی طیف انرژی نوترونها و تغییر طراحی موازی‌ساز، شار نوترونها گرمایی در محل نمونه‌گذاری به حدود $10^9 \text{ n cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ و نسبت نوترون به گاما به حدود $10^9 \text{ n cm}^{-2} \text{ mR}^{-1}$ افزایش یابد.

نتیجه

با توجه به محاسبات انجام شده و نتایجی که در اشکال (۵ و ۶) به دست آمده است ضخامت‌های بهینه به دست آمده برای گرافیت و بیسموت جهت داشتن یک طیف گرمایی مناسب نوترونی و حداقل شار پرتو گاما، ۲۰ سانتیمتر گرافیت و ۱۰ سانتیمتر بیسموت است.



شکل ۵- مقایسه طیف نوترون، قبل و بعد از ضخامت‌های متفاوت گرافیت و بیسموت



شکل ۶- مقایسه طیف گاما، قبل و بعد از ضخامت‌های متفاوت گرافیت و بیسموت

طراحی موازی‌ساز جدید

در طراحی موازی‌ساز اولیه دهانه ورودی موازی‌ساز ۱/۸ سانتیمتر در نظر گرفته شد تا تصویر گرفته شده توسط سیستم واضحتر باشد. اما این مسئله موجب کم‌شدن شار نوترونها در محل نمونه‌گذاری شد (در حدود $6 \times 10^2 \text{ n cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$). در نتیجه، در مواقع استفاده از سیستم جهت رادیوگرافی برای گرفتن یک تصویر خوب و با کیفیت مطلوب لازم بود که نمونه برای مدت نسبتاً طولانی درمقابل پرتو قرار داده شود. این اشکال، به دلیل طاقت‌فرس بودن مراحل کار، باعث شد که ما، به ناچار از ادامه مطالعات توموگرافی کامپیوتری نوترونی چشم‌پوشی کنیم. بنابراین، همزمان

قدردانی

بدینوسیله از همه همکاران گروه فیزیک نوترون، بخصوص آقای دکتر پذیرنده به خاطر نقطه نظرهای مفیدشان و آقای دکتر سیدکاظم مرعشی به خاطر کمکشان در اجرای برنامه ANISN/PC تشکر

می‌کنم. همچنین از سرپرست رآکتور و همکارانشان در گروه کارگردانی رآکتور و سرپرست و اعضای گروه فیزیک بهداشت به خاطر همکاری‌شان در طی مراحل مختلف پیشرفت کارهای این پروژه تشکر و قدردانی می‌شود.

References

1. K.K. Moghadam and Z. Tabatabaeian, NR facility for AEOI Nucl. Research Center, Proc. 2nd World Conf. on NR, Paris, France (1986).
2. S. Berg and W.N. Mcelroy, SAND-II, Spectrum Analysis by Neutron Detectors and Associated Codes, AFWL-TR, 67-41, Vol.II (1967).
3. J.R. Matorino, Computer Code ANISN Multiplying Media & Shielding Cal. II Code, IAEA-Workshop on Reactor Physics Cal., ICTP, Trieste (1990).
4. M.K. Marashi and J.R. Mendonca, IRAN LIB, A p-3 Coupled Neutron-Gamma Cross Section Library in ISOTXS Format to be Used by ANISN/PC, Proc, Brazilian Meeting on Reactor Phys., Atibaia, Brasil, 17-20 Sept (1991).
5. P. Von de Hardt and H. Rottger, Neutron Radiography Hand-Book, Reidel, Holland (1981).

MODIFICATION OF THE NEUTRON BEAM SPECTRUM FOR NEUTRON RADIOGRAPHY AT TEHRAN RESEARCH REACTOR (TRR)

K. Kamali Moghadam, F. Ziaie
Nuclear Research Center
Atomic Energy Organization of Iran

Abstract

Recently due to the replacement of the High Enriched Uranium (HEU) fuel with the Low Enriched Uranium fuel (LEU) and the changes in the reactor core configuration at TRR, the existing Neutron Radiography (NR) system was no longer efficient. Thus, it was decided to modify the system in order to increase the neutron flux and to improve the characteristics of the system.

The neutron energy spectrum was measured by foil activation method using SAND-II code and calculated by ANISN/PC code. The general trend of the calculated and measured spectra show good similarity. By introducing different sizes of moderator and gamma absorber behind the collimator, the optimum thermal neutron flux impinge the collimator was calculated using ANISN/PC code.

The inlet diameter of the collimator was changed from 1.8 to 5 cm in order to increase the neutron flux at the sample position, which should result in an increase of 8 fold in spite of a small increase in the geometrical unsharpness. The new beam characteristics at the sample position are predicted as an average thermal neutron flux of about $10^6 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and a neutron to gamma ratio of about $10^6 \text{ n cm}^{-2} \text{ mR}^{-1}$.