



معرفی چینی پلیمری به منظور برداشت حداکثری نوترون حرارتی در طراحی شاتر نوترون رادیوگرافی

روح اله عادل‌زاده^{۱*}، بهروز رک رک^۱

۱ - پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۴

مکیده

ملاحظات پرتویی به عنوان مهم‌ترین پارامتر در راه‌اندازی و تجهیز سیستم نوترون‌رادیوگرافی (NR) در راکتور تحقیقاتی تهران بوده است. در بهره‌گیری از یک حفاظ کامپوزیتی بهینه جهت حفاظ‌سازی نوترون در شاتر، انتخاب جاذب نوترونی و همچنین جنس بستر بسیار مهم است. بدین منظور در میان ذرات جاذب نوترون، بور و همچنین رزین اپوکسی به دلیل خواص ویژه‌ای که دارند بسیار مورد توجه می‌باشند. در این مطالعه قدرت حفاظ‌سازی نوترونی چهار ترکیب مهم از عنصر بور شامل کاربید بور، نیتريد بور، اکسید بور و اسید بوریک برای نوترون‌های حرارتی به روش تحلیلی محاسبه شدند. همچنین به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، چینی خلاق، به منظور تولید یک حفاظ نوترونی با کارایی بالا معرفی شد. نتایج بیانگر کارایی بالای استفاده از جاذب کاربید بور در مقایسه با دیگر ترکیبات بوردار و همچنین شیب افزایشی غلظت ذرات جاذب نوترونی در بهبود قدرت حفاظ‌سازی شاتر خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: نوترون رادیوگرافی، شاتر، حفاظ نوترونی، کامپوزیت پلیمری، اپوکسی

۱- مقدمه

در راه‌اندازی و تجهیز این بیم‌تیوب بوده است. عملکرد مناسب شاتر به عنوان یک حفاظ بیولوژیکی و همچنین به منظور جلوگیری از آسیب تابشی تجهیزات الکترونیک درون اتاقک، بسیار مهم است. در حال حاضر ترکیبات مختلفی در بحث حفاظ‌سازی نوترون و گاما مطرح هستند. برای مثال بتن‌ها بدلیل گران نبودن، سهولت تولید و سازگاری با دیگر مصالح ساختمانی، به طور رایج در حفاظ‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این پروژه نیز به عنوان ماده اولیه در ساخت دیوارهای قطور اتاقک NR در نظر گرفته شده‌اند. با این همه، به دلیل تنوع در مواد تشکیل دهنده بتن، محاسبات تضعیف باریکه در

نوترون‌رادیوگرافی (NR)، به عنوان مکمل رادیوگرافی ایکس/گاما مطرح است. از مزایای این تکنیک تصویربرداری می‌توان به نفوذ بالای نوترون در مواد سنگین نظیر سرب و اورانیوم، طولنایی تفکیک ایزوتوپی عناصری نظیر اورانیوم و حساسیت به مواد سبک نظیر هیدروژن اشاره نمود (von der Hardt and Röttger, 2012).

اخیرا راکتور تحقیقاتی ۵ مگاواتی تهران در حال طراحی و تجهیز یکی از بیم‌تیوب‌های خود (بیم‌تیوب E) به منظور کاربرد NR می‌باشد (Rokrok et al., 2019). ملاحظات ایمنی پرتویی چه در قسمت طراحی اتاقک و چه در قسمت شاتر، به عنوان مهم‌ترین پارامتر

میدان‌های شدید با عدم قطعیت بالایی همراه است. همچنین بواسطه گرم شدن بتن در فرایند پرتوگیری، اتلاف آب -و به تبع آن هیدروژن- راندمان حفاظ‌سازی نوترونی را به شدت کاهش می‌دهد (Glasstone and Sesonske, 1994). بدین منظور کامپوزیت‌های پلیمری مختلفی در عرصه حفاظ‌سازی در حال مطرح شدن هستند چرا که سبک بودن بستر پلیمری علاوه بر

کندسازی حداکثری نوترون‌های سریع قابلیت جذب نوترون‌های حرارتی را نیز دارند. در این بین، پلیمر گرماسخت اپوکسی نمونه‌ای موفق در این حوزه بوده است، چرا که علاوه بر خواص پایداری حرارتی و چسبندگی مطلوبی که دارد، بدلیل حضور ترکیبات آروماتیک از مقاومت تابشی خوبی نسبت به سایر پلیمرها و از جمله پلی‌اتیلن برخوردار است (Ivanov, 1992; Joshi et al., 2019; Ruhollah Adeli et al., 2017). به منظور تولید یک حفاظ نوترونی خوب، انتخاب جاذب نوترونی بسیار مهم است. لیتیم، بور و کادمیوم، سه جاذب عمده نوترون محسوب می‌شوند. لیتیم، دو ایزوتوپ پایدار $Li-6$ و $Li-7$ دارد که فراوانی ایزوتوپ $Li-6$ بسیار ناچیز و در حدود $7/59\%$ است. واکنش غالب جذب این ایزوتوپ (n, α) است که هیچ‌گونه تولید تابش گامایی نداشته و سطح مقطع جذب بالای 940 barns را برای نوترون‌های حرارتی دارد. از آنجا که فراوانی این ایزوتوپ بسیار پایین است، در کاربردهای عملی غنای این ایزوتوپ را معمولا تا 96% افزایش می‌دهند که بسیار هزینه بر است. نکته مهم دیگر پایین بودن آستانه انرژی واکنش فوتونوترونی آن است که می‌تواند حتی این ایزوتوپ را به عنوان یک چشمه نوترونی تک‌انرژی نیز معرفی کند (Arnold, 1964; Chilton et al., 1984; Shultis and Faw, 1996).

در این مطالعه قدرت حفاظ‌سازی نوترونی ترکیباتی از عنصر بور -با توجه به امتیازات ذکر شده- به صورت تحلیلی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت و در پایان با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، چینی‌های جدید به منظور تولید یک حفاظ نوترونی با کارایی بالا در برداشت حداکثری نوترون‌های حرارتی در شاتر سیستم NR معرفی گردید.

۲- روش کار

در این مطالعه ابتدا محاسبه سطح مقطع جذب ماکروسکوپیکی چهار ترکیب مهم از عنصر بور به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۱ مشخصات این ترکیبات را نشان می‌دهد:

بور نیز عنصری است که از دو ایزوتوپ پایدار تشکیل شده است که فراوانی $B-10$ ، به عنوان جاذب نوترون $19/9\%$ است. این عنصر بر خلاف عناصر گادالونیوم و یا کادمیوم کمیاب محسوب نمی‌شود و با داشتن سطح مقطع جذب مناسب، به عنوان یک جاذب نوترونی مهم شناخته می‌شود (767 barns). ایزوتوپ $B-10$ جداسازی شده سطح مقطع جذب بالاتری برای نوترون‌های حرارتی دارد، 3837 barns (Firestone)

جدول ۱- مشخصات چهار ترکیب مهم از عنصر بور

ترکیب شیمیایی	نام ترکیب	جرم مولی (g. mole ⁻¹)	چگالی (g. cm ⁻³)
B4C	کاربید بور	55.25	2.52
BN	نیتريد بور	24.82	2.10
B2O3	بورون تیروکساید	69.62	2.46
B(OH)3	اسید بوریک	61.84	2.44

سطح مقطع جذب ماکروسکوپی، Σ ، یک ترکیب از رابطه نظری زیر قابل حصول است:

$$\Sigma_a (cm^{-1}) = \left(\frac{\rho \cdot N_A}{M} \right) \sum_j W_j \sigma_{aj} \quad (1)$$

که در آن ρ و M به ترتیب چگالی و جرم مولی ترکیب است. همچنین W_j و σ_{aj} که در المان مجموع دیده می‌شوند، به ترتیب معرف کسر اتمی و سطح مقطع میکروسکوپی عنصری خاص از ترکیب است. پس انتخاب بهترین ترکیب بوردار در بحث حفاظ‌سازی نوترون‌های حرارتی، در گام دوم به روش شبیه‌سازی بهینه‌ترین چینش و ساختار حفاظ نوترونی از لحاظ شیب غلظت را برای یک ماده کامپوزیتی بر پایه رزین اپوکسی تقویت شده با این ترکیب بوردار، تحقیق شد. بدین منظور از کد *MCNPX* نسخه 2.6.0 (Pelowitz, April 2008) جهت محاسبات بهره حفاظ‌سازی استفاده شد. همچنین ترکیب و درصد وزنی عناصر رزین اپوکسی پخت شده که به صورت تجربی با آنالیز *CHN* از کار تحقیقاتی پیشین‌مان (Adeli et al., 2016b) بدست آمده است، در این شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

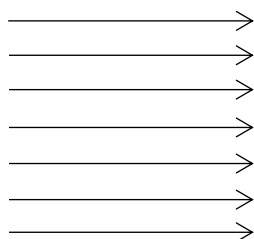
علی‌رغم مطالعات و تحقیقات متنوعی که در حوزه حفاظ‌سازی نوترونی صورت گرفته است (Adeli et al., 2015; Park et al., 2014; Lee et al., 2016a)، در این قسمت چند طرح بر اساس شیب غلظت ذرات جاذب نوترون در بستر پلیمر اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت و شار نسبی عبوری نوترونی و همچنین فوتون‌های ثانویه تولیدی مقایسه شد. جدول ۲ مشخصات و نحوه چینش طرح‌های ممکن حفاظ‌سازی را در کد *MCNPX* نشان می‌دهد. شکل ۱ نیز نمایی از طرح *Design 3* را به تصویر کشیده است.

ضخامت کلی هر چینش، یکسان و برابر ۹ mm در نظر گرفته شد که نهایتاً غلظت یکسانی از ذرات تقویت‌کننده در هر چینش لحاظ شده‌است. از آنجا که مولفه‌ها و بلوک‌های استفاده شده در موازی‌ساز به گونه‌ای طراحی می‌شوند که نسبت کادمیومی برای نوترون‌های خروجی از بیم‌تیوب در بیشینه خود قرار گیرد، چشمه استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها تماماً نوترون حرارتی، صفحه‌ای و با گسیل موازی در نظر گرفته شد.

جدول ۲- مشخصات و شیب غلظت در چند طرح حفاظ سازی

کد طرح	تعداد لایه	ضخامت هر لایه (mm)	شیب غلظت (wt%)
Design 1	1	9	B4C
Design 2	3	3	5-3-1
Design 3	3	3	1-3-5
Design 4	9	1	5-3-1/5-3-1/5-3-1
Design 5	9	1	1-3-5/1-3-5/3-5

شار نوترون حرارتی



شکل ۱- نمایی از طرح حفاظ *Design 3*

۳- نتایج

جدول ۳ سطح مقطع جذب ماکروسکوپی چهار ترکیب مهم بوردار شامل کاربید بور، نیتريد بور، اکسید بور و اسید بوریک را برای نوترون‌های حرارتی که به روش تحلیلی محاسبه شده‌اند نشان می‌دهد. شکل ۴ نیز خروجی شبیه‌سازی را بر حسب تنوع شیب غلظت ذرات کاربید بور در بستر پلیمری در تضعیف شدت نوترون‌ها و گامای ثانویه تولیدی نشان می‌دهد.

جدول ۳- سطح مقطع جذب ماکروسکوپی ترکیبات بوردار برای نوترون‌های حرارتی

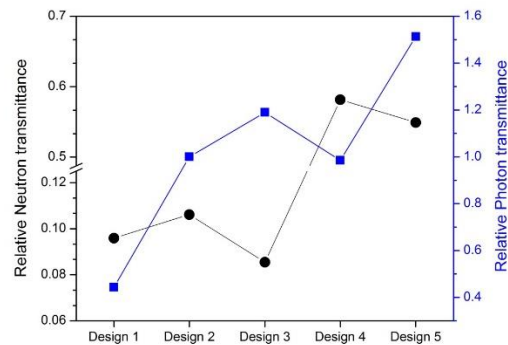
ترکیب شیمیایی	B(OH)3	B2O3	BN	B4C
سطح مقطع جذب ماکروسکوپی (cm ⁻¹)	16.88	30.20	36.26	69.62

استفاده از شیب غلظت در قدرت حفاظ‌سازی نوترونی حفاظ کامپوزیتی تاثیرگذار است و در مقایسه با طرح بدون شیب غلظت، *Design 1*، شدت شار نسبی نوترون و فوتون‌های ثانویه متفاوت خواهند بود. طبق این نتایج، بهره‌گیری از شیب غلظت با سیر صعودی، *Design 3*، قادر است کسر کمتری از تابش نوترون بر خوردی را از خود عبور دهد و بنابراین قادر است قدرت حفاظ‌سازی نوترونی حفاظ کامپوزیتی را بهبود بخشد. همچنین استفاده از تعداد لایه‌های بیشتر اما ضخامت‌های کمتر و تکرار شیب غلظت، *Design 4* و *Design 5*، قدرت حفاظ‌سازی نوترونی را به شدت افت خواهد داد. در توضیح رفتار فوق می‌توان اینگونه بیان کرد که نوترون حین حرکت در محیطی با جرم مولی کمتر، درصد بیشتری از انرژی خود را از دست خواهد داد. همچنین احتمال گیراندازی نوترون‌هایی که انرژی (سرعت) کمتری دارند بیشتر است. بنابراین در کامپوزیتی که از شیب غلظت با سیر صعودی، *Design 3*، بهره می‌گیرد، کندسازی بیشتری در لایه‌های اول رخ خواهد داد که در ادامه و با حرکت به عمق نمونه - که با افزایش غلظت جاذب نوترونی همزمان است - گیراندازی با احتمال بیشتری اتفاق می‌افتد.

همچنین نتایج در مورد فوتون‌های ثانویه گسیلی حفاظ کامپوزیتی در یک میدان نوترونی، بیانگر این واقعیت است که عدم بهره‌گیری از شیب غلظت جاذب نوترونی کم‌ترین فوتون‌های ثانویه را در سطح خارجی حفاظ ایجاد خواهد کرد. استفاده از شیب غلظت به خصوص شیب صعودی، شار نسبی عبوری فوتون‌های ثانویه را فراتر از مقدار واحد نشان می‌دهد که نشان از عدم خاصیت خود حفاظی حفاظ کامپوزیتی است. با این وجود در صورتی که اولویت با حفاظ‌سازی نوترونی بوده باشد، استفاده از ترکیب هیبریدی و یا لایه‌ای مجزا به عنوان تضعیفگر گاما در چپش *Design 3*، این نقیصه را جبران خواهد کرد.

مراجع

Adeli, R., Shirmardi, S.P., Ahmadi, S.J., 2016. Neutron Irradiation Tests on B4C/Epoxy Composite for neutron Shielding Application and the Parameters Assay. *Radiation Physics and Chemistry* 127, 140-



شکل ۲- شار نسبی عبوری نوترون و فوتون‌های ثانویه از حفاظ کامپوزیتی (دایره: نوترون، مربع: فوتون)

۴- بحث و نتیجه‌گیری

محاسبات نظری نشان می‌دهند که کاربرد بور با تفاوت قابل ملاحظه‌ای نسبت به سایر ترکیبات، بالاترین احتمال جذب نوترون‌های حرارتی را با مقدار cm^{-1} از خود نشان می‌دهد. پس از آن نیتريد بور با مقدار cm^{-1} در مرتبه دوم قرار می‌گیرد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که اسید بوریک به عنوان ارزان قیمت‌ترین ترکیب، از لحاظ قدرت تضعیف در مرتبه آخر قرار گرفته است.

افزایش غلظت جاذب نوترونی در بستر پلیمری، افزایش حضور خلل و فرج را در پی خواهند داشت که سبب افت خواص نهایی قطعه طراحی شده خواهد شد. همچنین افزایش درصد وزنی جاذب نوترونی به بستر پلیمری، سبب کاهش میزان عناصر سبک در ترکیب پلیمری خواهد شد و نهایتاً کاهش خاصیت کندکنندگی نوترون‌ها را منجر خواهد شد. بنابراین افزایش بی‌رویه غلظت جاذب نوترونی در بستر پلیمری علاوه بر افزایش هزینه، روش مناسبی به منظور بهبود راندمان حفاظ کامپوزیتی نخواهد بود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد

- Pelowitz, D.B., April 2008. MCNPX™ User's Manual – Version 2.6.0, Los Alamos National Laboratory
- Rokrok, B., Adeli, R., Dastjerdi, M.H.C., Nazemi, E., Kasesaz, Y., Movafeghi, A., 2019. Design of shielding, shutter and beam Neutron Radiography System catcher for the of the Tehran Research Reactor (TRR), Training Workshop on the Advanced Use of Neutron Imaging for Research and Applications
- Ruhollah Adeli, Seyed Pezhman Shirmardi, Seyed Javad Ahmadi, Abbasi, H., 2017. Effect of neutron irradiation on neat epoxy resin stability in shielding applications. Science and Engineering of Composite Materials (SECM) 25
- Shultis, J.K., Faw, R.E., 1996. Radiation Shielding. Prentice Hall PTR
- V. McLane, C.L.D., P.F. Rose, 1988. Neutron Cross Sections
- von der Hardt, P., Röttger, H., 2012. Neutron radiography handbook: nuclear science and technology. Springer Science & Business Media
- Adeli, R., Shirmardi, S.P., Ahmadi, S.J., S., 2016. High energetic gamma attenuating from a neutron field by a lead free reinforced composite. Nuclear science and technology 75, 22-30
- Arnold, E., 1964. Handbook of Shielding Requirements and Radiation Characteristics of Isotopic Power Sources for Terrestrial, Marine, and Space Applications. Oak Ridge National Lab., Tenn
- Chilton, B., Kenneth Shultis, J., Faw, R.E., 1984. Principles of Radiation Shielding. Prentice-Hall, Inc, New Jersey
- Firestone, R.B., Shirley, V.S., 1996. Table of Isotopes: A
- Incorporated
- Glasstone, S., Sesonske, A., 1994. Nuclear Reactor Engineering: Reactor design basics, Forth ed. Chapman & Hall
- Hogan, N.J., 2011. Characterization of a Cadmium Capture-gated Neutron Spectrometer. Brigham Young
- V.S., 1992. Radiation Chemistry of Polymers. Vsp, Originally published in Russian in 1988 by Khimiya-Leningrad
- Joshi, S., Snehalatha, V., Sivasubramanian, K., Ponraju, D., Jayaraman, V., Venkatraman, B., 2019. Radiation Stability of Epoxy-Based Gamma Shielding Material. Journal of Materials Engineering and Performance 28, 7332-7341
- Jumpee, C., Wongsawaeng, D., 2014. Innovative neutron shielding materials composed of natural rubber-styrene butadiene rubber blends, boron oxide and iron(III) oxide, International Nuclear Science and Technology Conference
- Lee, M.K., Lee, J.K., Kim, J.W., Lee, G.J., 2014. Properties of B4C-PbO-Al(OH)3-epoxy nanocomposite prepared by ultrasonic dispersion approach for high temperature neutron shields. Journal of Nuclear Materials 445, 63-71
- Park, J.J., Hong, S.M., Lee, M.K., Rhee, C.K., Rhee, W.H., 2015. Enhancement in the microstructure and neutron shielding efficiency of sandwich type of 6061Al-B4C composite material via hot isostatic pressing. Nuclear Engineering and Design 282, 1-7

Introducing a polymeric setup with maximum thermal neutron removal for neutron radiographic shutter design

Ruhollah Adeli^{*1}, Behruz Rokrok¹

1-Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran

Received: 29 -03 - 2020

Accepted: 13 - 01 - 2021

Abstract

Radiation safety aspects had been as a high impact parameter in design and setting up of neutron radiography (NR) facility for Tehran Research Reactor (TRR). For designing an optimized composite shield for neutron shielding in shutter, selecting the neutron absorber and composite matrix are the key elements. For this purpose, boron among the neutron absorbers, and epoxy resin as a matrix, for its specific characteristics, are more concerned. In this investigation, thermal neutron shielding ability was calculated theoretically for four boron compounds, including boron carbide, boron nitride, boron trioxide and acid boric. Indeed, by using Monte-Carlo simulation an innovated setup was introduced with high efficiency for thermal neutrons shielding. The results indicate the high efficiency of boron carbide absorbent in comparison with other boron compounds, as well as utilizing an increasing gradient neutron absorbent concentration in neutron shielding ability.

Keywords: Neutron radiography, Shutter, Neutron Shielding, Polymeric composite, Epoxy
