

Research Paper

Survey of Primary Knock-on Atoms Characteristics and Radiation Damage in Stainless Steel Grade 316¹

Ali Mohamadi², Mohsen Asadi Asadabad*³, Saied Hamidi⁴,
Mohamad Amin Amirkhani Dehkordi⁵

Received: 2020.02.12
Accepted: 2020.05.06

Abstract

The displacement of the atoms from their lattice sites is one of the results of neutron irradiation on materials. The primary knocked-on atoms spectrum and their angular distribution should be calculated for consideration of neutron radiation damage calculation. The AMTRACK program has been developed to calculate this information. This program extracts and analyzes information about the primary knocked-on atoms by using Ptrac output of the MCNPX code. In this study, Stainless Steel 316, one of the most important alloys in the reactor pressure vessel, is investigated. The material is irradiated by single energy neutrons of 1keV to 10MeV, the fraction of produced PKAs, their average energy, their maximum energy, and radiation damage value are calculated. The calculations are performed by using the neutron spectrum of the Bushehr reactor. Using this method, the amount of damage in the Bushehr reactor pressure vessel (for Stainless Steel 316) is equal to 7.2×10^{-22} (dpa/ fluence).

Keywords: *Primary Knocked-on Atom, SRIM Code, AMTRACK Program, VVER-1000, Stainless Steel 316.*

¹ DOI: 10.22051/jap.2020.30294.1149

² Ph.D. in Physics, Department of Physics, Arak University. Email: am1360@gmail.co.

³ Associate Professor, Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL. (Corresponding Author) Email: msasadi@aeoi.org.ir

⁴ Associate Professor, Department of Physics, Arak University. Email: s-hamidi@araku.ac.is

⁵ Ph.D. in Nuclear Engineering, Institute of Reactor and Nuclear Safety, Arak University.
Email: mamirkhani@aeoi.org.ir

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا
سال نهم، پیاپی ۱۸، پاییز ۱۳۹۸

مقاله پژوهشی

بررسی مشخصات اتم‌های پس‌زده اولیه (PKA) و آسیب ناشی از تابش نوترون در فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶

علی محمدی^۲، محسن اسدی اسدآباد*^۳،
سعید حمیدی^۴، محمد امین امیرخانی دهکردی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۷

چکیده

یکی از آثار تابش‌های هسته‌ای در مواد، جابه‌جایی اتم‌ها از جایگاه خود در شبکه بلوری است. برای محاسبه آسیب تابش نوترون باید طیف انرژی اتم‌های پس‌زده اولیه و همچنین توزیع زاویه‌ای و مکانی آن‌ها را محاسبه کرد. برنامه AMTRACK به منظور محاسبه این اطلاعات توسعه یافته است. این برنامه با استفاده از خروجی Ptrac کد MCNPX و تحلیل آن، اطلاعات مربوط به اتم‌های پس‌زده را به دست می‌آورد. در این مطالعه، فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ که یکی از مهمترین آلیاژها در ساخت محفظه فشار راکتور است، بررسی شده است.

^۱ DOI: 10.22051/jap.2020.30294.1149

^۲ دانش‌آموخته دکترا، دانشکده فیزیک، دانشگاه اراک. am1360@gmail.com

^۳ دانشیار، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران (نویسنده مسئول). msasadi@aeoi.org.ir

^۴ دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه اراک. s-hamidi@araku.ac.ir

^۵ دانش‌آموخته دکترا، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران. mamirkhani@aeoi.org.ir

نوترون‌های تک انرژی ۱ keV تا ۱۰ MeV روی این فلز تابش داده شده‌اند و کسر PKAهای تولیدی، انرژی میانگین آن‌ها، بیشینه انرژی PKAها و میزان آسیب تابشی به دست آمده است. محاسبات با استفاده از طیف نوترون راکتور بوشهر انجام شده است. با استفاده از این روش مقدار آسیب در راکتور بوشهر (برای فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶) برابر است با $(7/2 \times 10^{-22} \text{ dpa/fluence})$.

واژگان کلیدی: اتم‌های پس‌زده اولیه، برنامه AMTRACK، کد SRIM، VVER-1000، فولاد زنگ‌نزن سری ۳۱۶.

۱. مقدمه

توصیف اثر تابش در مواد در گستره انواع مواد و انواع تابش، در علم آسیب تابش بررسی می‌شود. در قلب راکتورهای هسته‌ای، که اتم‌های ساختار ماده در عمر مفید راکتور بارها و بارها از محل خود جابه‌جا می‌شوند، آسیب تابش بر اثر برخورد نوترون از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. نتیجه تابش بر اجزاء قلب (قرص سوخت، غلاف سوخت، ظرف فشار راکتور، ...) تغییر در ابعاد و مشخصات فیزیکی و مکانیکی مواد است، که ناشی از تغییر در ساختار میکروسکوپی مواد است. به منظور طراحی راکتور و همچنین مدیریت بهتر راکتورهای هسته‌ای، باید فهم عمیقی از اثرات تابش در مواد، برای محاسبه این آثار در طراحی و همچنین تولید مواد هسته‌ای جدید مقاوم در برابر تابش، وجود داشته باشد [۱]. مواد ساختاری راکتورها اغلب آلیاژهای فلزی هستند [۲].

انواع تابش‌ها (نوترون، الکترون، گاما، ...) قابلیت جابه‌جایی اتم‌ها را از محل خود در شبکه دارند. جابه‌جایی اتم‌ها دلیل فرایندی است که به تغییرات بیان شده در ساختار مواد می‌انجامد [۲]. برهم‌کنش هسته‌ای بین تابش و اتم شبکه موجب انتقال بخشی از انرژی پرتوی تابیده به صورت انرژی پس‌زنی به اتم می‌شود و باعث جابه‌جایی آن اتم از محل خود در شبکه می‌شود. اتم جابه‌جاشده، اتم پس‌زده اولیه (PKA^۱) نامیده می‌شود. انرژی لازم جهت جابه‌جایی اتم از ساختار شبکه خود در حدود ۲۰ eV تا ۱۰۰ eV است [۱]. پس از آن، PKA با انرژی جنبشی باقی‌مانده، شروع به حرکت می‌کند و اتم‌های پس‌زده ثانویه را ایجاد می‌کند، با ادامه این روند، آبخاری از اتم‌های جابه‌جاشده ایجاد می‌شود. هنگامی که اتمی جابه‌جا می‌شود، پشت سر خود حفره‌ای تشکیل می‌دهد که تهی‌جا نامیده می‌شود و اتم جابه‌جاشده سرانجام در بین مکان‌های شبکه جای می‌گیرد و به یک اتم بین‌نشین تبدیل می‌شود. زوج تهی‌جا و اتم بین‌نشین دلیل اصلی اثرات تابش در ساختار کریستالی جامدات هستند و به نام زوج فرنکل شناخته می‌شوند. اثرات فیزیکی تابش بر

¹ Primary knocked-on atom

مواد ممکن است ناشی از حضور زوج‌های فرنگل و دیگر آسیب‌های تابش باشد، که بر اثر تجمع یا نابودی جفت فرانکل با توجه به شرایط محیطی ایجاد می‌شوند. از انواع دیگر عیوب ایجاد شده در مواد می‌توان به حفره‌ها^۱، خوشه‌های جابه‌جایی^۲، کاواک‌ها و ... اشاره کرد. برای مثال حفره‌ها از اجتماع تعداد زیادی تهی‌جا در کنار یکدیگر تشکیل می‌شوند. با توجه به توضیحات بیان شده، رویداد آسیب تابش به صورت انتقال انرژی از ذره پرتابه به جامد و تغییر ساختار میکروسکوپی ماده، به شکل تغییر توزیع اتم‌ها، تعریف می‌شود. آسیب تابش، توصیف کننده حالت ریزساختار اولیه مواد تحت تابش است، در حالی که آثار تابش به رفتار ماده بر اثر ایجاد عیوب در جامد باز می‌گردد. بنابراین، باید اطلاعات کاملی از غلظت تعادلی عیوب نقطه‌ای و فرایند پخش آن‌ها داشته باشیم. به منظور آغاز بررسی آثار تابش در ابتدا باید اطلاعات کاملی از اتم‌های پس‌زده اولیه داشت. بنابراین، محاسبه طیف انرژی اتم‌های پس‌زده اولیه همراه با مکان و زاویه پراکندگی آن‌ها و طبقه‌بندی انواع PKAها اولین قدم در راستای پیش‌بینی دقیق اثرات تابش است [۵-۱].

در این مطالعه، برهم‌کنش نوترون با اتم‌های ماده بررسی شده است. انواع برهم‌کنش‌های نوترون با هسته عبارتند از پراکندگی کشسان (n, n) ، پراکندگی ناکشسان (n, n') ، واکنش $(n, 2n)$ و واکنش (n, γ) [۶]. در این مقاله، نوترون‌های تک‌انرژی در بازه انرژی ۱keV تا ۱۰MeV (۱۲ انرژی جدول ۳) و همچنین طیف نوترون شکافت راکتور بوشهر [۷] در نظر گرفته شده، در این محدوده انرژی، واکنش‌های $(n, 2n)$ و (n, γ) ناچیزند، لذا فقط پراکندگی کشسان و پراکندگی غیرکشسان لحاظ شده است [۶].

اطلاعات PKAها به عنوان ورودی برای کدهای محاسباتی آسیب تابش نظیر کد TRIM و کدهای دینامیک ملکولی نظیر Lammmps استفاده خواهند شد. با توجه به اهمیت فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ که به عنوان آستر مخزن تحت فشار راکتورهای شکافت به کار می‌رود [۸-۱۰]، اکثر مدل‌های آسیب تابشی ناشی از نوترون بر این ترکیب متمرکز شده‌اند، به همین دلیل در مقاله حاضر نیز فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ انتخاب شده است، آلیاژی که از آن به عنوان آلیاژ مخزن تحت فشار نیز استفاده می‌شود [۱۱ و ۱۲].

شبیه‌سازی تابش نوترون بر فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ توسط کد MCNPX صورت گرفته است و با تحلیل نتایج آن، اطلاعات مد نظر از اتم‌های پس‌زده به دست آمده است. کد MCNPX بروندادی به نام Ptrac تولید می‌کند که حاوی اطلاعات مطلوب است، به همین دلیل در این تحقیق برنامه‌ای به نام AMTRACK با استفاده از نرم‌افزار MATLAB نوشته شده است که قادر است خروجی Ptrac

¹ Voids

² Displacement Cluster

را تحلیل کرده و نتایج را ارائه دهد [۱۳ و ۱۴]. مزیت اصلی این روش آن است که کد MCNPX قادر است از مواد ترکیبی در هندسه‌های مختلف و با سطح مقاطع پیوسته از انرژی استفاده کند و روش محاسباتی با قابلیت عالی را در اختیار قرار دهد. از کد AMTRACK نوشته شده، تا کنون برای محاسبه آسیب تابش نوترون بر ظرف فشار راکتور بوشهر [۱۵ و ۱۶] و همچنین بازتابنده راکتور تهران [۱۷] استفاده کرده‌اند.

در این مقاله، کسر PKAهای تولیدی در فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶، در بازه نوترون‌های ۱ keV تا ۱۰ MeV، بررسی شده است و اطلاعات PKAها مربوط به تابش راکتور بوشهر بر سطح داخلی محفظه تحت فشار به دست آمده است. سرانجام، میزان آسیب تابشی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ پس از تابش نوترون‌های تک‌انرژی و همچنین طیف تابش نوترون راکتور بوشهر محاسبه شده است.

۲. تئوری مسئله

در برهم‌کنش کشسان، نوترون با هدف برخورد کرده و مقداری از انرژی خود را به شکل انرژی پس‌زنی به هدف انتقال داده و در ادامه پراکنده می‌شود، انرژی پس‌زنی در این واکنش عبارت است از:

$$T_Y = E_i - E_f \quad (1)$$

که E_i انرژی نوترون پیش از برخورد، E_f انرژی نوترون پس از برخورد و T_Y انرژی اتم پس‌زده است. در برهم‌کنش ناکشسان $X(n, n')Y$ ، انرژی پس‌زنی هدف با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید [۱]:

$$Q = T_{n'} \left(1 + \frac{m_n}{m_Y}\right) - T_n \left(1 - \frac{m_n}{m_Y}\right) - 2 \left(\frac{m_n m_n}{m_Y m_Y} T_n T_{n'}\right)^{1/2} \cos \theta \quad (2)$$

$$T_Y = Q - T_{n'} + T_X + T_n \quad (3)$$

در این معادلات، T_n انرژی نوترون تابشی، $T_{n'}$ انرژی نوترون پراکنده، T_X انرژی ذره اولیه، m_Y جرم هسته هدف، m_n جرم نوترون، θ زاویه پراکندگی نوترون نسبت به جهت تابش، Q انرژی واکنش و T_Y انرژی پس‌زنی هدف است. بخشی از این انرژی حدود ۲۰eV تا ۱۰۰eV صرف جابه‌جایی اتم از ساختار بلوری شده و اتم جابه‌جا شده با انرژی باقی‌مانده به شکل یک PKA به حرکت خود در بلور ادامه می‌دهد. مدل‌های مختلفی از جمله کینچین-پیز^۱ (KP)، لیندرهارد^۲، نورگت-رابینسون^۳، برای ارتباط بین انرژی ذره پرتابی با تعداد عیوب نقطه‌ای ایجاد شده وجود دارد.

¹ Kinchin-Pease

² Lindhard

³ Norgett-Rabinson

کد MCNPX قادر به شبیه‌سازی برهم‌کنش‌های نوترون و گاما و الکترون با مواد ترکیبی و در هندسه‌های مختلف سه‌بعدی است. یکی از خروجی‌های این کد فایل Ptrac است، که حاوی اطلاعات هر NPS است. هر زمان که برخورد رخ دهد اطلاعاتی شامل تعیین اتم پس‌زده، محل برخورد، نوع برخورد، زاویه حرکت نوترون قبل و بعد از برخورد، انرژی نوترون قبل و بعد از برخورد و غیره حاصل می‌شود [۱۸]. با توجه به اطلاعات فوق می‌توان به اطلاعات مربوط به اتم پس‌زده دست پیدا کرد، این اطلاعات شامل نوع اتم، انرژی اولیه آن، محل اتم، زاویه حرکت و زمان تولید آن نسبت به زمان ورود نوترون به محیط است. برای دستیابی و استخراج اطلاعات فوق از فایل Ptrac برنامه AMTRACK توسط نرم‌افزار MATLAB نوشته شده است. این برنامه قادر است اطلاعات PKAها را شامل تمامی اطلاعات مورد نیاز استخراج و طیف PKAها را رسم کند. همچنین، میانگین انرژی اتم‌های پس‌زده و بیشینه و کمینه انرژی آن‌ها را به ازای هر انرژی نوترون ورودی، محاسبه می‌کند. به دلیل اینکه در محدوده انرژی نوترون راکتورهای PWR (۱ eV تا چندین MeV) سطح مقطع برخوردهای کشسان و ناکشسان از سایر سطح مقاطع اهمیت بیشتری دارند، در برنامه حاضر محاسبات را به برخوردهای کشسان ($MT=2$) و ناکشسان نوترون ($MT=51...91$) محدود کرده‌ایم.

بر اساس استاندارد AMS 524L درصد عناصر اصلی فولاد زنگ‌نزن سری ۳۱۶ در جدول ۱ بیان شده است [۱۹]. این درصدهای وزنی در کد MCNPX به عنوان ماده تعریف می‌شود. به منظور محاسبه اطلاعات اتم‌های پس‌زده اولیه ناشی از عبور نوترون، ماده مد نظر به ضخامت ۱ cm و سطح 1 cm^2 و چشمه نوترونی صفحه‌ای با توزیع یکنواخت برای نوترون‌های تک‌انرژی و با توزیع به‌دست‌آمده از راکتور بوشهر برای طیف نوترون راکتور بوشهر شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی از سطح مقطع ENDF/B-VI استفاده شده است. تعداد ۱۰۰۰۰۰۰ ذره برای شبیه‌سازی استفاده شده است. خطای آماری محاسبات کمتر از ۰٫۸٪ بوده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ (Wt %) [۱۹].

Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
balance	0.08	1	2	18	14	3

کد SRIM بر اساس روش مونت‌کارلو قابلیت محاسبه آسیب تابشی نوترون را دارد، این کد از روش KP برای محاسبه تعداد عیوب ایجادشده در ماده استفاده می‌کند. این کد با حرکت دادن هر

۱۰ / بررسی مشخصات اتم‌های پس‌زده اولیه (PKA) و آسیب ناشی از تابش نوترون در فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶

یک از PKAها در نمونه تعداد نهایی جابه‌جایی‌ها را محاسبه می‌کند و نتایج را در خروجی Vacancy.txt ذخیره می‌کند. برای محاسبات آسیب تابشی نوترون در کد SRIM نیاز به یک فایل ورودی به نام Trim.dat است. این فایل باید حاوی اطلاعات مربوط به PKAها (عدد اتمی، انرژی، مختصات مکانی و کسینوس زوایای حرکتی PKA نسبت به جهت تابش نوترون) باشد [۲۰-۲۳]. برای تهیه ورودی Trim.dat نویسندگان از ترکیب کد MCNPX و AMTRACK استفاده کرده‌اند. به عبارت دیگر، یکی از خروجی‌های برنامه AMTRACK فایل Trim.dat است. در نهایت، با استفاده از این فایل می‌توان تعداد جابه‌جایی‌ها را به ازای هر نوترون (dpa/neutron) (fluence) به دست آورد. پارامترهای استفاده‌شده در کد SRIM در آمده است.

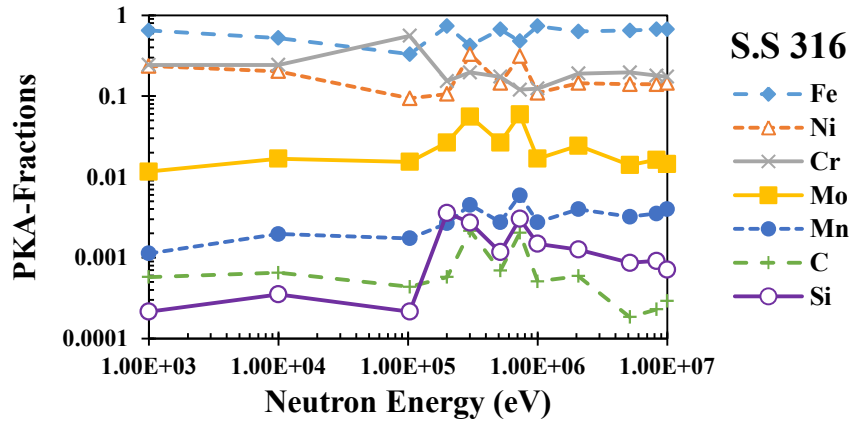
جدول ۲ پارامترهای مورد استفاده در کد SRIM [۲۱].

Mo	Ni	Cr	Mn	Si	C	Fe	
۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۱۵	۲۸	۲۵	انرژی جابه‌جایی (eV)
۳	۳	۳	۳	۲	۳	۳	انرژی پیوند شبکه (eV)
۶/۸۳	۴/۴۶	۴/۱۲	۲/۹۸	۴/۷	۷/۴۱	۴/۳۴	انرژی پیوند سطحی (eV)

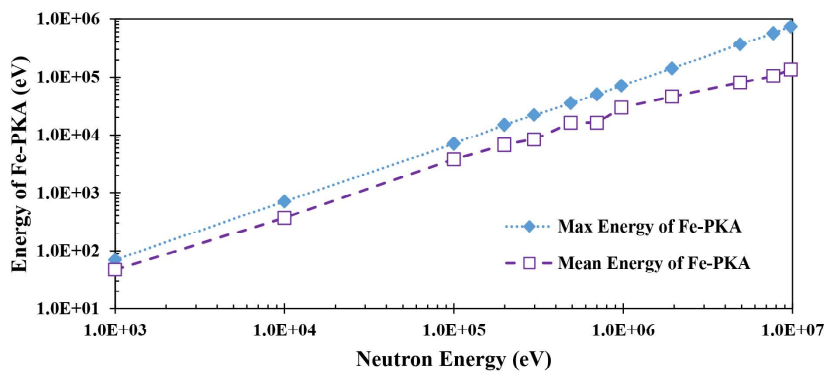
۳. نتایج

تابش نوترون از انرژی ۱ keV تا ۱۰ MeV بر فولاد زنگ‌نزن سری ۳۱۶ شبیه‌سازی شده است و فایل خروجی Ptrac توسط برنامه AMTRACK تحلیل و اطلاعات مربوط به PKAها استخراج شده است. در شکل ۱، کسر PKAهای تولیدی به ازای هر انرژی نوترون مشاهده می‌شود. با تغییر سطح مقطع در انرژی‌های مختلف درصد تولید PKAها تغییر می‌کند. بیشترین تعداد PKAها ناشی از آهن، نیکل و کرم است (عناصر موجود در فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ در جدول ۱ گزارش شده است). به همین دلیل، برای این سه عنصر میانگین انرژی PKAها و بیشینه انرژی PKAها بررسی شده و در شکل‌های ۲ و ۳ و ۴ رسم شده است.

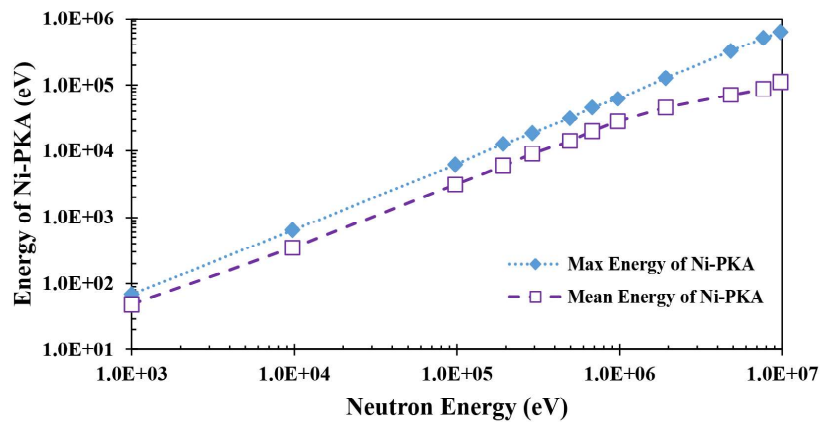
¹ Displacement per atoms



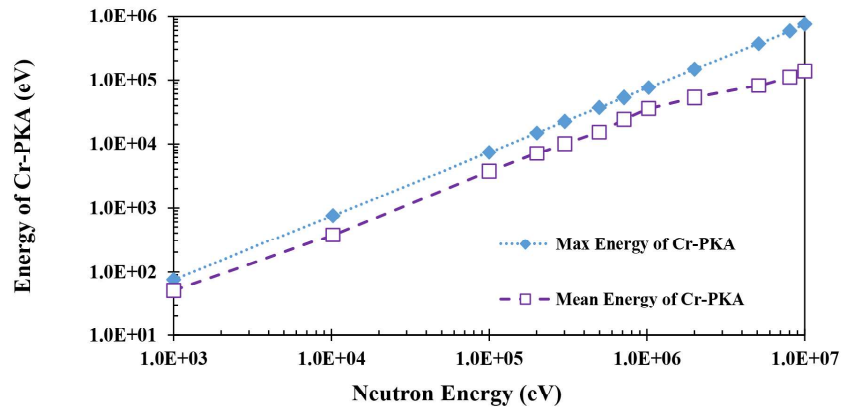
شکل ۱ کسر PKAهای تولیدی در فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ پس از تابش نوترون‌های تک‌انرژی از ۱ keV تا ۱۰ MeV.



شکل ۲ انرژی میانگین و انرژی بیشینه PKAهای Fe.



شکل ۳ انرژی میانگین و انرژی بیشینه PKAهای Ni.



شکل ۴ انرژی میانگین و انرژی بیشینه PKAهای Cr.

محاسبات انجام شده در شکل‌های ۲ و ۳ و ۴ برای آهن و نیکل و کروم نشان می‌دهد وقتی E_n کمتر از ۲۰۰ keV است، نسبت حدود ۰٫۵ تا ۰٫۶ حفظ می‌شود. در بازه ۲۰۰ keV تا ۱ MeV این نسبت از ۰٫۳ تا ۰٫۵ متغیر است و برای E_n از ۱ MeV تا ۱۰ MeV نسبت از ۰٫۱ تا ۰٫۳ تغییر می‌کند. اگر برخوردها کشسان باشد و پراکندگی کاملاً همسانگرد باشد، نسبت انرژی میانگین به انرژی ماکزیمم باید ۰٫۵ باشد. هر چه از این مقدار انحراف داشته باشیم به معنی این است که پراکندگی ناکشسان اثر بیشتری داشته است و پراکندگی ناهمسانگرد شده است. به همین دلیل، برای محاسبات آسیب برای مواد ساختاری اطراف راکتورها به کمک طیف نوترون شکافت، فرض واکنش پراکندگی کشسان و همسانگرد به تنهایی صحیح نیست و باید پراکندگی ناکشسان را نیز در نظر گرفت.

در ادامه، با محاسبه شار نوترون راکتور بوشهر بر محفظه تحت فشار راکتور و استفاده از آن، محاسبات برای این محفظه انجام گرفته است. طیف نوترون راکتور [۷] در برنامه MCNPX وارد و با استفاده از کارت Ptrac این کد، خروجی مورد نظر استخراج شده است. با تحلیل فایل به دست آمده، محاسبات کسر PKAهای تولیدی و میانگین انرژی PKAها و بیشینه انرژی به دست آمده است. در، نتایج مربوط به راکتور بوشهر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که، بیشترین کسر پس‌زنی‌ها در راکتور بوشهر سهم اتم Fe و با میانگین انرژی حدود ۱۵٫۸keV است.

جدول ۳ تابش راکتور بوشهر [۷] بر فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ و محاسبه کسر PKA های عناصر،

انرژی میانگین و انرژی بیشینه PKA ها.

راکتور بوشهر	Fe	Ni	Cr	Mo	Mn	Si	C
Fraction of PKAs	0.563212	0.214116	0.198017	0.020413	0.002369	0.001121	0.000751
Mean of PKAs (eV)	15821.52	9468.156	14988.33	10191.79	8610.76	32974.41	83258.59
Max of PKAs (eV)	1090000	566100	587000	278761.4	185700	603500	1039000

به منظور محاسبه میزان آسیب dpa، فایل Trim.dat را در اجرای هر یک از برنامه‌های فوق استخراج کرده و به عنوان ورودی در کد SRIM استفاده می‌کنیم. نتایج محاسبات مقدار آسیب برای تابش نوترون‌های ۱ keV تا ۱۰ MeV بر فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ در آمده است. با افزایش انرژی نوترون از ۱ keV تا ۱ MeV، آسیب با افزایش انرژی افزایش می‌یابد ولی در انرژی‌های نوترون بیش از ۱ MeV میزان آسیب با سرعت بسیار کمتری افزایش می‌یابد. با افزایش انرژی پرتابه اولیه، آشپار ایجاد شده بر اثر برخوردها افزایش یافته و این فرایند سبب افزایش مقدار اتم‌های جابه‌جاشده در ماده می‌شود. همانگونه که اشاره شد، در انرژی‌های بیشتر با افزایش سهم برخوردهای ناکشسان، نسبت انرژی میانگین PKA ها به انرژی بیشینه آنها از عدد ۰.۵ اختلاف پیدا می‌کند و برخورد ناهمسانگردتر می‌شود، که با فرض یکنواخت بودن ماده، احتمالاً دلیلی برای کاهش نواخت رشد آسیب است.

جدول ۴ محاسبه آسیب تابشی نوترون‌های تک‌انرژی بر فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶.

Neutron Energy (keV)	1	10	100	200	300	500
DPA/ fluence	7.24E-24	5.10E-23	5.43E-22	6.86E-22	4.28E-22	1.42E-21
Neutron Energy (keV)	700	1000	2000	5000	8000	10000
DPA/ fluence	6.82E-22	2.70E-21	2.70E-21	5.55E-21	6.73E-21	7.81E-21

با استفاده از روش فوق، مقدار (dpa/fluence) در راکتور بوشهر و برای تابش بر فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ محاسبه می‌شود. مقدار آسیب برابر است با (dpa/fluence) $7/2 \times 10^{-22}$ که با ضرب این عدد در جریان عبوری نوترون برای ۳۰ سال کار راکتور، می‌توان مقدار dpa را برای ۳۰ سال کارکرد راکتور محاسبه کرد. همانگونه که در مطالعات پیشین ذکر شده است [۱۷-۱۵]، آسیب ایجاد شده در ماده با جریان نوترون رابطه مستقیم دارد. با توجه به اینکه شار نوترون راکتور بوشهر برای انرژی‌های بیشتر از ۱ MeV برابر است با $3/22 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$ ، مقدار dpa در این حالت ۰.۲۲ خواهد بود. از مقایسه نتایج با استاندارد ASTM E521 [۲۴]، که بیان می‌دارد برای تابش نوترون $7 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ با انرژی $E > 1 \text{ MeV}$ بر آهن در یک راکتور PWR آسیمی به میزان ۱ dpa

در ماده انتظار می‌رود و با محاسبه شار نوترون راکتور بوشهر برای مدت زمان ۳۰ سال کارکرد آن و همچنین در نظر گرفتن ترکیب شیمیایی متفاوت آهن با فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶، محاسبات از دقت مناسبی برخوردار است.

۴. نتیجه گیری

محاسبه اثرات تابش و به دست آوردن تغییرات ایجاد شده در خصوصیات مواد یکی از اصول بسیار مهم در مدیریت هر نیروگاه هسته‌ای است. هدف نهایی این محاسبات، به دست آوردن مقدار آسیب ناشی از تابش نوترون است. با استفاده از روش مونت کارلو می‌توان به حجم زیادی از این اطلاعات دست یافت بدون اینکه نیاز به حل عددی انتگرال‌های پیچیده باشد. علاوه بر آن، حل این انتگرال‌ها به داده‌های ورودی دقیقی نیاز دارد که باید از کتابخانه ENDF استخراج شود. این محاسبات به عنوان ورودی کد SRIM استفاده می‌شود و نهایتاً به میزان دقیقی از آسیب نهایی ناشی از تابش نوترون، دست خواهیم یافت.

در این پژوهش، مقدار آسیب تابش نوترون در راکتور بوشهر بر فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ بررسی شده است. ابتدا مقدار آسیب بر اثر تابش نوترون تک انرژی ۱ keV تا ۱۰ MeV بررسی شده است، با تحلیل نتایج فایل Ptrac کسر PKAهای تولیدی، میانگین انرژی PKAها و بیشینه انرژی آنها به دست آمده است. نتایج این بخش نشان می‌دهد که در محاسبات تابش نوترون در راکتورها فرض واکنش پراکندگی کشسان و همسانگرد به تنهایی صحیح نیست و باید پراکندگی ناکشسان نیز در نظر گرفته شود. با در نظر گرفتن شار نوترون راکتور بوشهر مقدار آسیب برابر با (dpa/fluence) 7.2×10^{-22} به دست آمده است. نتایج این بخش با استاندارد ASTM E521 [۲۴] مقایسه شده است و نتایج از دقت مناسبی برخوردار است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از همکاری صمیمانه آقای دکتر قاضی در راکتور بوشهر تشکر می‌کنند.

منابع

- [1] Was G.S., *Fundamentals of radiation materials science, Metals and alloys*, 1st ed. Springer, Berlin, 2007
- [2] Averback R.S., Atomic displacement processes in irradiated metals., *Journal of nuclear materials*, **216**, 49-62, 1994
- [3] Vladimirov P., Bouffard S., Displacement damage and transmutations in metals under neutron and proton irradiation., *Comptes Rendus Physique*, **9**, 303-322, 2008

- [4] Robinson M.T., Basic physics of radiation damage production., *Journal of nuclear materials*, **216**, 1-28, 1994
- [5] Blue T., Lohan B., Khorsandi B. and Miller D., Neutron Damage in SiC Semiconductor Radiation Detectors in the GT-MHR., *Journal of ASTM International*, **3**, 1-8, 2006
- [6] Herman M., Trkov A., *Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File ENDF/B-VI and ENDF/B-VII*, Brookhaven National Laboratory, **1**, 2010
- [7] Kapyrin P.G., Krylov S.Y., Album of neutronic characteristics of reactor core of the initial fuel inventory (for operation personnel of mcr), Boston, **3**, 2005
- [8] Jr. Karnoski Pj., Fretague Wj., Potapovs Uldis and Steele L.E., Stainless Steel Reactor Pressure Vessels., *Nuclear Engineering and Design*, **11**, 347-367, 1970
- [9] Klueh R.L., Elevated-temperature ferritic and martensitic steels and their application to future nuclear reactors., *Int. Mater. Rev.*, **50**, 287-310, 2005
- [10] IAEA-TECDOC-665, *Materials for advanced water cooled reactors*, Proceedings of a Technical Committee Meeting held in Plzeň, Czechoslovakia, **5**, 14-17, 1991
- [11] Gillemot F., Overview of reactor pressure vessel cladding., *Int. J. Nuclear Knowledge Management*, **4**, 265-278, 2010
- [12] Stegemann D., Reimche W., Feiste K.L., Reichert Ch., Bernard M., Weber W., characterization of reactor pressure vessel steels by magneto inductive harmonic analysis., *NDT.net*, **5**, No. 08, 2000
- [13] Gilbert M.R., Marian J., Sublet j.Ch., Energy spectra of primary knock-on atoms under neutron irradiation, *Journal of nuclear materials*, **467**, 121-134, 2015
- [14] Luneville L., Simeone D., Gosset D., A new tool to compare neutron and ion irradiation in materials., *Nuclear Instruments and methods in Physics B*, **250**, 71-75, 2006
- [15] Ghazi Ardakani S.F., Hadad K., Evaluation of radiation damage in belt-line region of VVER-1000 nuclear reactor pressure vessel., *Progress in Nuclear Energy*, **99**, 96-102, 2017
- [16] Ghazi Ardakani S.F., Hadad K., Monte Carlo evaluation of neutron irradiation damage to the VVER-1000 PRV., *Nuclear Energy and Technology*, **3**, 73-80, 2017
- [17] Amirkhani M.A., Asadi AsadAbad M., Hasanzadeh M., Mirvakili S.M., Mohamadi A., Calculation of dpa rate in graphite box of Tehran Research Reactor (TRR), *Nuclear Science and Techniques*, 30:92, 2019
- [18] Pelowitz D.B., MCNPX 2.7D Extensions., *Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-10-07031*, 2010
- [19] SAE International AMS 5524L, Steel Corrosion and Heat-Resistant Sheet Strip and Plate., SAE 30316 Solution Heat Treated, 2014
- [20] Ziegler J.F., SRIM-2003., *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research Section B*, **219**, 1027-1036, 2004
- [21] Ziegler J.F., Biersack J.P., Ziegler M.D. , SRIM The Stopping Range of Ions in matter, *Ion Implantation Press*, 15th ed, Boston, **4**, 2008
- [22] Ziegler J.F., Biersack J., Littmark U., The Stopping and Range of Ions in Matter., *Treatise on Heavy-Ion Science*, 99-129, 1985
- [23] Ziegler J.F., Ziegler M.D., Biersak J.P., SRIM the Stopping Range of Ions in matter., *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research Section B*, **268**, 1818-1823, 2010
- [24] Standard Practice for Investigating the Effects of Neutron Radiation Damage Using Charged-Particle Irradiation, Annual Book of ASTM Standard, **17**, E521-16