

بررسی توزیع شعاعی burn-up در میله های سوخت راکتور VVER-1000 بوسیله کد MCNPX

احمد پیروزمند* - فاطمه روستا

دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته ای

چکیده

در این مقاله توزیع شعاعی مصرف سوخت (*Radial Burn-up*) و محصولات ناشی از شکافت و همچنین تغییرات آنها با افزایش مصرف سوخت در یک سیکل کاری راکتور در قرص سوخت راکتور VVER-1000 مورد بررسی قرار گرفته است. از کد مونت کارلو MCNPX ۲.۶ برای محاسبات ضریب تکثیر و مصرف سوخت استفاده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج بدست آمده توسط کدهای قطعی برای یک مساله استاندارد مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که از کد MCNPX می توان برای تعیین توزیع شعاعی مصرف سوخت که اهمیت بالایی در آنالیز رفتار حرارتی - مکانیکی میله سوخت، تعیین توزیع شعاعی توان، نرخ فرار محصولات شکافت گازی از سوخت و ساختار ناحیه پیرامونی قرص سوخت (*rim structure*) دارد، استفاده کرد.

کلید واژه: توزیع شعاعی Burn-up، اثر حاشیه (*rim effect*)، کد MCNPX

مقدمه

در دهه اخیر افزایش میزان مصرف سوخت برای راکتورهای آب سبک سوخت گذاری شده با UO_2 از جمله راکتور VVER-1000 به منظور کاهش میزان هزینه ی تولید برق، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. هدف از افزایش میزان مصرف سوخت، کاهش هزینه های مربوط به تجدید سوخت هسته ای در طول یک دوره ی کارکرد و به تبع آن بهبود هزینه های مربوط به تولید سوخت، ذخیره سازی در طول دوره ی کارکرد، حمل و نقل و بازیابی سوخت می باشد [۱].

تولید اقتصادی و ایمن برق هسته ای نیازمند دانش پایه ای از رفتار قرص سوخت در شرایط مختلف پایدار و گذرا می باشد. پیش بینی رفتار میله ی سوخت در راکتورهای آب سبک در مصرف سوخت بالا بسیار مشکل و پیچیده است، چراکه آنالیز مکانیکی و حرارتی قرص سوخت وابستگی شدیدی به ترکیب موادی دارند که با تغییرات میزان مصرف سوخت تغییر می کنند [۲ و ۳].

به علت تغییرات شعاعی شار نوترون و طیف انرژی آن در قرص سوخت UO_2 ، نرخ تولید ایزوتوپ های شکافت پذیر به صورت شعاعی در قرص سوخت تغییر می کند. با جذب رزونانسی نوترون در ^{238}U ، ایزوتوپ ^{239}Pu در نزدیکی حاشیه ی قرص سوخت تولید می شود که این اثر خود موجب افزایش دو تا سه برابری توان

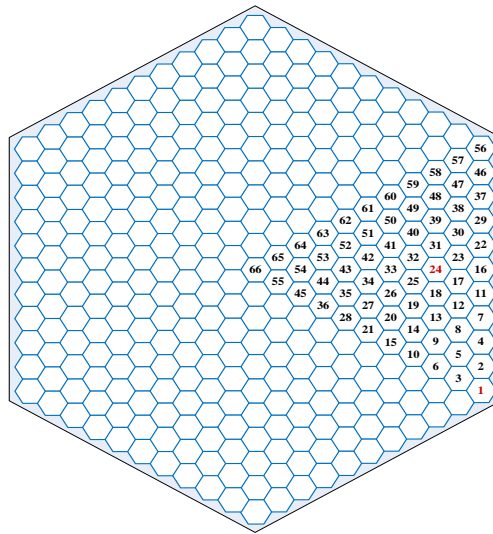
و مصرف سوخت محلی در حاشیه ی قرص سوخت با افزایش مصرف سوخت می گردد. این پدیده با عنوان اثر حاشیه (rim effect) شناخته می شود. در مصرف سوخت بالا تغییرات محلی آن در قرص سوخت اهمیت بیشتری پیدا می کند چرا که موجب افزایش ناحیه ی حاشیه ای در لبه ی قرص سوخت می گردد. با گسترش ناحیه ی حاشیه ای، رگه هایی با ضخامت $0.1-0.5 \mu\text{m}$ در قرص سوخت ایجاد شده که در نتیجه ی آن حباب های گازهای ناشی از شکافت که دارای قطر متوسط $1-2 \mu\text{m}$ می باشند، به طور یکنواخت در بین این رگه ها توزیع می شوند. بنابراین پیش گویی دقیق میزان مصرف سوخت محلی در قرص سوخت برای آنالیز اثرات نوترونیکی اثر حاشیه در کدهایی که میزان کارایی قرص سوخت را بررسی می کنند ضروری می باشد [۴].

نکته مهم دیگر در مورد ناحیه ی حاشیه ای، پایین بودن دمای آن در مقایسه با سایر نواحی قرص سوخت است. این اثر باعث شده است که مدل حاشیه به عنوان کلیدی در آنالیز مصرف سوخت بالا مورد تاکید قرار گیرد [۵]. بنابراین پیش بینی میزان غلظت پلوتونیوم و پروفایل مصرف سوخت در یک میله ی سوخت که در معرض تابش قرار دارد برای آنالیز رفتار میله سوخت در مدت زمان تابش در قلب و ذخیره سازی بعد از آن در استخر سوخت از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

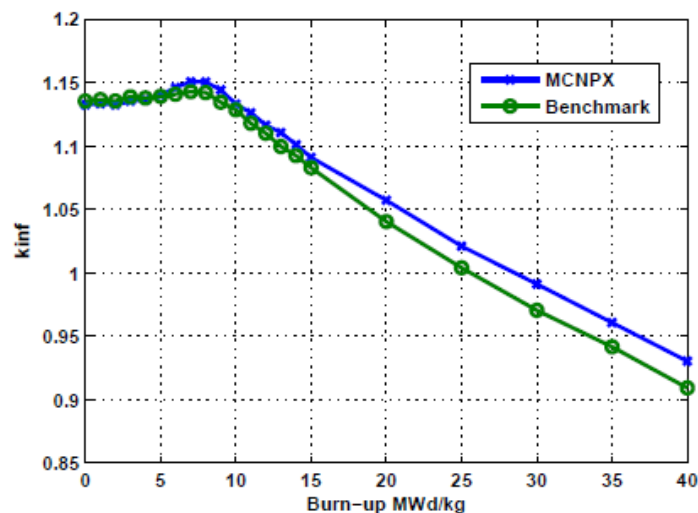
با توجه به اهمیت رفتار میله سوخت در مصرف سوخت بالا از نقطه نظر ایمنی و اقتصادی، در این مقاله به محاسبه توزیع شعاعی مصرف سوخت و محصولات ناشی از شکافت و همچنین تغییرات آنها با افزایش مصرف سوخت در یک سیکل کاری در قرص سوخت رکتور VVER-1000 توسط کد MCNPX می پردازیم.

مشخصات مساله استاندارد

برای صحت سنجی مدل و روش به کار گرفته شده در کد MCNPX برای محاسبه توزیع شعاعی مصرف سوخت و محصولات شکافت تولید شده در آن از یک مساله استاندارد استفاده می شود [۶]. این مساله شامل یک مجتمع سوخت از راکتور VVER-1000 مطابق شکل (۱) است. این مجتمع سوخت شامل ۳۳۱ سلول است که از چهار نوع مختلف تشکیل شده اند: ۳۰۰ سلول شامل میله های سوخت اورانیوم حاوی ۳/۷ درصد وزنی ^{235}U ، ۱۲ سلول شامل میله ی سوخت اورانیوم-گادولینیم (UGD) حاوی ۳/۶ درصد وزنی ^{235}U و ۴ درصد وزنی Gd_2O_3 . یک سلول مرکزی برای ورود ابزار اندازه گیری که از آب پر شده است و ۱۸ تیوپ هدایت کننده برای ورود میله های کنترل که آن ها نیز توسط آب پر شده اند. میله های سوخت در دمای 300 K و مابقی اجزاء مجتمع سوخت در دمای 575 K در نظر گرفته شده اند. در این مدل کند



شکل (۲): محل قرار گیری سلولهای ۱ و ۲۴ در مجتمع سوخت



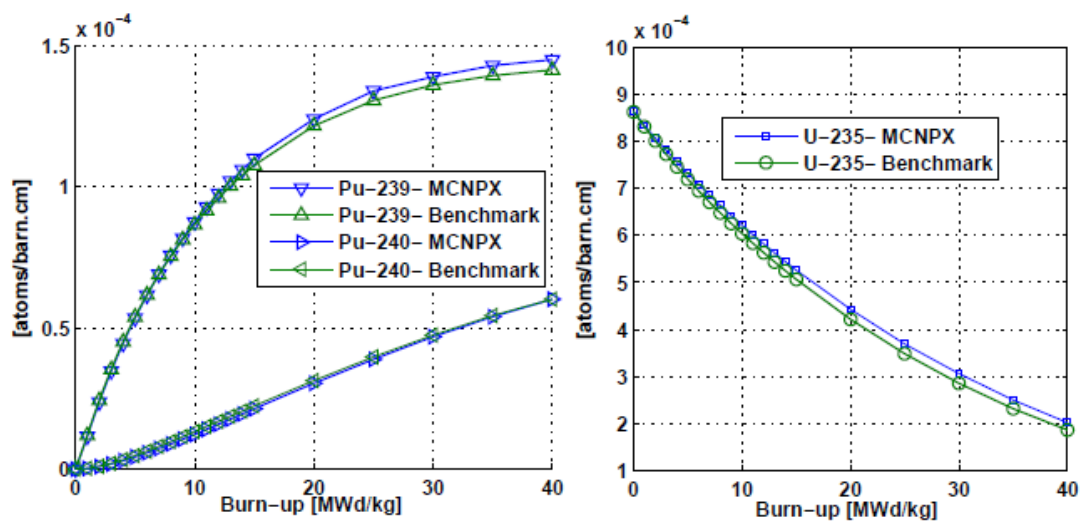
شکل (۳): تغییرات k_{inf} با مصرف سوخت

شکل (۴) تغییرات دانسیته اتمی ایزوتوپهای ^{235}U ، ^{239}Pu و ^{241}Pu را با تغییر مصرف سوخت در سلول شماره ۱ نشان می دهد. با توجه به شکل، نتایج حاصل از MCNPX و نتایج داده شده در گزارش مساله استاندارد بسیار به یکدیگر نزدیک هستند [۶]. شکل (۵) تغییرات شعاعی ^{239}Pu را در مقایسه با مقادیر مرجع نشان می دهد [۶]. با توجه به اینکه مقادیر مرجع تنها در پنج نقطه شعاعی داده شده است، برای مقایسه، نتایج MCNPX در نقاط مورد نظر میانگین گیری شده اند. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می شود ^{239}Pu به صورت غیریکنواخت در راستای شعاعی قرص سوخت تولید می شود و در نزدیکی حاشیه ی سوخت به علت اثر

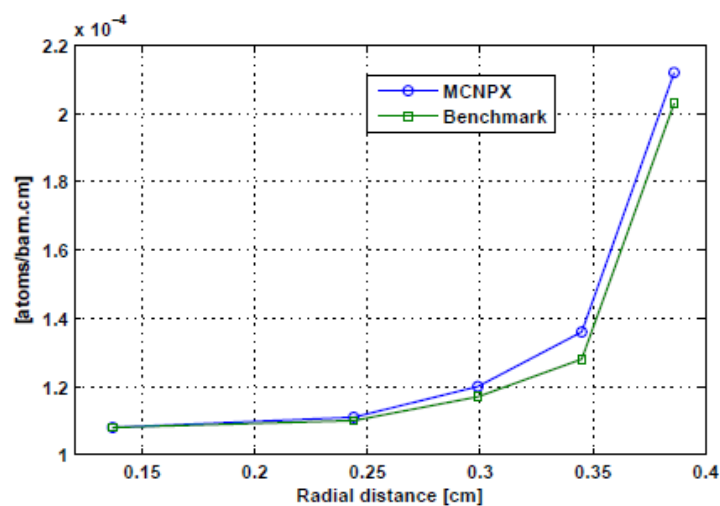
حاشیه و به دنبال آن افزایش میزان مصرف سوخت محلی، افزایش می یابد. تولید پلوتونیوم متناسب با نرخ شکافت و مصرف سوخت محلی می باشد [۱].

نتیجه گیری

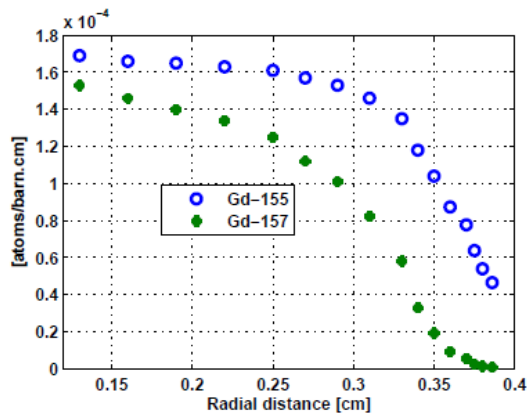
در این تحقیق از کد MCNPX برای بررسی توزیع شعاعی مصرف سوخت و اثر حاشیه در قرص سوخت راکتور VVER-1000 استفاده شد. از یک مساله استاندارد که شامل یک مجتمع سوخت UGD این راکتور



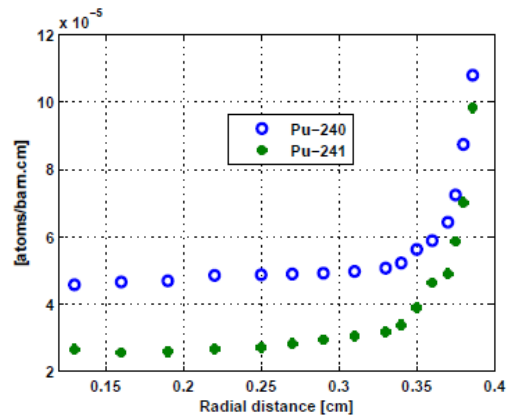
شکل (۴): تغییرات دانسیته اتمی ^{239}Pu ، ^{240}Pu و ^{235}U در سلول شماره ۱



شکل (۵): توزیع شعاعی ^{239}Pu در مصرف سوخت 40 MWd/kgHM



شکل (۷): توزیع شعاعی ^{155}Gd و ^{157}Gd در 2 MWd/kgHM



شکل (۶): توزیع شعاعی ^{240}Pu و ^{241}Pu در 40 MWd/kgHM

است برای بررسی دقت نتایج استفاده گردید. برای محاسبه توزیع شعاعی، قرص سوخت به نواحی شعاعی هم مرکز تقسیم بندی گردید (سلول ۲۴) و در هر ناحیه با در نظر گرفتن تغییرات شعاعی شار نوترون، محاسبات مصرف سوخت به طور همزمان برای سایر میله های سوخت مجتمع صورت گرفت. با توجه به دقت کد مونت کارلو MCNPX در مدلسازی هندسه دقیق قلب راکتور و همچنین کتابخانه های پیوسته سطح مقطع نوترون در آن، می توان از این کد در تعیین دقیق پروفایل شعاعی تغییرات مصرف سوخت در نواحی مختلف قلب برای بررسی رفتار حرارتی- مکانیکی قرص سوخت در شرایط پایدار و گذرا، در مصرف سوخت بالا استفاده کرد.

مراجع

- [۱] Kinoshita, et al., Temperature and fission rate effects on the rim structure formation in a UO_2 fuel with a burnup of ۷,۹% FIMA, Journal of Nuclear Materials, ۲۰۲: ۷۱-۷۸, ۱۹۹۸.
- [۲] El-Koliel, et al., Modeling of WWER-۴۴۰ fuel pin behavior at extended burn-up, Nuclear Engineering and Design, ۲۲۹: ۱۱۳-۱۱۹, ۲۰۰۴.
- [۳] Kryukov, et al., Radial distribution of the burn-up and content of plutonium in VVER fuel pellets, Atomic Energy, ۱۰۰: ۱-۷, ۲۰۰۶.
- [۴] Lee, et al., RAPID model to predict radial burnup distribution in LWR UO_2 fuel, Journal of Nuclear Materials, ۲۸۲: ۱۹۶-۲۰۴, ۲۰۰۰.
- [۵] Zhiwen X. U., Design Strategies for Optimization High Burn-up Fuel in Pressurized Water Reactor, Ph.D. Thesis, MIT, p. ۳۰۵, ۱۹۸۸.
- [۶] NEA/NSC/DOC ۱۰, A VVER-۱۰۰۰ LEU and MOX Assembly Computational Benchmark, Nuclear Energy Agency, OECD, ۲۰۰۲.