رویکردی جدید به محاسبات فرسایش سوخت راکتور VVER-1000

خزائی.آرزو*[(۱)]–متاجی کجوری.نعیم الدین[(۲)]–زارعی بیناباج.محمد[(۱)]

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده‌ی مهندسی هسته ای ، گروه راکتور

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون ، گروه پژوهشی ایمنی هسته ای و حفاظت پرتویی

چکیده :

در این مقاله سعی شده‌است با معرفی یک غنای متوسط، رویکردی ساده‌تر به فرآیند سوخت‌گذاری واقعی رآکتور VVER–1000 ارائه شود. از آن‌جایی که هدف بررسی تغییرات ماتریس سوختی در حالت تعادلی بوده است، مقدار ورودی برای کد ORIGEN را بر مبنای یک غنای متوسط تعادلی به دست آوردیم. انطباق خوب نتایج به‌دست آمده در خروجی کد ORIGEN با مقادیر ارائه شده در FSAR رآکتور بوشهر صحت روش ارائه شده را برای سوخت‌گذاری حالت تعادلی تأیید می‌کند. روند تغییرات هر ایزوتوپ در خروجی نیز مورد بررسی قرار گرفت و هم‌خوانی مناسبی بین نتایج و مقادیر گزارش شده مشاهده شد.

کلمات کلیدی:غنای متوسط، ترکیب تعادلی، VVER-1000، Burnup، ORIGEN

۱- مقدمه :

ترکیب سوخت در یک راکتور در حال کار به صورت تابعی از مکان و زمان تغییر می‌کند. در حین کارکرد راکتور مقدار موجودی بعضی هسته‌ها کاهش و بعضی دیگر افزایش می‌یابد. بر این اساس مشخصات نوترونی قلب راکتور نیز همزمان با مصرف سوخت دچار تغییراتی می شود که از آن جمله می‌توان به تغییرات توان تولیدی در قسمت‌های مختلف قلب راکتور و همچنین ضریب تکثیر موثر سیستم اشاره نمود[1,2]. میران پرتوزایی یا فعالیت[۱] هسته‌ها در زمان هنگام خروج از قلب و مسائل پسمانداری نیز به محاسبات مصرف سوخت وابسته‌اند. لذا برای تخمین طول سیکل سوخت یک راکتور، لازم است بتوان تغییرات غلظت هسته‌های موجود در قلب را به صورت تابعی از زمان پیش‌بینی نموده و میزان ایزوتوپ‌های خروجی از قلب را نیز بعد از هر سیکل تخمین زد برنیم [2]. در پایان هر سیکل کاری راکتور بخشی از سوختی که از قلب تخلیه می‌شود خروجی ازقلب، ، هم‌چنان دارای غنایی بالاتر از حد طبیعی است و ایزوتوپ‌های شکافای ارزشمندی نظیر U^{235},Pu^{239},Pu^{241} نیز در این سوخت خارج شده وجود دارد[2]. این ترکیب خروجی را می‌توان در چارچوب راهبردهای پیشنهادیِ نسل چهارم رآکتورهای هسته‌ای در بازفرآوری و تهیه‌ی سوخت راکتورهای زاینده

[۱] activity

مورد استفاده قرار داد. بر این اساس و با توجه به فرآیند سوخت‌گذاری پیچیده‌ی راکتورهای آب سبک، به‌کارگیری روندی ساده با دقت مناسب برای انجام محاسبات فرسایش سوخت راکتور حرارتی وارائه‌ی برآوردی از سوخت خروجی از قلب در این رآکتورها می‌تواند برای تخمین ترکیب ایزوتوپی سوخت مورد نیاز برای راه‌اندازی راکتور سریع نسل جدید بسیار مفید باشد[2].

در این مقاله سعی شده است با ارائه‌ی یک رویکرد مبتنی بر میانگین‌گیری، ترکیب سوختی را که بعد از چندین دوره‌ی سوخت‌گذاری برای حالت تعادلی در قلب راکتور VVER- 1000 به دست می‌آید، مشخص نماییم. این رهیافتِ کاربردی را می‌توان در ادامه برای محاسبات لازم در چرخه‌ی سوخت بسته و طراحی سوخت رآکتورهای سریع به کار بست. در قسمت نخست، راکتور مورد بررسی معرفی شده است، سپس مقدار ایزوتوپ‌های ورودی برای کد ORIGEN در حالت-های مختلف مد نظر (سیکل اول با غناهای دقیق ارائه شده در FSAR نیروگاه بوشهر، غنای متوسط سیکل اول) محاسبه شد. نتایج بدست آمده از کد ORIGEN استخراج و با داده‌های FSAR مقایسه گردید که از انطباق خوبی برخوردار بود.در ادامه غنای متوسط را برای حالت تعادلی محاسبه نموده و ترکیب ایزوتوپی بدست آمده را به عنوان ورودی کد ORIGEN تعریف نمودیم. نتایج محاسبات بعدی نیز با مقادیر گزارش شده مقایسه و دقت مناسبی مشاهده شد.

۲- معرفی قلب رآکتور بوشهر

راکتور VVER نیروگاه بو شهر دارای 163 مجتمع سوخت می‌با شد که م شخ صات این مجتمع ها برای سوخت‌گذاری سیکل اول و حالت تعادلی در جداول ذیل آمده است.

جدول شماره(۱) : مشخصات سوخت‌گذاری[3]

مشخصاتمجتمع های سوخت با غنای متوسط	سیکل اول	سیکل تعادلی
۱,٦	۵۴	
۲,٤	۶۷	
۳,٦۲	۴۲	۱۲ (۱۳)
٤,۰۲	۲۴۵ (۴,۰۱) ۶۶ (۳,۷)	۳۶
غنای متوسط سوخت جدید ٪	۲,۴۵	۳,۹۲

در هر مجتمع سوخت	۱۲	۴۲٫۸ (فرسایش کل)

در این پژوهش به جای استفاده از این روند سوخت‌گذاری پیچیده، غنای متوسطی تعریف شد که از نقطه نظر محتوای ایزوتوپ‌های خروجی و ویژگی‌های فرسایش سوختی، نتایج مشابهی با روند ارائه شده در FSAR داشته باشد

۳- روش پیشنهادی

برای بدست آوردن غنای متوسط از رابطه زیر استفاده شد، که N_i ها تعداد مجتمع های سوخت با غنای متوسط ε_i می باشد [4] :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_i N_i \varepsilon_i}{\sum_i N_i} \qquad (۱)$$

با استفاده از داده‌های جدول ۱ و داده‌های موجود در FSAR نخست با استفاده از غناهای دقیق مطرح شده برای هر مجتمع در سیکل اول، مقدار ایزوتوپ‌های ورودی را برآورد شد نمودهایم. سپس با در نظرگرفتن غنای متوسط، محاسبات انجام شد. نتایج در جدول ۲ درج شده‌است.

در محاسبه‌ی غنایε٪ ابتدا جرم متوسط عنصر اورانیوم را بدست می آوریم، سپس جرم UO_2 را محاسبه می‌کنیم:

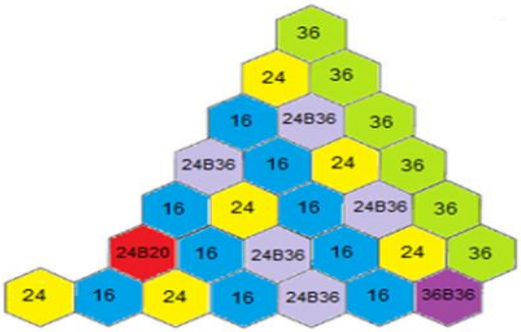
$$\frac{1}{M_U} = \frac{\varepsilon \times 0.01}{M_{U_{235}}} + \frac{(100-\varepsilon)\times 0.01}{M_{U_{238}}} \rightarrow M_U gr,\ \ M_{UO_2} gr = M_U + 2M_O \rightarrow$$

$$wf_{U235} = \varepsilon \times 0.01 \times \frac{M_U gr}{M_{UO2} gr}, wf_{U238} = \varepsilon \times (100-\varepsilon) \times 0.01 \times \frac{M_U gr}{M_{UO2} gr}, wf_O = \frac{2M_O gr}{M_{UO2} gr}$$

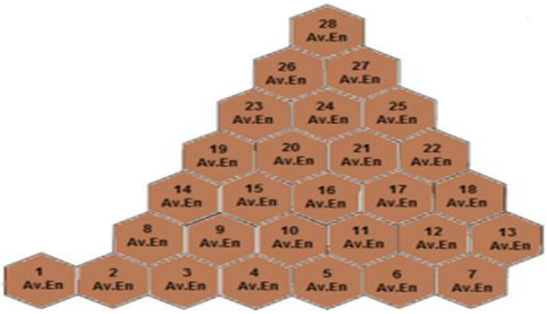
در نهایت هم درصد وزنی‌های بدست آمده را در جرم کل سوخت ورودی قلب ضرب می‌کنیم و مقدار هر ایزوتوپ را بدست می‌آوریم. نتایج این محاسبات در جدول ۲ ارائه شده است.

$$U_{235} = wf_{235} \times M_{Tcore} gr\,, \qquad U_{238} = wf_{238} \times M_{Tcore} gr, \qquad O = wf_O \times M_{Tcore} gr$$

بر این اساس، هدف اصلی معرفی قلبی با غنای معادل است که از نقطه نظر محاسبات فرسایش سوخت و موجودی ایزوتوپ‌های شکافا، رفتاری مشابه قلب رآکتور VVER-1000 داشته باشد(شکل۱و۲). نتایج محاسبات و مدل‌سازی ارائه شده در بخش‌های بعدی، صحت چنین رویکردی را تأیید می‌کند.



شکل(۱): آرایش اصلی مجتمع های سوخت [3]



شکل(۲): آرایش مجتمع های سوخت با مدل پیشنهادی

جدول(۲) : ورودی محاسبه شده برای کد ORIGEN

غنا	تعداد مجتمع‌ها	مقدار U_{235}	مقدار U_{238}	مقدار O
$\varepsilon = 1.6$	54	3.70×10^{2}Kg	22.93×10^{3}Kg	3.121×10^{3}Kg
$\varepsilon = 2.4$	67	6.89×10^{2}Kg	28.22×10^{3}Kg	3.872×10^{3}Kg
$\varepsilon = 3.62$	423.3	1.26×10^{2}Kg	3.719×10^{3}Kg	0.515×10^{3}Kg
	423.7	5.28×10^{2}Kg	13.756×10^{3}Kg	1.912×10^{3}Kg
مقدار تجمعی ایزوتوپ‌ها با روش محاسبه‌ی دقیق	163	17.13×10^{2}Kg	68.63×10^{3}Kg	9.42×10^{3}Kg
مقدار ایزوتوپ‌ها با لحاظ کردن غنای متوسط ۲,۴۵	163	17.56×10^{2}Kg	68.62×10^{3}Kg	9.42×10^{3}Kg

داده های جدول فوق را به عنوان ورودی برای کد ORIGEN تعریف نموده و ترکیب ایزوتوپی را برای هر دو حالت برای یک سیکل ۲۹۴ روزه استخراج شد نمودیم. باید توجه داشت که کد ORIGEN، یک کد فرسایش و واپاشی رادیواکتیو تک‌گروهی و مستقل از هندسه است و در این پژوهش نیز صرفا برای محاسبه فرسایش سوخت و نیز استخراج ترکیب ایزوتوپی سوخت خروجی راکتور حرارتی مورد استفاده قرار گرفت. در این کد برای راکتور های مختلفی نظیر(US-PWR, BWR, CANDU)در غناهای مختلف و مصرف سوخت‌های مختلف کتابخانه سطح مقطع سطوح مقاطع ارائه شده است[5]. برای محاسبات سیکل اول از PWRUS استفاده نمودیم و برای حالت تعادلی از کتابخانه PWRUE استفاده شد. با توجه به غناهای محاسبه شده، این کتابخانه ها بیشترین شباهت را با توجه به غناهای محاسبه شده، به راکتور VVER-1000 دارند داشتند[6] .

مقدار فر سایش سوخت در کد ORIGEN به صورت حا صل ضرب توان حرارتی (۳۰۰۰ مگاوات) در تعداد روزهای سیکل محاسبه می‌شود (۲۹۴ روز)[7] :

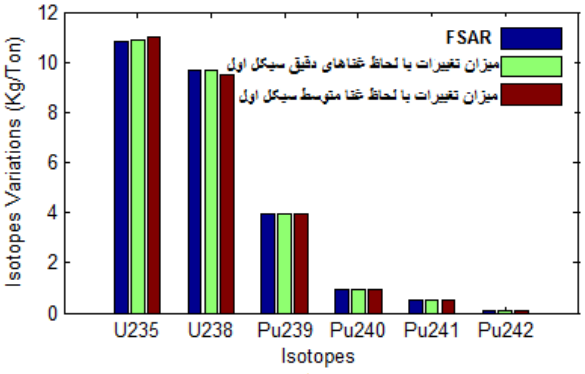
$$Bu(MWD) = P(MW) \times CycleLengh(Day)$$

$$Bu\left(\frac{MWD}{Kg}\right) = \frac{Bu(MWD)}{IsotopeMass(Kg)}, \qquad Bu\left(\frac{MWD}{Ton}\right) = \frac{Bu(MWD)}{IsotopeMass(Ton)}$$

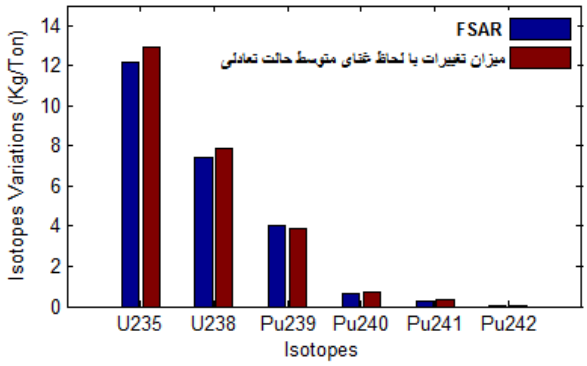
در محاسبات فرسایش سوخت کد ORIGEN ایزوتوپ‌های شکافا و شکافت پذیر را در نظر می‌گیرد[5]. میزان تغییرات ایزوتوپ‌های شکافا به ازای هر تن در هر نوع مجتمع سوخت به ازای مقادیر مختلف فرسایشدر جدول 4.3-4، FSAR آمدهاست. با استخراج نتایج محاسبات، مصرف سوخت به وسیله کد ORIGEN انجام شد و با توجه به اینکه این کد مقدار Burnup را حدود $12\ \frac{MWD}{Kg}$ محاسبه نموده است، داده‌های به دست آمده را با مقادیر فرسایش نظیر به نظیر در FSAR مقایسه شد نمودیم.

شکل ۳ انطباق خوب نتایج به دست آمده از روش غنای متوسط را با حالت استفاده از ترکیب ایزوتوپی دقیق و داده‌های FSAR نشان می‌دهد. بر این اساس، می‌توان اذعان داشت که در مدل‌سازی به‌کارگیری‌یک غنای متوسط با توجه به شرایط سوخت‌گذاری در حالت تعادلی رآکتور VVER-1000 از نقطه نظر محا سبات فر سایش سوخت، دقت منا سبی دارد. لذا، مطابق با داده‌های جدول ۱ برای حالت تعادلی که قلب راکتور VVER تک بخشی بوده و با سوخت مشابه حالت تعادلی که در FSAR آمده است، سوخت گذاری شده است. یعنی ۴۱ یا ۴۳ مجتمع دارای غنای متوسط ۳,۶۲ ٪ هستند و ۱۲۰ یا ۱۲۲ مجتمع نیز دارای غنای متوسط ۴,۰۲ ٪ هستند. با استفاده از رابطه تعیین غنای متوسط (۱) که در ابتدای محاسبات به آن اشاره شد به غنای متوسط ۳,۹ ٪ به‌دست آمدنمودیم. سپس کل قلب را با این غنا در نظر گرفته

و ترکیب ایزوتوپی اولیه را بدســـت آوردیم و به عنوان ورودی برای کد ORIGEN تعریف کردیم. همان مقدار مرجع فرســایش ســوخت 12 $\frac{MWD}{Kg}$ را برای بررســی نتایج خود در نظر گرفتیم، با توجه به اینکه غنای ۳,۹ در جدول 4-3-4 ، FSAR وجود نداشت، لذا نتایج خود را با مقادیر ارائه شده برای مجتمع با غنای ۳,۶۲ ٪ و ۴,۰۲ ٪ مقایسه کردیم ~~بررسی نمودیم~~، که نتایج انطباق خوبی را با داده‌های مربوط به غنای ۴,۰۲ ٪ داشت (شکل ۴).

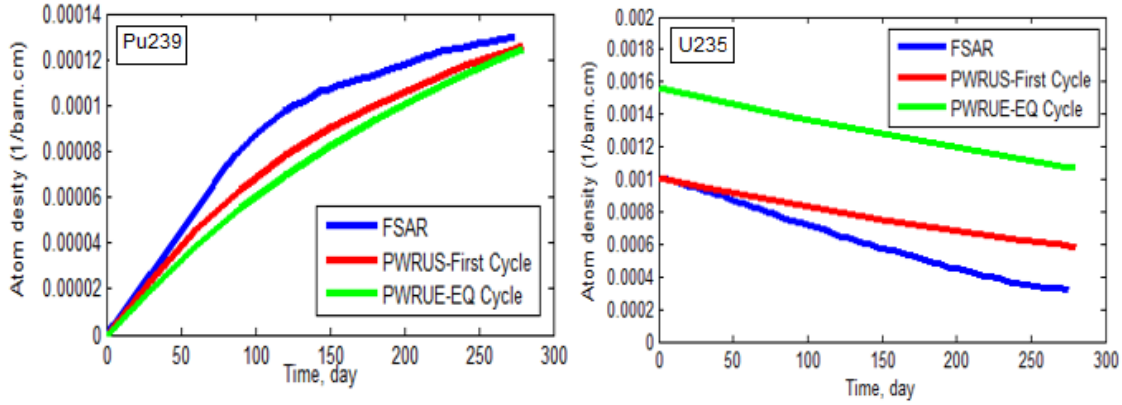


شکل(۳): تغییرات ایزوتوپ‌ها در سیکل اول



شکل(۴): تغییرات ایزوتوپ‌ها در سیکل تعادلی با غنای متوسط

چگونگی تغییرات مقدار موجودی ایزوتوپ‌های اورانیم ۲۳۵ و پلوتونیم ۲۳۹ نیز بر مبنای روش پیشـــنهادی در این مقاله با مقادیر موجود در FSAR نیز مقایســه شــده اســت که نتیجه مقایســه (شــکل‌های ۵ و ۶ را ببینید) نشــان می‌دهد نتیجه حاصل از روش پیشنهادی رفتارش مناسب است. ~~دقت مناسبی را در شکل (۵) نشان می‌دهد.~~



شکل(۵)

:مقایسه تغییرات موجودی ایزوتوپ در اثر فرسایش

نتیجه‌گیری :

با توجه به اهمیت مدیریت سوخت هسته‌ای در خارج از قلب، داشتن تخمینی صحیح از پسمان خارج شده از قلب راکتور در طول سال‌های کاری موضوع مطالعات زیادی بوده است[2]. در این میان، به‌کارگیری مدلی که بتواند میزان سوخت خروجی بعد از هر سیکل را پیش بینی نموده و برآورد مناسبی از آن ارائه دهد، ضروری است. اطلاعات در دسترس برای راکتور VVER-1000 شامل ترکیب ایزوتوپی دقیق سیکل اول و ترکیب ایزوتوپی سیکل تعادلی (تنها برای بخش ورودی، یک سوم مجتمع های قلب) است. بر این اساس، در این مقاله سعی شده است تا با ارائه‌ی رویکردی مبتنی بر متوسط‌گیری غنای ترکیب سوختی اولیه، مقادیر ایزوتوپ‌های ورودی را محاسبه نماییم. سپس با استفاده از کد ORIGEN برآوردی از ترکیب ایزوتوپی سوخت بعد از یک سیکل کاری را با در نظر گرفتن میزان فرسایش مطرح شده در FSAR بدست آوردیم. میزان و روند تغییرات ایزوتوپ‌های اورانیم و پلوتنیم با داده‌های FSAR منطبق بود که صحت مدل ارائه شده را تأیید می‌کند.

مراجع.

[1]. Ph. Oberle, C.H.M.Broeder, R.Dagan, Comparison of PWR-burup calculations with SCALE 5.0/TRITON other burnup codes and experimental results,

[2]. D. G. Cacuci, Handbook of Nuclear Engineering, Vol. 2, Springer,2010.

[3] Russian Federation Ministry of Atomic Energy, Final Safety Analysis Report of Bushehr NPP, 2003

[4]. J. R. Lamarsh, A. J.Baratta, Introduction to Nuclear Engineering, 3rd edition, 1982

[5]. A. G. CROFF, ORIGEN2: A VERSATILE COMPUTER CODE FOR CALCULATING THE NUCLIDE COMPOSITIONS AND CHARACTERISTICS OF NUCLEAR MATERIAL, Vol.62, 1983.

[6]. K. Hadad, M. Nematolahi, A. Golestani, VVER-1000 cross-section library generation for ORIGEN-II based on MCNP calculations, International Jurnal of HYDROGEN ENERGY, 2015.

[7]. A. E.Waltar, D. R.Todd, P. V.Tsvetkov, Fast Spectrum Reactors, Springer, 1981.