پیش‌بینی میزان مصرف سوخت مجتمع‌های سوخت نیروگاه هسته‌ای بوشهر با استفاده از کد DRAGON5

پایانی،امیر* [۱و۲]– متولی، سید محمد [۲]

۱-شرکت توسعه و ارتقای ایمنی نیروگاه های اتمی (توانا)

۲-دانشگاه مازندران، دانشکده علوم، پایه، گروه فیزیک هسته ای

چکیده:

یکی از مهمترین مسایلی که نیروگاه‌های هسته‌ای با آن مواجه‌اند پیش بینی میزان مصرف سوخت مجتمع های سوخت در حال کار و مصرف شده است. این پارامتر برای مجتمع های سوخت در حال کار، پارامتری اقتصادی و برای مجتمع‌های سوخت مصرف شده یک پارامتر ایمنی است. برای انجام محاسبات مصرف سوخت کدهای محاسباتی مختلفی وجود دارند. یکی از جدیدترین و قدرتمندترین این کدها، کد DRAGON5 است که در دانشگاه پلی تکنیک مونترال کانادا توسعه داده شده است.در این جا جهت راستی آزمایی کد مذکور، محاسبات مصرف سوخت مجتمع‌های سوخت نیروگاه اتمی بوشهر توسط آن انجام شده و نتایج آن با مقادیر طراحی نیروگاه بوشهر مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: *مصرف سوخت– کد DRAGON5 – مجتمع سوخت*

مقدمه :

در یک راکتور که راکتور WWER (آب سبک تحت فشار روسی) مجتمع‌های سوخت هسته‌ای معمولاً پس از چند سال قادر به تولید انرژی کافی نبوده و از قلب راکتور خارج شده و برای خنک سازی در استخر سوخت‌های مصرف شده قرار می‌گیرند. فرآیند خنک سازی معمولاً چندین سال (بین ۳ تا ۹ سال) به طول انجامیده و سپس سوخت‌های خنک شده از استخر سوخت‌های مصرف شده خارج شده و در انبار مخصوص نگهداری می‌شوند. یکی از چالش های مهم در ارتباط با سوخت هسته‌ای ،تعیین میزان مصرف سوخت است [۱ و٦]. برای اندازه‌گیری مقدار سوخت مصرف شده در راکتور لازم است پارامتر مصرف سوخت یا Fuel Burnup محاسبه شود. در واقع این پارامتر مقدار انرژی تولید شده توسط سوخت را بیان می‌کند. این کمیت برحسب واحد GW.d/ton فلز سنگین بیان می‌شود. در یک راکتور WWER که سوخت آن اورانیوم است این واحد بصورت MW.d/kgU تعریف می شود. میانگین پارامتر مصرف سوخت از حدود MW.d/kgU ۳۵ در دو دهه پیش، امروزه به بیش از MW.d /kgU ٤٥ رسیده است. سوخت های دارای مصرف سوخت بالاتر از لحاظ اقتصادی به صرفه هستند چون باعث افزایش طول سیکل کاری راکتور شده و تعداد دفعات سوخت گذاری کمتری در طول عمر راکتور نیاز دارند [۳و٦].

پیش بینی مقدار مصرف سوخت به دلایل اقتصادی و ایمنی بسیار مهم است. این پارامتر برای مجتمع های سوخت تازه و در حال کار، به لحاظ فرآیند مدیریت سوخت و انتخاب چیدمان مناسب برای قرارگیری مجتمع های سوخت در قلب حایز اهمیت است. تعیین چیدمان سوخت‌ها در قلب راکتور به نحوی صورت می گیرد که هم جنبه های ایمنی هسته‌ای مانند محدودیت‌های ضریب قله ای محوری توان (K_q) را شامل شده و هم جنبه های اقتصاد نوترونی مد نظر قرار بگیرند. از طرف دیگراین پارامتر برای مجتمع‌های سوخت مصرف شده که از قلب خارج شده‌اند و در استخر سوخت‌های مصرف شده قرار گرفته‌اند یک پارامتر ایمنی است زیرا با دانستن این پارامتر می توان زمان تقریبی برای خنک سازی سوخت را محاسبه کرده و در موقع مناسب، سوخت مصرف شده را از استخرسوخت به انبارسوخت میانی انتقال داد [٤و٦] .

معرفی کد DRAGON [۲]

کد DRAGON یک کد محاسبات سلولی و مصرف سوخت است که در دانشگاه پلی تکنیک مونترال کانادا توسعه داده شده است. این کد ابتدا برای راکتورهای نوع CANDU تهیه شد و در حال حاضر برای انواع راکتوهای آب سنگین، آب سبک و ... قابل استفاده می‌باشد.

کد DRAGON شامل مجموعه‌ای از مدل‌ها و توابع مختلفی نظیر معادلات ترابرد نوترون، درون‌یابی سطح مقطع میکروسکوپی توسط کتابخانه‌های استاندارد، محاسبات شار نوترون به صورت چند گروهی، محاسبه پارامترها براساس تعداد گروه‌های انرژی کمتر، محاسبات مصرف سوخت و ... می‌باشد که رفتار نوترون را در یک سلول سوخت و یا یک مجتمع سوخت شبیه‌سازی می‌کند.

در این کد از الگوریتم‌های مختلفی نظیر روش $J\pm$ ، روش احتمال برخورد و ... برای حل معادلات انتگرالی ترابرد نوترونها استفاده می‌شود. از جمله قابلیت‌های این کد می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- امکان توصیف هندسه‌های مختلف مانند استوانه‌ای و شش ضلعی،
- دقت بالای محاسبات در محاسبه ثوابت گروهی سوخت،
- قابلیت انجام محاسبات مصرف سوخت و پیش‌بینی تغییرات مقدار ایزوتوپ‌ها بر حسب تابعی از زمان،
- قابلیت استفاده از کتابخانه سطح مقاطع مختلف هسته‌ای مانند کتابخانه‌هایENDF, IAEA, JEFF.
- توانایی شبیه‌سازی سلول‌های سوخت به صورت دو و سه بعدی.
- سرعت اجرای بالا و توانایی استفاده از حافظه رم بالا بدلیل توانایی اجرا بر روی پردازنده‌های ٦٤ بیتی (فقط در نسخه ٥)

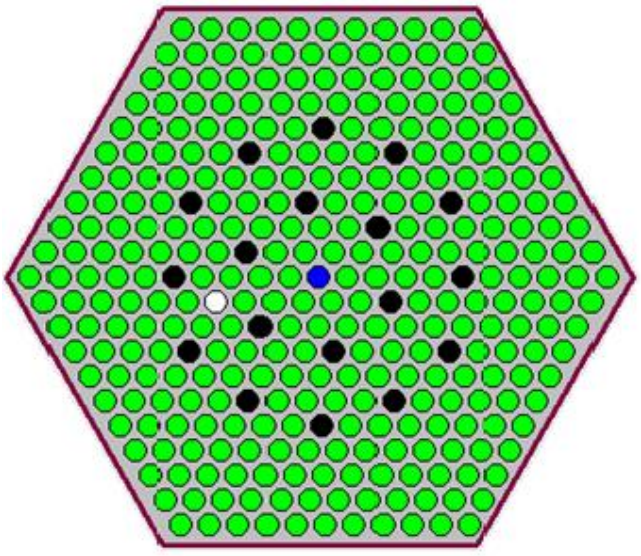
از پارامترهای مهم ورودی کد می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- شرایط فیزیکی مسئله شامل دمای سوخت و غلاف سوخت، دما و چگالی سیال خنک کننده و سایر اجزای میله و مجتمع سوخت، غلظت اسید بوریک.
- نحوهٔ قرار گرفتن سلولهای سوخت در کنار یکدیگر و شرایط مرزی،
- توان و گامهای زمانی برای محاسبات مصرف سوخت

همچنین خروجی کد شامل پارامترهای مختلفی نظیر نرخ واکنش، ضریب تکثیر، سطح مقاطع مختلف سلولی، ضرایب پخش و داده‌های فرسایش سوخت می‌باشد. در این پژوهش از آخرین نسخه کدDRAGON که نسخه ۵ آن است استفاده شده است.

مدلسازی مجتمع‌های سوخت نیروگاه هسته‌ای بوشهر با استفاده از کد DRAGON5

راکتور نیروگاه اتمی بوشهر یک راکتور قدرت ۱۰۰۰ مگاواتی از نوع WWER است که از ۱۶۳ مجتمع سوخت شش‌ضلعی تشکیل شده‌است. در سیکل اول کاری، شش نوع مجتمع سوخت با غنای مختلف از اورانیوم ۲۳۵ در قلب راکتور وجود دارد که برخی از انواع آنها دارای میله‌های کنترل و برخی دارای میله های جاذب سوختنی نیز هستند. در این مقاله بدلیل حجم محاسبات فقط نتایج مدلسازی پرکاربردترین مجتمع سوخت نیروگاه بوشهر یعنی مجتمع سوخت FA36 سوختنی ارایه شده است.



شکل ۱- مجتمع سوخت (سبز: میله سوخت، سیاه: میله کنترل یا میله جاذب سوختنی، آبی:کانال مرکزی، سفید: کانال تجهیزات اندازه‌گیری) [۱]

برای مدلسازی کلیه اطلاعات مورد نیاز برای ورودی فایل DRAGON جمع‌آوری شده و در ورودی قرارداده شده‌اند. این ورودی ها شامل مواردی هستند که در بخش قبلی به آن اشاره شد. همچنین کتابخانه سطح مقاطع هسته ای که در این جا استفاده شده ENDFB7 است. جهت انتخاب کتابخانه، چندین کتابخانه مختلف مانند ENDF, IAEA, JEF استفاده شد که بهترین نتایج با کتابخانه که بهترین نتایج با کتابخانه سطح مقاطع ENDFB7 بدست آمد [٤].

جدول ۱- مشخصات مجتمع‌های سوخت نیروگاه هسته‌ای بوشهر [۱]

نوع مجتمع سوخت	غنای متوسط	تعداد میله سوخت	تعداد میله جاذب سوختنی	بورون (gr/cm^3)
16	۱/٦	۳۱۱	–	–
24	۲/٤	۳۱۱	–	–
36	۳/٦۲	۳۱۱	–	–
40	٤/۰۲	۳۱۱	–	–
24B20	۲/٤۰	۳۱۱	۱۸	۰/۰۲۰
24B36	۲/٤۰	۳۱۱	۱۸	۰/۰۳٦
36B20	۳/٦۲	۳۱۱	۱۸	۰/۰۲۰
36B36	۳/٦۲	۳۱۱	۱۸	۰/۰۳٦

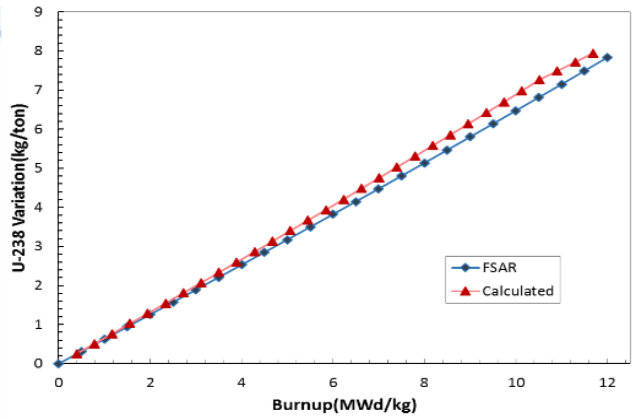
پس از مدلسازی و اجرای ورودی تولید شده برای کد DRAGON5، نتایج مصرف سوخت در گامهای زمانی از پیش تعیین شده برای تعداد زیادی از اکتنیدها و محصولات شکافت بدست آمد.

ار آنجا که هدف از این پژوهش راستی آزمایی کد DRAGON5 برای انجام محاسبات مصرف سوخت راکتور بوشهر است لازم است نتایج بدست آمده با مقادیر تجربی و یا داده‌های طراحی مقایسه شوند. با توجه به اینکه داده‌های مصرف سوخت برای چند ایزوتوپ‌های مشخص و در بازه‌های مختلف زمانی در مدرک FSAR نیروگاه اتمی بو شهر [۱] داده شده ا ست از آنها بعنوان داده‌های مرجع برای را ستی آزمایی ا ستفاده شده است. از این رو ایزوتوپ‌هایی که با داده های FSAR مقایسه شده‌اند عبارتند از :

- U-238 و U-235 ،
- Pu-239،Pu-240 ،Pu-241 و Pu-242 .

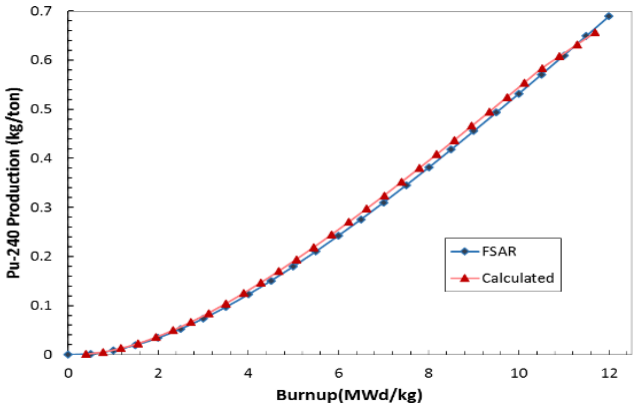
نتایج

در اینجا فقط نتایج محاسبه مصرف سوخت مجتمع سوخت FA36 که با مدلسازی توسط کد DRAGON5 بدست آمده در طول سیکل اول کاری نیروگاه (حدود ۳۰۰ روز کاری موثر) در شکل های ۲ تا ۷ ارایه شده اند و نتایج برای سایر مجتمع‌های سوخت بدلیل رفتار مشابه‌شان آورده نشده‌اند. لازم بذکر است مجتمع سوخت مذکور در حالتی مدل شده است که کانالهای هدایت آن خالی از میله کنترل و میله جاذب سوختنی بوده و در آنها آب وجود دارد.



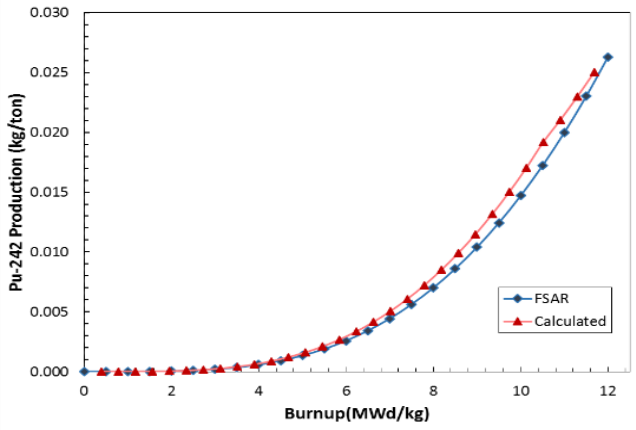
شکل۲- تغییرات U-235 برحسب مصرف سوخت

شکل۳- تغییرات U-238 برحسب مصرف سوخت



شکل٤- تولید Pu-239 برحسب مصرف سوخت

شکل۵- تولید Pu-240 برحسب مصرف سوخت



شکل٦- تولید Pu-241 برحسب مصرف سوخت

شکل۷- تولید Pu-242 برحسب مصرف سوخت

نتیجه گیری

- نتایج مصرف سوخت ایزوتوپ های اورانیوم نسبت به نتایج مشابه برای ایزوتوپهای پلوتونیم دارای دقت بالاتری هستند.
- حداکثر و میانگین خطای نسبی در نتایج مصرف سوخت ایزوتوپ های اورانیوم بترتیب ٦ و٣ درصد و در نتایج مصرف سوخت ایزوتوپ های پلوتونیم بترتیب ١٥ و٨ درصد است.
- هرچه میزان روز کارکرد یا میزان مصرف سوخت افزایش می‌یابد میزان خطای نسبی افزایش می‌یابد.
- با جمع بندی موارد مذکور، کد DRAGON5 را می‌توان گزینه مناسبی جهت انجام محاسبات مصرف سوخت به حساب آورد.

مراجع

[١] ZAO ASE, Final Safety Analysis Report of Bushehr NPP Unit1,Chapter4,2007.

[٢] Marleau ,G, Roy, R," User Guide For Dragon Version4", Institut De G´Enie Nucl´Eaire D´Epartement De G´Enie M´Ecanique´Ecole Polytechnique De Montr´Eal, 2013.

[٣] Rowayda F. et al , "Burn-up credit in criticality safety of PWR spent fuel", Nuclear Engineering and Design, 280 (2014) 628–633.

[٤] José J. Herrero et al ,"Review calculations for the OECD/NEA Burn-up Credit Criticality Safety Benchmark", Annals of Nuclear Energy, **87** (2016) 48–57.

[٥] Hadad,K., Yousefnia,M. ,"Burn-up and Neutronic Analysis of VVER-1000 Nuclear Reactor", Proceedings of 2010 LWR Fuel Performance, Orlando, Florida, USA, September 26-29, 2010.

[٦] IAEA-TECDOC-1547, "Advances In Applications Of Burnup Credit To Enhance Spent Fuel Transportation, Storage, Reprocessing And Disposition", IAEA, VIENNA, 2007.