



محاسبه ضریب تبدیل جریان آشکارسازهای خود توان به نرخ گرمای خطی در راکتورهای WWER-1000

جلیلی بهابادی، محمد حسن* - خواجه‌وند، نوراله - پایانی، امیر - حسن‌زاده، رضا - ارتجایی، محمد محسن.

شرکت توسعه و ارتقای ایمنی نیروگاه‌های اتمی (توانا)

چکیده:

یکی از مهمترین پارامترهای ایمنی در قلب راکتور، گرمای خطی آزاد شده (QI) است که عبور از مقدار مجاز آن توقف سریع راکتور را بدنبال خواهد داشت. از این رو محاسبه دقیق QI با استفاده از جریان SPND نقش مهمی در ایمنی راکتور دارد. در پژوهش حاضر ضریب تبدیل جریان SPND به QI در شرایط پایا و برای یک مجتمع سوخت تازه ۲/۴٪ با دو روش مختلف محاسبه شده است. در روش اول کل محاسبات توسط کد MCNPX2.6 و در روش دوم محاسبات آبشار الکترون و فوتون توسط کد MCNPX2.6 و محاسبات فیزیک نوترونی توسط کد سلولی DRAGON5 صورت گرفته است. همچنین با استفاده از روش دوم، ضرایب تبدیل مذکور در برنامه‌های مختلف محاسبه شده است. مقایسه نتایج فوق با نتایج مرجع دقت مناسب روش‌های مذکور را تایید می‌کند.

کلمات کلیدی: SPND، ضریب تبدیل، تابع تبدیل، QI

مقدمه:

محاسبه توزیع شار و توان در قلب راکتور WWER-1000 توسط کد Hortitsa-M [۱-۲]، بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری شده آشکارسازهای خودتوان (SPND) می‌باشد. در این کد، با استفاده از محاسبات مش ریز و درشت، توان نوترونی مجتمع‌های سوخت فاقد SPND درون‌یابی و محاسبه می‌شود. از اینرو، بیان صحیح داده‌های SPND بالاخص توابع تبدیل جریان SPND به گرمای خطی آزاد شده (QI)، نقشی اساسی در محاسبه توزیع QI و بدنبال آن پارامترهای توان محوری (Kv) و شعاعی (Kq) راکتور دارد. سیستم پایش درون قلب برای یک راکتور WWER1000 شامل قسمتهای اساسی زیر است: ۱- مبدل‌های اندازه‌گیری، ۲- خطوط ارتباطی، ۳- تجهیزات اندازه‌گیری- اطلاعاتی سطح پایین، ۴- مجموعه کامپیوتری سطح بالا (نمایشگرها) و ۵- نرم‌افزار تخصصی (ICIS-M و Hortitsa-M). مبدل‌های اندازه‌گیری سیستم پایش درون قلب شامل SPND و حسگرهای دمایی برای پایش دمای خنک‌کننده است. این مبدل‌ها در کانال اندازه‌گیری دما و نوترون قرار گرفته‌اند که این کانال از بالای راکتور وارد مجتمع سوخت می‌شود (NTMC). هر کانال اندازه‌گیری در جهت محوری از هفت SPND تشکیل شده است. تعداد کل NTMCها در راکتورهای WWER-1000 از نوع V-446، ۵۴ عدد است. بنابراین در مجموع ۳۷۸ عدد SPND به صورت یکنواخت در حجم موثر قلب توزیع شده است.



برای محاسبه QI یک میله سوخت لازم است مقدار میانگین این پارامتر در شش میله سوخت اطراف SPND مورد نظر تعیین شود. بدین منظور ابتدا تابع تبدیل جریان SPND به QI میانگین مذکور در هر مجتمع سوخت دارای SPND محاسبه می‌شود.

محاسبات تابع تبدیل به چهار بخش مستقل تقسیم می‌شود [۳]: ۱- محاسبه آبشار الکترون و فوتون SPND (در این مرحله جریان SPND به ازای جذب نوترون در هر منطقه استوانه‌ای رودیومی بصورت مستقل از نوع مجتمع سوخت و مصرف رودیوم محاسبه می‌شود). ۲- محاسبه فعال‌سازی رودیوم SPND در طیف واقعی هر مجتمع سوخت راکتور (بدون در نظر گرفتن مصرف رودیوم). ۳- تخمین تابع تبدیل جریان SPND به QI در شرایط مختلف کاری و در برناپ‌های مختلف مجتمع سوخت و ۴- تخمین برناپ امیتر SPND.

آبشار الکترون- فوتونی SPND با استفاده از کدهای محاسبات مونت کارلو نظیر MCNP محاسبه می‌شود. محاسبات فیزیک نوترونی فعال‌سازی رودیوم و توان متوسط میله‌های سوخت اطراف SPND، توسط کدهای سلولی نظیر DRAGON5 برای هر مجتمع سوخت و با در نظر گرفتن تمام شرایط برناپ انجام می‌شود.

تابع تبدیل جریان SPND به QI با محاسبه ضرایب تبدیل در شرایط مختلف کاری (شامل چگالی خنک‌کننده، غلظت اسید بوریک، مکان SPND و مکان میله‌های کنترل و جاذب سوختنی) و در برناپ‌های مختلف به دست می‌آید. در این مقاله ضریب تبدیل جریان SPND به QI در شرایط پایا و در یک مجتمع سوخت تازه با غنای $2/4\%$ به دو روش مختلف انجام شده است. در روش اول کل محاسبات آبشار الکترون و فوتون SPND و محاسبات نوترونی توسط کد MCNPX2.6 و در روش دوم محاسبه آبشار الکترون و فوتون SPND توسط کد MCNPX2.6 و محاسبات نوترونی توسط کد DRAGON5 انجام شده است.

نتایج حالت‌های فوق با یکدیگر و همچنین با نتایج مرجع [۴] مقایسه شده است. در مرجع [۴] محاسبه آبشار الکترون و فوتون SPND توسط کد MCNPX2.6 و محاسبات نوترونی توسط کد TVS-M انجام شده است. در ادامه ضریب تبدیل جریان SPND به QI برای برناپ‌های مختلف مجتمع سوخت با غنای $2/4\%$ توسط کدهای MCNPX2.6 و DRAGON5 محاسبه می‌شود.

روش کار :

یک SPND شامل امیتر، عایق، کلکتور، سیستم ارتباطی و پوشش است. در نتیجه گیراندازی یک نوترون توسط ایزوتوپ $^{103}_{45}Rh$ ، هسته برانگیخته $^{104m}_{45}Rh$ تولید می‌شود. بلافاصله بعد از جذب نوترون، پرتو گاما منتشر می‌شود. در نتیجه فعل و انفعالات فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج پرتو گامای گسیلی و مواد SPND، الکترون تولید می‌شود. بخش اعظم



هسته برانگیخته به حالت پایه $^{104}_{45}Rh$ با نیمه عمر $43/2$ ثانیه و 7 تا 8 در صد هسته برانگیخته به حالت ناپایدار $^{104m}_{45}Rh$ با نیمه عمر $4/34$ دقیقه تبدیل می‌شود. واپاشی بتا $^{104}_{45}Rh$ از طریق دو کانال انجام می‌شود: با احتمال $99/55$ درصد، هسته پایدار $^{104}_{46}Pd$ شکل می‌گیرد:



با احتمال $0/45$ درصد، واپاشی پوزیترون رخ می‌دهد. در نتیجه این واپاشی هسته پایدار روتنیوم $^{104}_{44}Ru$ حاصل می‌شود:



هسته ناپایدار $^{104m}_{45}Rh$ با احتمال $99/87\%$ با انتشار پرتو گاما به حالت پایدار می‌رسد و با احتمال $0/13\%$ با واپاشی بتا به $^{104}_{46}Pd$ تبدیل می‌شود. عایق در SPND، کلکتور را از امیتر جدا می‌کند. عایق باید مقاومت الکتریکی زیادی در ضخامت محدود را فراهم کند و نباید ذرات باردار زیادی که در خواندن SPND اختلال ایجاد می‌کنند، را گسیل کند. الکترون‌های اصابت کرده در عایق می‌توانند در آن جذب شوند. در این حالت، عایق حجم زیادی از بار منفی به دست می‌آورد. این میدان الکتریکی بر حرکت الکترون‌های گسیل شده از امیتر اثر می‌گذارد. در مرجع [۴] اثر بار حجمی بر سیگنال خروجی SPND به صورت نظری تحلیل شده است و نشان داده شده که یک سطح بحرانی، عایق را به دو قسمت تقسیم می‌کند. وجود عایق بین امیتر و کلکتور موجب می‌شود عایق مانند یک مخزن الکترونی (خازن) عمل کند. پس از گذشت زمان محدودی، به دلیل ساختار عایق، بار الکتریکی در داخل آن انباشته می‌شود که به آن فضای بار می‌گویند. هنگامی که میدان الکتریکی فضای بار به اندازه‌ی کافی قوی شد، پتانسیل الکتریکی در یک نقطه از عایق ماکزیمم می‌شود. در این مکان، میدان الکتریکی صفر شده و جهت آن تغییر می‌کند. این مکان را سطح بحرانی می‌نامیم. الکترونهایی که در منطقه نزدیک به امیتر جذب می‌شوند به سمت امیتر و الکترونهایی که در منطقه نزدیک به کلکتور جذب می‌شوند به سمت کلکتور تخلیه می‌شوند. بنابراین الکترونهایی که از سطح بحرانی عبور می‌کنند در ایجاد جریان الکتریکی نقش دارند. از رابطه زیر شعاع بحرانی در یک عایق استوانه‌ای به دست می‌آید [۴].

$$r_c = r_2 \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}{2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}} \quad (3)$$

در اینجا r_1 و r_2 به ترتیب شعاع داخلی و خارجی عایق است. در مرجع [۵] نشان داده شد که در هندسه استوانه‌ای از 44 تا 66 درصد بار جذب شده در عایق، در رژیم تعادلی، به امیتر تخلیه می‌شود.

برای محاسبه احتمال انتشار الکترون‌ها از لایه‌های مختلف امیتر رودیومی که از واپاشی بتا ناشی می‌شود، مساله ترابرد الکترون‌ها به منطقه مشخصی در اطراف سیم رودیومی حل می‌شود. در این مرحله، امیتر به چندین ناحیه تقسیم بندی می‌شود سپس هر کدام از این نواحی به صورت یک چشمه الکترونی خارجی در نظر گرفته می‌شود و مساله ترابرد



الکترون با منبع الکترونی خارجی (توزیع شده در فضا و انرژی) توسط کدهایی نظیر MCNPX2.6 حل می‌شود. با محاسبه جریان خالص الکترون‌ها در سطح بحرانی، $P_{\beta,act}(r)$ به دست می‌آید. در اینجا $P_{\beta,act}(r)$ احتمال تولید الکترون در سیم رودیومی است که از واپاشی بتا ناشی می‌شود و در تولید سیگنال SPND سهم دارد. در حال حاضر موارد شناخته شده زیر در جریان کامل SPND رودیومی محاسبه می‌شوند (برای SPND با سیم رودیومی به قطر ۰/۴۸ میلی‌متر و عایق اکسید کوارتز) [۴]: ۱- جزء تاخیری رودیومی مربوط به فعالسازی هسته‌های $^{103}_{45}Rh$ توسط نوترون و انتشار بتا (تقریباً ۰/۹۴٪). ۲- جزء آنی رودیومی مربوط به جذب پرتوزا هسته $^{103}_{45}Rh$ و انتشار پرتو گاما که در فعل و انفعال با مواد SPND منجر به تشکیل الکترون‌ها و پوزیترون‌ها می‌شود (تقریباً ۰/۳۰۵٪). ۳- جزء آنی ناشی از فوتون‌های راکتور (تقریباً ۰/۱۰۵٪). ۴- جزء فوتونی تاخیری، انتشار یافته توسط محصولات شکافت (تقریباً ۰/۱٪) و ۵- جریان پس‌زمینه خطوط ارتباطی (این جریان به صورت سخت‌افزاری کم می‌شود). اگر $P_{\gamma,act}(r)$ احتمال گسیل الکترون از فعل و انفعالات گاما با مواد SPND باشد. جریان SPND از رابطه زیر به دست می‌آید [۴].

$$J = e_e \int_0^{\infty} \int_0^R \varphi(r, E) P_{tot}(r) \Sigma_{act}(r, E) 2\pi r dr dE = e_e \cdot \sum_{i=1}^{10} RR(i) \cdot P_{tot}(i) \cdot v(i)$$

$$= e_e \cdot \sum_{i=1}^{10} \Sigma_{act}(i) \cdot \varphi(i) \cdot P_{tot}(i) \cdot v(i)$$

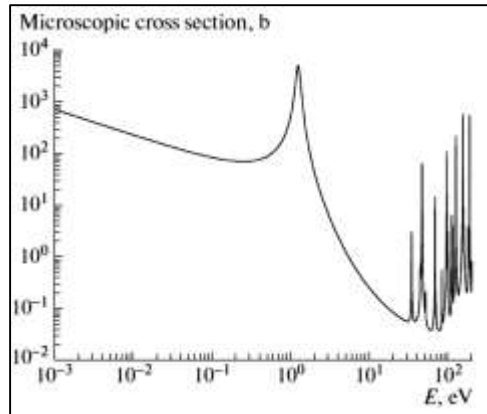
(۴)

که در آن $\varphi(r, E)$ شار نوترون در انرژی E ، شعاع r امیتر SPND، $\Sigma_{act}(r, E)$ سطح مقطع جذب در امیتر، i شماره لایه امیتر، $RR(i)$ نرخ واکنش جذب در منطقه i ام امیتر و

$$P_{tot} = P_{\beta,act} + P_{\gamma,act}$$

(۵)

می‌باشد. رابطه ۴ نشان می‌دهد که برای محاسبه جریان SPND لازم است نرخ واکنش جذب پرتوزای نوترون توسط هسته $^{103}_{45}Rh$ به دست آید. سطح مقطع واکنش جذب پرتوزای نوترون و هسته $^{103}_{45}Rh$ در شکل شماره (۱) نشان داده می‌شود.



شکل شماره (۱) سطح مقطع جذب پرتوزای نوترون در $^{103}_{45}Rh$ [۴]

در منحنی سطح مقطع، یک رزونانس عریض حول انرژی ۱ eV مشاهده می‌شود. از اینرو در طول شعاع سیم رودیومی به دلیل تراز انرژی- فضایی یک توزیع غیریکنواخت نرخ جذب را شاهدیم. به همین دلیل برای شبیه‌سازی فرآیندهای هسته‌ای در SPND، سیم رودیومی باید به ده ناحیه با حجم مساوی تقسیم شود. ضریب تبدیل SPND به صورت نسبت توان متوسط میله‌های سوخت اطراف SPND و جریان تولید شده در امیتر تعریف می‌شود [۴]:

$$S = \frac{q}{j} MW / \mu A \quad (6)$$

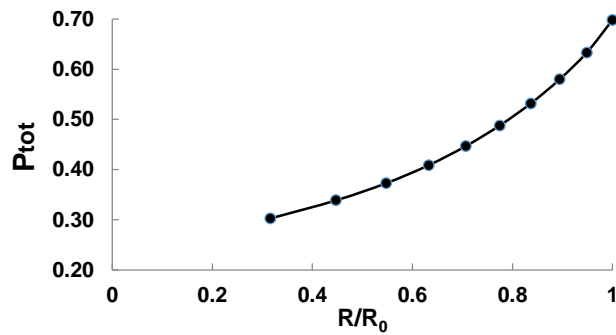
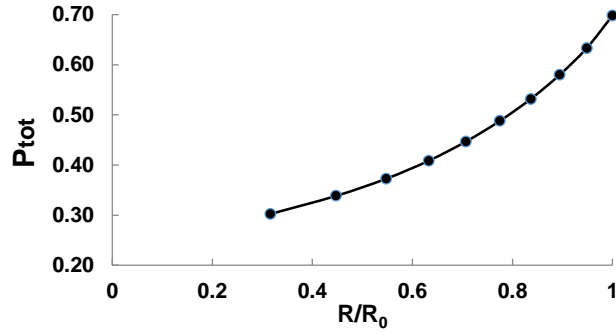
با تولید پالادیوم در نتیجه سوختن امیتر، واکنش ذرات بتا با امیتر به سختی دستخوش تغییر می‌شود بنابراین می‌توان توزیع احتمال گسیل الکترون از امیتر SPND را از قبل با کدهای محاسباتی نظیر MCNPX2.6 محاسبه کرد. در شکل شماره (۲) مدل شبیه‌سازی شده SPND توسط کد MCNPX2.6 برای محاسبه P_{tot} نشان داده شده است.

همانگونه که اشاره شد ۹۴٪ جریان SPND مربوط به جریان تاخیری و ۶٪ مربوط به جز آنی است بنابراین برای محاسبه P_{tot} می‌توان جریان تاخیری ناشی از جذب یک نوترون ($P_{\beta,act}$) را محاسبه کرد و بر ۰/۹۴ تقسیم نمود

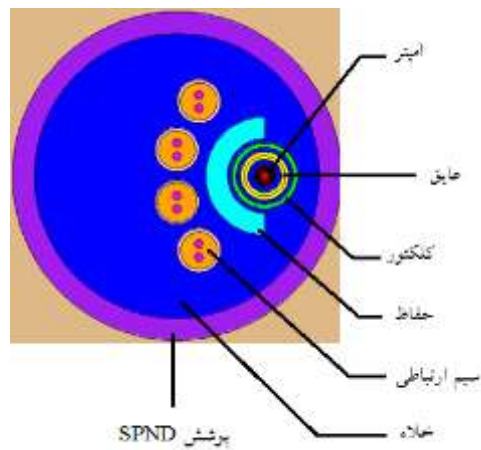
$$(P_{tot} = \frac{P_{\beta,act}}{0.94})$$

در این بخش یک SPND به قطر امیتر ۰/۴۸۱ mm مطابق مشخصات جدول ۱ شبیه‌سازی شد. امیتر رودیومی به ۱۰

ناحیه تقسیم‌بندی شده و هر ناحیه به عنوان یک چشمه بتازا با طیف واپاشی بتای $^{104}_{45}Rh$ در نظر گرفته شد. جریان نوترون بر روی شعاع بحرانی، معادل $P_{\beta,act}$ است که با تقسیم آن بر ۰/۹۴، P_{tot} به دست می‌آید. با جای‌گذاری شعاع داخلی و خارجی عایق در رابطه ۳، شعاع بحرانی برابر ۰/۴۶۳۷۱ mm به دست می‌آید.



شکل شماره (۳) نمودار P_{tot} نسبت به مناطق ده‌گانه آمیتر نشان داده شده است.

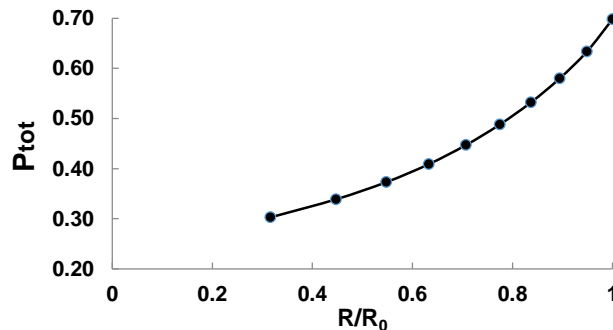


شکل شماره (۲) مدل شبیه‌سازی شده SPND توسط کد MCNPX2.6

برای محاسبه جریان SPND و پس از آن ضریب تبدیل، علاوه بر محاسبه P_{tot} در ده منطقه امیتر نیاز است نرخ جذب نوترون در این نواحی محاسبه و در رابطه ۴ و سپس ۶ جایگذاری شود. به همین منظور SPND و متعلقات آن در درون یک مجتمع سوخت مدلسازی می‌شود و نرخ جذب نوترون در ۱۰ ناحیه امیتر به دست می‌آید. در این مقاله این مدلسازی توسط دو کد MCNPX2.6 و DRAGON5 انجام و با هم مقایسه شد. در شکل ۴ مدل شبیه‌سازی شده SPND درون مجتمع سوخت توسط کد MCNPX2.6 مشاهده می‌شود.

جدول شماره (۱) مشخصات SPND با سیم رودیومی به قطر mm ۰/۴۸۱

مقدار	پارامتر	اجزای SPND
۰/۴۸۱	قطر، mm	امیتر
رودیوم	ماده	
۲۴۶/۶ - ۲۴۶/۷	طول، mm	
۰/۵۵۶۵ - ۰/۵۵۷۲	جرم، g	عایق
۱/۱ ± ۰/۰۱	قطر خارجی، mm	
SiO_2	ماده	
۰/۱۶۵ - ۰/۱۷۰	ضخامت، mm	
۲/۲۲	چگالی، $\frac{g}{cm^3}$	



شکل شماره (۳) P_{tot} به دست آمده از شبیه‌سازی MCNPX

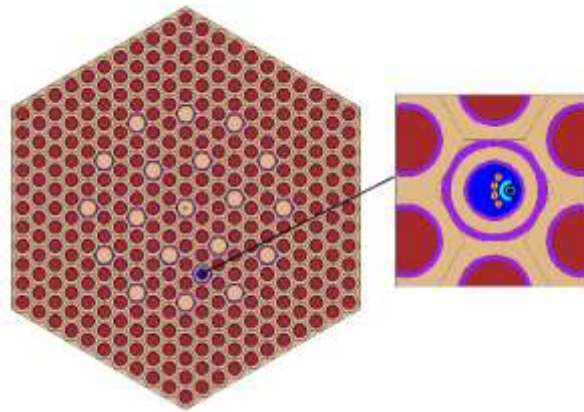


برای محاسبه ضریب تبدیل یک نوع مجتمع سوخت WWER-1000 توسط کد DRAGON5، SPND بصورت یک آمیتر رودیومی که در مرکز سلول قرار گرفته و به ده ناحیه با حجم‌های یکسان تقسیم می‌شود مدل می‌شود. اطراف آمیتر یک ناحیه استوانه‌ای از جنس عایق SPND قرار دارد. همچنین سیم‌های ارتباطی SPND نیز به صورت استوانه‌ای شامل دایره‌های هم محور معادل تعداد سیم‌های اطراف SPND مدلسازی می‌شود. مدل SPND باید در کانال اندازه‌گیری مجتمع سوخت قرار گیرد.

پس از اجرای کد DRAGON5 ضریب تبدیل (نسبت $\frac{q}{j}$) در هر نقطه برناپ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{q}{j} = \frac{167.2 \times 10^{-6} \times K_c}{\frac{e_e}{H_e} \times \sum_{i=1}^{10} RR_i \cdot P_{tot}(i) \cdot v(i)} \quad (7)$$

در رابطه فوق $v(i)$ حجم هر یک از نواحی ۱۰ گانه آمیتر، e_e بار یک الکترون، H_e ارتفاع آمیتر، RR_i نرخ واکنش جذب در ناحیه i ام آمیتر و $P_{tot}(i)$ احتمال گسیل الکترون از هر جذب نوترون در ناحیه i ام آمیتر و $\frac{MW}{cm}$ 167.2×10^{-6} متوسط توان خطی مجتمع سوخت یک راکتور WWER-1000 است. با محاسبات م صرف سوخت توسط کد DRAGON5 و همچنین نرخ جذب نوترون در هر نقطه برناپ، ضریب تبدیل در برناپ‌های مختلف به دست می‌آید.



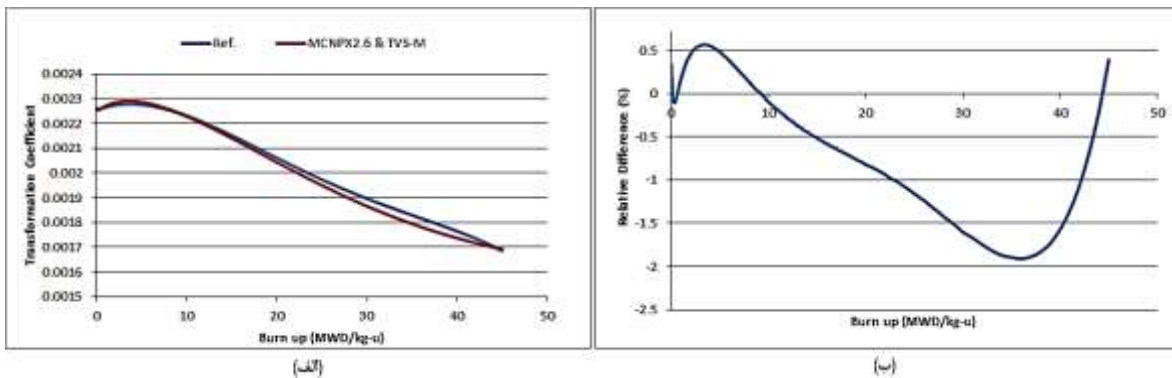
شکل شماره (۴) شبیه‌سازی SPND درون یک مجتمع سوخت

نتایج:

ضریب تبدیل SPND برای مجتمع سوخت تازه با غنای ۲/۴٪ راکتور WWER-1000 از دو روش متفاوت (۱- مدل‌سازی آبشار الکترون و فوتون SPND و محاسبات نوترونی توسط کد MCNPX2.6 و ۲- مدل‌سازی آبشار الکترون و فوتون SPND توسط کد MCNPX2.6 و محاسبات نوترونی توسط کد سلولی DRAGON5) محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین با محاسبات برناپ مجتمع سوخت ۲/۴٪ توسط کد DRAGON5، ضرایب تبدیل SPND در برناپ‌های مختلف محاسبه شده و با نتایج مرجع [۴] مقایسه شد (شکل ۵).

جدول شماره (۲) نتایج محاسبات ضریب تبدیل SPND برای مجتمع سوخت تازه ۲/۴٪

نوع مدل‌سازی	ضریب تبدیل
مرجع [۴]	۰/۰۰۲۲۵۴۶
مدل‌سازی آبشار الکترون و فوتون SPND و محاسبات نوترونی توسط کد MCNPX2.6 (درصد اختلاف نسبی با مرجع [۴])	(۰/۲۸) ۰/۰۰۲۲۶۰۹
مدل‌سازی آبشار الکترون و فوتون SPND توسط کد MCNPX2.6 و محاسبات نوترونی توسط کد سلولی DRAGON5 (درصد اختلاف نسبی با مرجع [۴])	(۰/۲۹) ۰/۰۰۲۲۶۱۲



شکل شماره (۵): الف: نمودار ضریب تبدیل SPND نسبت به برناپ برای مجتمع سوخت با غنای ۲/۴٪

ب: درصد اختلاف نسبی ضرایب تبدیل به دست آمده در مقاله حاضر با مرجع [۴]



بحث و نتیجه گیری :

در این مقاله ضریب تبدیل SPND برای سوخت تازه از دو روش به دست آمده است: ۱-مدلسازی آبشار الکترون و فوتون و محاسبات نوترونی توسط کد MCNPX2.6 ۲- مدلسازی آبشار الکترون و فوتون توسط کد MCNPX2.6 و محاسبات نوترونی توسط کد DRAGON5. مقایسه نتایج مدلسازی مذکور نشان می‌دهد محاسبات نوترونی توسط کد DRAGON5 از دقت مناسبی برخوردار است (درصد اختلاف نسبی مدل ۱ نسبت به مدل ۲ برابر ۰/۰۱۳- است) و این کد با توجه به سرعت بسیار بالای آن نسبت به کد MCNPX در محاسبات برناپ و شرایط مختلف کاری SPND مقرون به صرفه است. مقایسه نتایج ضرایب تبدیل به دست آمده توسط ترکیب دو کد MCNPX2.6 و DRAGON5 در برناپ‌های مختلف و مرجع [۴]، دقت مناسب محاسبات این پژوهش (حداکثر اختلاف نسبی ۱/۹۱-٪) را به اثبات می‌رساند.

مراجع :

- 1- Certificate on State Registration of Computer Program No. 2009612729 (2009).
- 2- A. E. Kalinushkin, V. I. Mitin, Yu. M. Semchenkov, et al., VANT, Ser. Fiz. Yad. Reakt. No. 3, 3 (2009).
- 3- A. Yu. Kurchenkov, A. Yu., Burnup of Rhodium SPND in VVER_1000: Method for Determination of Linear Energy Release by SPND Readings, Physics of Atomic Nuclei, 2011, Vol. 74, No. 14, pp. 1884–1890.
- 4- Development and release of Report on «Calculation of neutron-physical constants by ISIS and SPND sensitivity coefficients for the 3 fuel cycle of the Bushehr NPP unit 1 Revision 1, No. 110.10-50/1-53-116, 2016.