



بررسی تاثیر غلظت گادولینیوم بر راکتیویته اضافی قلب و فاکتور بیشینه قدرت شعاعی و محوری در یک راکتور هسته‌ای SMR با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

شاهمیرزایی، عالمه^(۱) - انصاری‌فر، غلامرضا*^(۱) - کرانیانی، علی^(۱)

۱. دانشگاه اصفهان، دانشکده فیزیک، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

در این مقاله به بررسی اثر تغییر غلظت اکسید گادولینیوم در ترکیب سوخت یک راکتور هسته‌ای SMR بر پارامترهای نوترونیکی نظیر راکتیویته اضافی قلب و فاکتور بیشینه قدرت شعاعی و محوری پرداخته شده است. با شبیه‌سازی قلب یک راکتور SMR از نوع NuScale در غلظت‌های متفاوت به وسیله کدهای محاسبات نوترونیکی WIMS & CITATION مشخص شد که تغییر غلظت گادولینیوم بر راکتیویته اضافی قلب و فاکتور بیشینه قدرت محوری تاثیر کمی داشته اما با افزایش گادولینیوم موجود در سوخت نسبت به راکتور واقعی، فاکتور بیشینه قدرت شعاعی افزایش می‌یابد. با کاهش غلظت تا یک مقدار مشخص، این پارامتر کاهش یافت ولی با صفر شدن مقدار گادولینیوم این فاکتور افزایش چشم‌گیر داشت. تاثیر غلظت گادولینیوم بر پارامترهای نوترونیکی موردنظر، با توجه به پیچیدگی آن‌ها توسط یک شبکه عصبی پایدار و مناسب مدل‌سازی شد. از نتیجه این پژوهش می‌توان در بهینه‌سازی مقدار گادولینیوم موجود در ترکیب سوخت قلب یک راکتور استفاده نمود.

کلمات کلیدی: تحلیل نوترونیکی، راکتور SMR، راکتیویته اضافی، فاکتور بیشینه قدرت شعاعی، شبکه عصبی.

مقدمه:

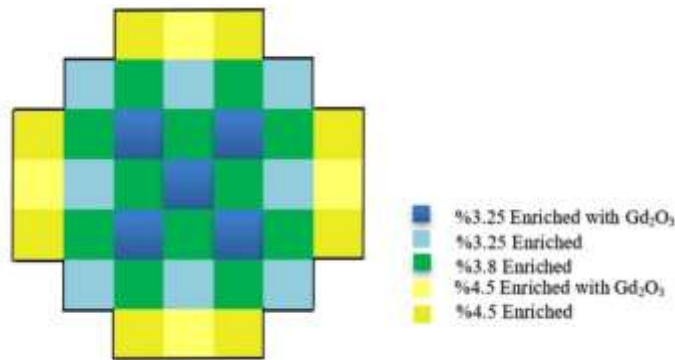
یک موضوع مهم در مبحث ایمنی راکتورهای هسته‌ای، فاکتور بیشینه قدرت است [۱]. در پژوهش‌های بسیاری به این موضوع با روش‌های متفاوتی پرداخته شده است. برای به دست آوردن قلب در حالت بهینه، بهینه‌سازی بر پایه‌ی کاهش فاکتور بیشینه قدرت کل، شعاعی و محوری و افزایش ضریب تکثیر موثر انجام می‌شود [۲]. ما باید شار قلب را یکنواخت کرده و فاکتور بیشینه قدرت شعاعی را کاهش دهیم [۳]. در برخی مقالات [۴، ۵] بهینه‌سازی قلب بر پایه‌ی کمینه‌کردن فاکتور بیشینه قدرت شعاعی انجام شده است. فاکتور بیشینه قدرت شعاعی با کدها و نرم‌افزارهای متفاوتی محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است از جمله در یک پژوهش، فاکتور بیشینه قدرت شعاعی قلب به کمک توزیع توان که خروجی کد CITATION بود، به دست آمد [۶]. بهینه‌سازی ابتدای سیکل اول یک راکتور PWR با استفاده از فاکتور بیشینه توزیع قدرت شعاعی و مقدار مصرف سوخت در مقاله‌ی دیگری [۷] انجام شد. در این مقاله به بررسی فاکتور بیشینه قدرت



شعاعی و محوری و راکتیویته اضافی قلب یک راکتور SMR از نوع NuScale با تغییر در غلظت گادولینیوم موجود در سوخت (که ترکیبی از اورانیوم دی‌اکسید و اکسید گادولینیوم است) پرداخته شد. این تحقیق در راستای فعالیت‌های تحقیقاتی سازمان انرژی اتمی ایران می‌باشد.

روش کار :

در این مقاله ابتدا مجتمع‌های سوخت قلب راکتور SMR مورد نظر در کد نوترونیکی WIMS به صورت جداگانه در حالت Cold & Clean شبیه‌سازی شدند. این کد یک ابراز محاسبات یقینی است که برای محاسبه توزیع شار نوترون به کار می‌رود. این برنامه از یک بانک داده شامل داده‌های ایزوتوپی و توصیف سلول راکتور تشکیل می‌شود و معادله‌ی ترابرد نوترون را در ناحیه‌ی مورد نظر حل می‌کند. سپس سطح مقطع‌های ایجاد شده از کد WIMS را برای هر یک از مجتمع‌ها، به عنوان ورودی برای کد محاسباتی CITATION در نظر گرفته شد و کل قلب راکتور مورد نظر در این کد شبیه‌سازی گردید. کد CITATION معادله چندگروهی پخش نوترون را با روش تفاضل محدود حل می‌کند. با اجرای این کد، ضریب تکثیر موثر برای قلب راکتور در حالت Cold & Clean به دست آمد و با استفاده از فرمول $\rho_{excess} = (K_{eff} - 1)/K_{eff}$ راکتیویته اضافی قلب محاسبه شد.



شکل (۱) چیدمان مجتمع‌های سوخت در قلب اول NuScale

در ادامه با تغییر در غلظت گادولینیوم در مجتمع‌های سوخت دارای گادولینیوم، شبیه‌سازی انجام شده در حالت Cold & Clean تکرار شد و ضریب تکثیر موثر قلب و راکتیویته اضافی آن در غلظت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. غلظت گادولینیوم در راکتور NuScale در دو گروه از میله‌های سوخت در هر مجتمع با غنای گادولینیوم ۴٪ و ۶٪ است که غلظت گادولینیوم در بازه ۰٪ تا ۱۲٪ مورد تحلیل واقع شد.

^۲Transport Equation



پس از بررسی حالت Cold & Clean و به دست آوردن راکتیویته اضافی، قلب راکتور در حالت Full Power در غلظت‌های مورد نظر شبیه‌سازی شد و توزیع توان قلب در این حالت از خروجی کد CITATION برای هر غلظت از گادولینیوم دریافت شد، با بررسی توزیع توان در مش‌های مدل‌سازی شده، فاکتور بیشینه قدرت محوری و شعاعی در هر یک از غلظت‌ها به دست آمد. با توجه به مقادیر به دست آمده در هر یک از مش‌ها، نقشه‌ی فاکتور بیشینه قدرت شعاعی در هر غلظت از گادولینیوم رسم شد و یکنواختی توزیع توان قلب در حالت‌های مختلف مقایسه شد.

پارامترهای به دست آمده در هریک از حالت‌های شبیه‌سازی شده در یک شبکه عصبی مصنوعی در نرم‌افزار متلب آوارد شد به گونه‌ای که ضریب تغییر غلظت گادولینیوم به عنوان ورودی و پارامترهای فاکتور بیشینه قدرت شعاعی و محوری و راکتیویته اضافی قلب به عنوان خروجی شبکه عصبی در نظر گرفته شدند. پس از اجرای نرم‌افزار، برای اعتبارسنجی شبکه عصبی مصنوعی ایجاد شده یک غلظت خاص از گادولینیوم که در شبیه‌سازی‌های قبلی انجام شده بررسی نشده بود به عنوان ورودی به شبکه داده شد و خروجی‌های مربوط به آن از نرم‌افزار دریافت شد. سپس غلظت مورد نظر در کدهای نوترونیک یاد شده شبیه‌سازی گردید و پارامترهای به دست آمده از آن با خروجی شبکه مقایسه شد به این صورت اعتبارسنجی شبکه انجام شد و خطای شبکه به دست آمد.

نتایج :

با شبیه‌سازی حالت Cold & Clean ضریب تکثیر موثر و راکتیویته اضافی قلب برای غلظت‌های مختلف اکسید گادولینیوم به دست آمد و پس از آن در مدل سازی Full Power قلب، با توجه توزیع توان حاصل شده فاکتور بیشینه قدرت شعاعی و محوری در هر حالت استخراج شد (جدول ۲).

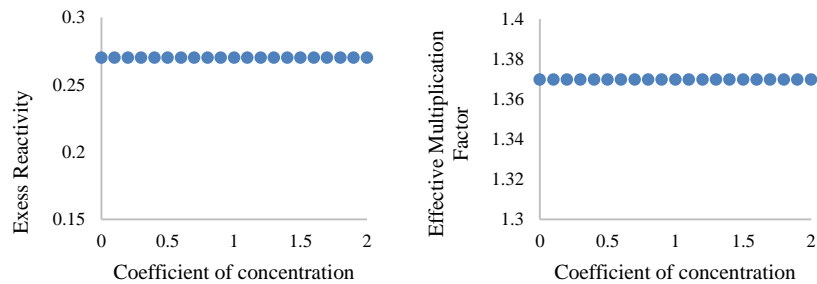
جدول (۱) پارامترهای نوترونیکی برای غلظت‌های متفاوت گادولینیا (Gd_2O_3)

PPF _{axial}	PPF _{radial}	P_{excess}	K	ضریب تغییر غلظت گادولینیا
۱/۴۰۹۵۴۸	۱/۵۳۳۹۲۶	۰/۲۶۹۹۸۴	۱/۳۶۹۸۳۴	۲
۱/۴۰۰۶۳۳	۱/۵۹۳۵۱۷	۰/۲۶۹۹۸۴	۱/۳۶۹۸۳۴	۱/۹
۱/۴۰۰۱۰۲	۱/۵۹۱۷۵۵	۰/۲۶۹۹۸۴	۱/۳۶۹۸۳۴	۱/۸
۱/۴۰۱۰۰۵	۱/۵۸۸۳۱۵	۰/۲۶۹۹۸۴	۱/۳۶۹۸۳۴	۱/۷
۱/۴۰۰۷۸۷	۱/۵۸۸۳۱۶	۰/۲۶۹۹۸۴	۱/۳۶۹۸۳۴	۱/۶
۱/۴۰۰۳۵۰	۱/۵۸۳۶۶۵	۰/۲۶۹۹۸۵	۱/۳۶۹۸۳۵	۱/۵



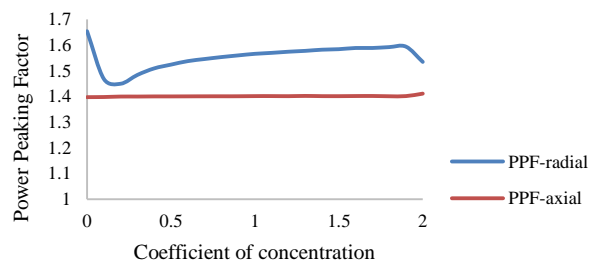
۱/۴۰۰۴۴۰	۱/۵۸۱۶۶۸	۰/۲۶۹۹۸۵	۱/۳۶۹۸۳۵	۱/۴
۱/۴۰۱۲۲۸	۱/۵۷۷۱۱۸	۰/۲۶۹۹۸۵	۱/۳۶۹۸۳۵	۱/۳
۱/۴۰۰۲۷۹	۱/۵۷۳۷۶۱	۰/۲۶۹۹۸۵	۱/۳۶۹۸۳۵	۱/۲
۱/۴۰۰۶۳۴	۱/۵۶۹۲۲۴	۰/۲۶۹۹۸۵	۱/۳۶۹۸۳۵	۱/۱
۱/۴۰۰۵۵۹	۱/۵۶۵۴۹۱	۰/۲۶۹۹۸۵	۱/۳۶۹۸۳۵	۱
۱/۳۹۹۹۶۶	۱/۵۵۹۳۴	۰/۲۶۹۹۸۶	۱/۳۶۹۸۳۶	۰/۹
۱/۳۹۹۸۷۵	۱/۵۵۲۷۸	۰/۲۶۹۹۸۶	۱/۳۶۹۸۳۶	۰/۸
۱/۳۹۹۸۵۳	۱/۵۴۵۱۷۵	۰/۲۶۹۹۸۶	۱/۳۶۹۸۳۶	۰/۷
۱/۳۹۹۵۹۷	۱/۵۳۷۰۳۲	۰/۲۶۹۹۸۶	۱/۳۶۹۸۳۶	۰/۶
۱/۳۹۹۴۳	۱/۵۲۳۳۹۴	۰/۲۶۹۹۸۶	۱/۳۶۹۸۳۵	۰/۵
۱/۳۹۹۳۵۰	۱/۵۰۸۷۰۱	۰/۲۶۹۹۸۶	۱/۳۶۹۸۳۶	۰/۴
۱/۳۹۸۸۸۹	۱/۴۸۳۱۱۴	۰/۲۶۹۹۸۶	۱/۳۶۹۸۳۵	۰/۳
۱/۳۹۸۹۲۵	۱/۴۴۸۷۱۸	۰/۲۶۹۹۸۶	۱/۳۶۹۸۳۶	۰/۲
۱/۳۹۷۰۹۳	۱/۴۶۷۴۵۱	۰/۲۶۹۹۸۶	۱/۳۶۹۸۳۶	۰/۱
۱/۳۹۶۵۴۱	۱/۶۵۳۷۲۳	۰/۲۶۹۹۸۶	۱/۳۶۹۸۳۷	۰

همانطور که از داده‌های به دست آمده مشخص است، ضریب تکثیر موثر در حالت Cold & Clean در غلظت‌های مختلف گادولینیوم تقریباً ثابت است و این به آن دلیل است که در حالت مذکور مقدار گادولینیوم موجود در ترکیب سوخت به صورت تهی در نظر گرفته شد. تهی فرض شدن گادولینیوم در ترکیب سوخت به منظور به دست آمدن راکتیویته اضافی قلب می‌باشد. راکتیویته اضافی قلب نیز از ضریب تکثیر موثر به دست آمد که این پارامتر نیز در حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده تقریباً ثابت به دست آمد.



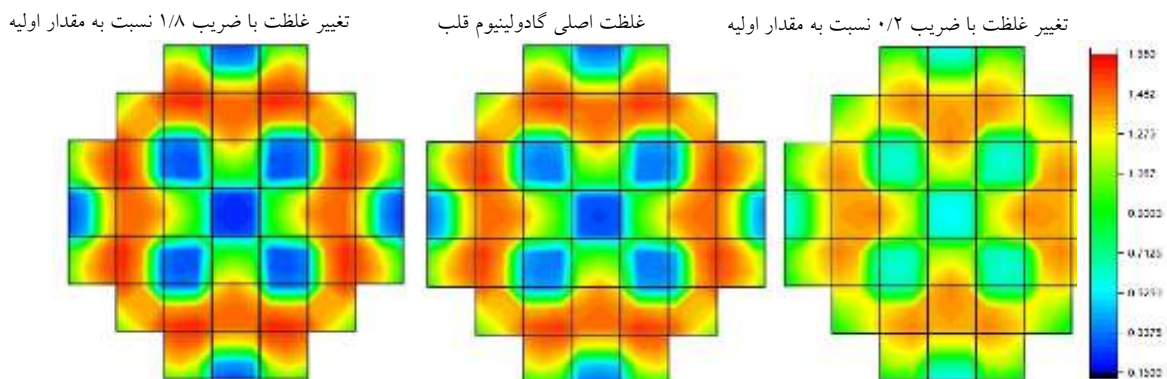
شکل (۲) ضریب تکثیر موثر و راکتیویته اضافی قلب در غلظت‌های مختلف گادولینیوم

تغییرات فاکتور بیشینه قدرت شعاعی و محوری را در نمودار زیر مشاهده می‌کنید:



شکل (۳) نمودار فاکتور بیشینه قدرت شعاعی و محوری در غلظت‌های گادولینیوم مختلف

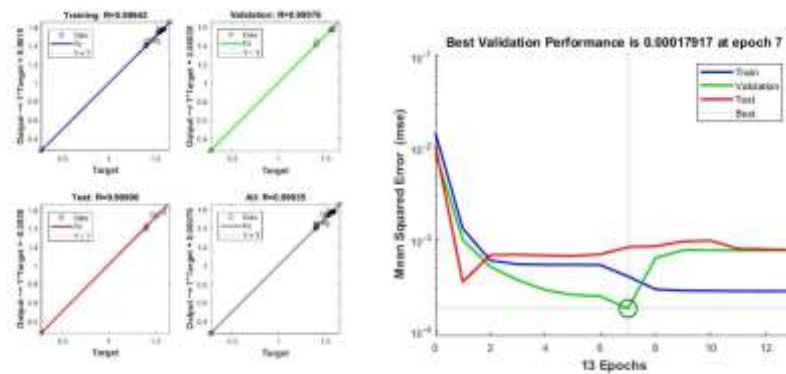
با توجه به نمودار، (شکل ۳) فاکتور بیشینه قدرت محوری با تغییر در غلظت گادولینیوم موجود در ترکیب سوخت، تقریباً ثابت ماند. تغییرات فاکتور بیشینه قدرت شعاعی، با کم شدن غلظت نسبت به راکتور اولیه تا مقدار کاهش غلظت ۸۰٪ (یعنی مقدار گادولینیوم اولیه در ضریب ۰/۲ ضرب شود) کاهش می‌یابد. اما پس از آن با صفر شدن مقدار گادولینیوم، افزایش چشم‌گیری داشت. افزایش غلظت نسبت به حالت اولیه باعث افزایش فاکتور شعاعی بیشینه قدرت گردید. نقشه فاکتور بیشینه قدرت شعاعی در قلب راکتور را با چند غلظت متفاوت مشاهده می‌کنید (شکل ۴).



شکل (۴) نقشه فاکتور بیشینه قدرت شعاعی در چند غلظت گادولینیوم متفاوت

همانطور که در شکل مشخص است، توزیع توان در حالتی که غلظت گادولینیوم در ضریب ۰/۲ ضرب شده است کاملاً یکنواخت تر از حالت‌های دیگر است.

پس از بررسی داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی، به کمک نرم‌افزار متلب شبکه عصبی مصنوعی مربوط به داده‌ها ایجاد شد که ورودی آن، ضریب تغییر غلظت گادولینیوم و خروجی، فاکتور بیشینه قدرت شعاعی و محوری و راکتیویته اضافی قلب در نظر گرفته شد.



شکل (۵) نمودارهای مربوط به شبکه عصبی مصنوعی

همانطور که در نمودارها (شکل ۵) مشخص است، شبکه عصبی ایجاد شده با دقت بالایی بر داده‌های موجود، منطبق شده است. برای اعتبارسنجی این شبکه طبق روش ذکر شده در قسمت قبل انجام شد.

جدول (۲) اعتبارسنجی شبکه عصبی

۱/۲۵			ضریب تغییر غلظت گادولینیوم
Axial PPF	Radial PPF	ρ_{excess}	پارامترهای موردنظر
۱/۴۰۱۰	۱/۵۶۹۲	۰/۲۶۷۱	شبکه عصبی
۱/۴۰۱۲	۱/۵۷۵۹	۰/۲۶۶۵	شبیه‌سازی
٪۰/۰۲	٪۰/۴۳	٪۰/۲۳	خطای شبکه

در این جدول (جدول ۲) مشخص است که خطای این شبکه عصبی ایجاد شده، کمتر از ۱٪ بوده و از دقت بسیار بالایی برخوردار است. با این شرایط می‌توان هر غلظت دلخواه از گادولینیوم را به شبکه داده و پارامترهای مربوط به آن را به راحتی از شبکه به دست آورد.

بحث و نتیجه گیری :



از محاسبات انجام شده و داده‌ها به دست آمده از این مقاله می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در غلظت گادولینیوم موجود در سوخت قلب راکتور بر فاکتور بیشینه قدرت شعاعی تاثیر قابل ملاحظه‌ای دارد اما در راکتیویته اضافی و فاکتور محوری بیشینه قدرت تاثیر چندانی ندارد. با توجه به بررسی انجام شده بر فاکتور بیشینه قدرت شعاعی مشخص شد که کاهش ۸۰ درصدی در غلظت گادولینیوم نسبت به حالت واقعی، کمترین مقدار برای این پارامتر را نتیجه می‌دهد و توزیع قدرت در یکنواخت‌ترین حالت خود است.

مراجع :

1. El-Wakil, M.M., *Nuclear heat transport*. 1971: International Textbook Company New York.
2. Tayefi, S. and A. Pazirandeh, *Using Hopfield neural network to optimize fuel rod loading patterns in VVER/1000 reactor by applying axial variation of enrichment distribution*. Applied Soft Computing, 2014. **21**: p. 501-508.
3. Tayefi, S. and A. Pazirandeh, *Evaluation of applying axial variation of enrichment distribution method and radial variation of enrichment distribution in VVER/1000 reactor using a Hopfield neural network to optimize fuel management*. Progress in Nuclear Energy, 2013. **64**: p. 47-53.
4. Hosseini, M. and N. Vosoughi, *Development of a VVER-1000 core loading pattern optimization program based on perturbation theory*. Annals of Nuclear Energy, 2012. **39**(¹): p. 35-41.
5. Driscoll, M.J., T.J. Downar, and E.E. Pilat, *The linear reactivity model for nuclear fuel management*. 1990: American Nuclear Society La Grange Park, Illinois.
6. Zaidabadi, M., G. Ansarifar, and M. Esteki, *Thermal hydraulic analysis of VVER-1000 nuclear reactor with dual-cooled annular fuel using $K-\omega$ SST Turbulence model*. Annals of Nuclear Energy, 2017. **101**: p. 118-127.
۷. Turinsky, P. and G. Hobson, *Automatic determination of PWR core loading patterns that maximize beginning of cycle reactivity within power peaking and burn up constraints*. Nucl. Tech, 1986. **74**: p. 5.