



ارزیابی تاثیر غنای سوخت بر پارامترهای ترموهیدرولیکی قلب یک راکتور هسته‌ای VVER-1000 با استفاده از تحلیل کانال داغ و مدل‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی

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

دانشگاه اصفهان، دانشکده فیزیک، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

در این مقاله به بررسی تاثیر تغییر غنای سوخت بر پارامترهای ترموهیدرولیکی قلب یک راکتور VVER-1000 به کمک تحلیل کانال داغ قلب این راکتور پرداخته شده است. با مدل‌سازی سلول معادل کانال داغ قلب در هر غنای سوخت در نرم‌افزار Design Modeler و مش‌بندی آن در Ansys Meshing این هندسه مش‌بندی شده در نرم‌افزار Ansys Fluent مورد تحلیل ترموهیدرولیکی واقع شد. تاثیر تغییر غنای سوخت بر پارامترهای ترموهیدرولیکی به کمک یک شبکه عصبی مصنوعی مدل‌سازی گردید. از نتیجه‌ی این پژوهش می‌توان در بهینه‌سازی غنای سوخت در قلب راکتور استفاده کرد.

کلمات کلیدی: تحلیل ترموهیدرولیکی، غنای سوخت، ضریب انتقال حرارت جابجایی، افت فشار، MDNBR

مقدمه:

در این پژوهش، یک راکتور VVER-1000 مورد تحلیل ترموهیدرولیکی قرار گرفت. توان حرارتی تولیدی در قلب راکتور، در شرایط نامی 3000 MWth و فشار مدار اولیه خنک‌کننده 15.7 MPa است که در شرایط کاری راکتور سبب می‌شود آب به صورت مایع متراکم باقی بماند و از دو فازی شدن جریان جلوگیری شود. مدار اولیه توسط چهار سیکل خنک‌کننده در مجموع با دبی جرمی $84800 \text{ m}^3/\text{h}$ ، وظیفه برداشت حرارت از قلب راکتور را بر عهده دارد. میله‌های سوخت به کمک شبکه نگهدارنده در یک شبکه مثلی قرار دارند. این شبکه علاوه بر مزیت‌های مکانیکی (حفظ فواصل میله‌ها، سهولت جابجایی و جلوگیری از ارتعاش)، سبب اختلاط جریان و افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد [۱]. ضریب انتقال حرارت فاکتور مهمی در راکتورهای قدرت هسته‌ای بوده و با افزایش آن برداشت حرارت از قلب راکتور، افزایش یافته و توان حرارتی تولیدی راکتور زیاد می‌شود [۲]. فاکتور کمترین انحراف از جوشش هسته‌ای (MDNBR) و افت فشار در ارتفاع قلب از جمله فاکتورهای ایمنی در هر راکتور قدرت هسته‌ای هستند [۳]. در طراحی یک راکتور، مکان و مقدار DNB هر دو حائز اهمیت هستند. مکان DNB، اندازه‌ی محلی شار حرارتی را تعریف می‌کند [۴].

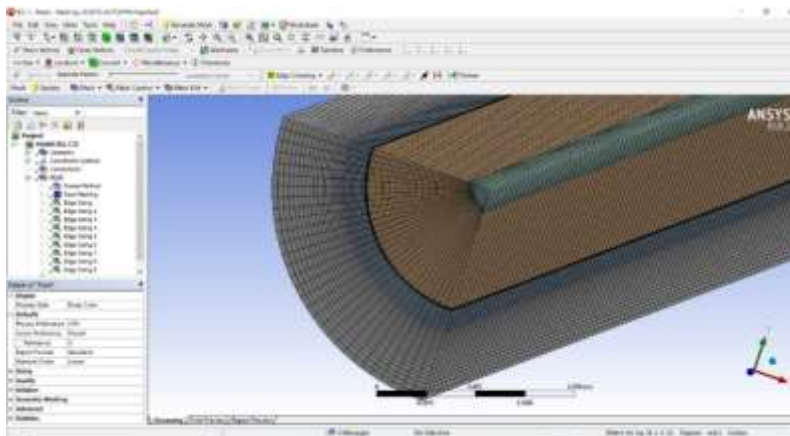
¹ Spacer grid

² Heat transfer coefficient

در یک پژوهش بر روی نیروگاه بوشهر، با تغییر سوخت نیروگاه به سوخت حلقوی و همچنین تغییر سیال خنک کننده به نانوسیال برای انتقال حرارت بهتر به برر سی راکتور بوشهر که از نوع VVER-1000 است پرداخته است [۵]. در کار دیگری به برر سی ترموهیدرولیکی نیروگاه بوشهر با تغییر نوع سوخت به سوخت حلقوی با خنک شونده‌گی از داخل و خارج (dual-cooled annular fuel) با استفاده از مدل $(K-\omega \text{ SST}^* \text{ Turbulence})$ پرداخته است [۶]. این تحقیق در راستای فعالیت های تحقیقاتی سازمان انرژی اتمی ایران می باشد.

روش کار :

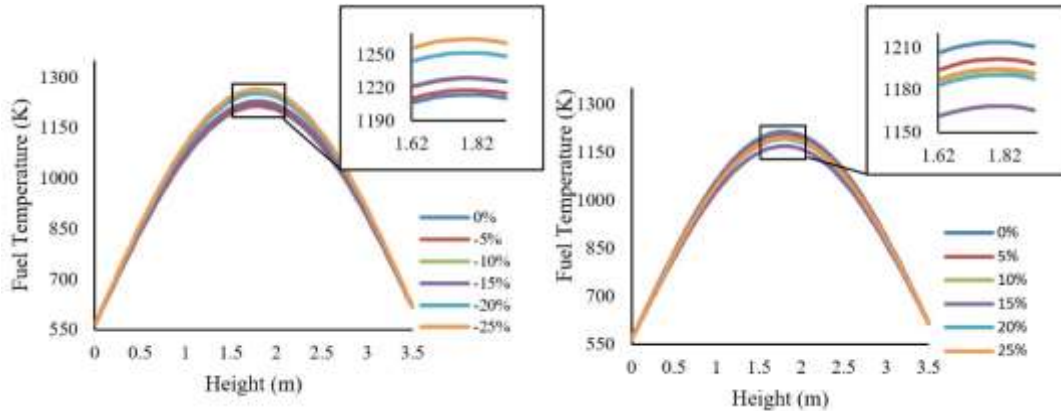
در این پژوهش به بررسی تاثیر تغییر غنای سوخت بر پارامترهای ترموهیدرولیکی از جمله پارامترهای ضریب انتقال حرارت جابجایی (h)، کمترین انحراف از نسبت جوشش هسته‌ای (MDNBR) و افت فشار در ارتفاع قلب (ΔP) در کانال داغ یک راکتور VVER-1000 پرداخته شد. برای این کار ابتدا در پژوهش دیگری تحلیل نوترونیکی این راکتور با تغییر غنای سوخت انجام شد [۷]. از تحلیل نوترونیکی مذکور محل کانال داغ موجود در قلب و همچنین مقدار شار حرارتی تولیدی آن مشخص گردید. با مشخص بودن کانال داغ، هندسه‌ی یک چهارم سلول معادل این کانال در نرم افزار ANSYS در ماژول Design Modeler طراحی گردید. سپس هندسه‌ی طراحی شده به عنوان ورودی برای Ansys Meshing تعریف شد و هندسه مربوطه در این نرم افزار مش بندی گردید (شکل ۱). هندسه‌ی مش بندی شده وارد نرم افزار Ansys Fluent شد و با ورود شار حرارتی مربوط به کانال داغ و شرایط مرزی مسئله، تحلیل ترموهیدرولیکی مورد نظر انجام شد.



شکل (۱) مش بندی هندسه طراحی شده در Ansys Meshing

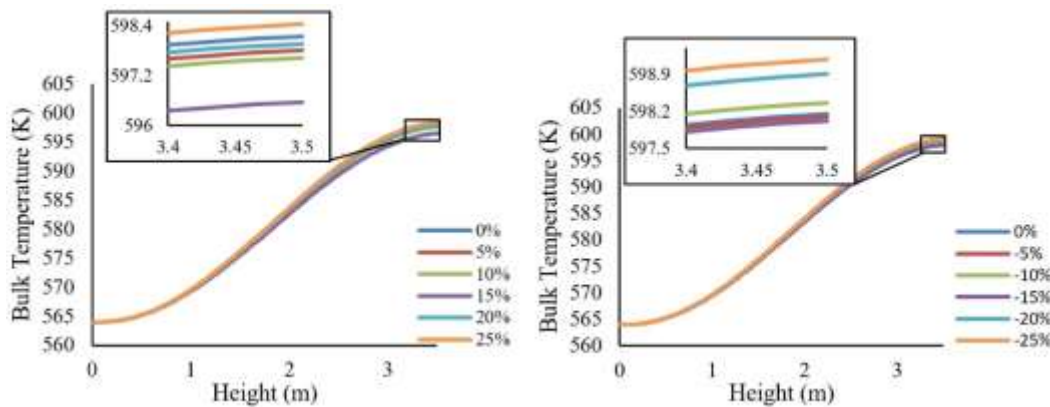
نتایج :

تغییرات دمایی مرکز سوخت با تغییر غنای سوخت در شکل (۲) نشان داده شده است.



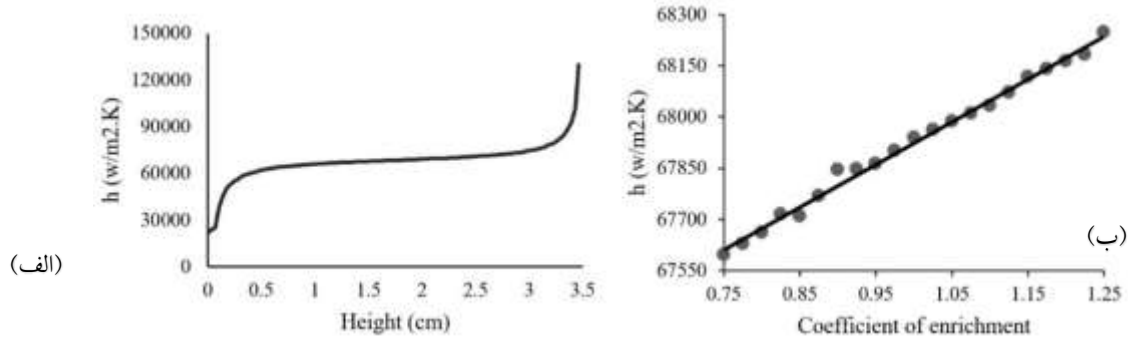
شکل (۲) نمودار دمایی مرکز سوخت بر حسب ارتفاع برای قلب راکتور بوشهر و غناهای دیگر

دمای مرکز سوخت وابسته به توان تولیدی در سوخت است که در این پژوهش، چون کانال داغ مدل شده است، توان تولیدی در کانال داغ مد نظر است. با توجه به شکل (۲) می‌توان گفت که دمای مرکز سوخت به q'''_{max} که از محاسبات نوترونیکی حاصل شده و به عنوان ورودی برای نرم‌افزار **Fluent** در نظر گرفته شده، وابسته است. عملاً می‌توان گفت که تغییرات دمایی مرکز سوخت برای غناهای مختلف وابسته به **PPF** شعاعی برای هر سطح غنا است.



شکل (۳) نمودار تغییرات دمایی بالک سیال بر حسب ارتفاع برای غنای بوشهر و غناهای دیگر

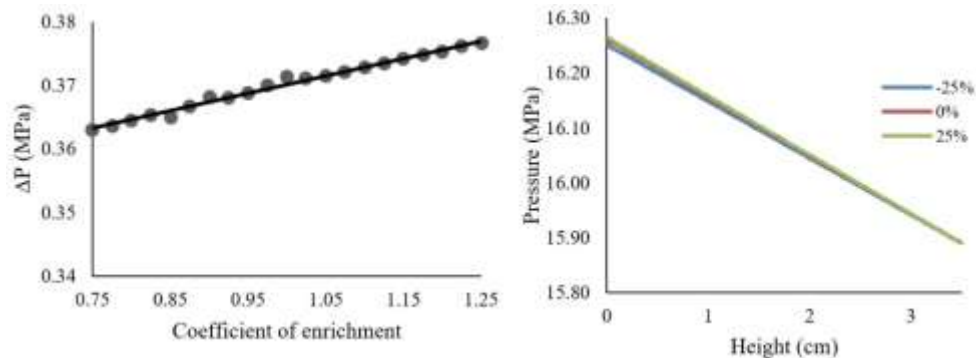
شکل (۴-الف) ضریب انتقال حرارت جابجایی محاسبه شده برای غنای سوخت موجود در بوشهر بر حسب ارتفاع قلب را نشان می‌دهد.



شکل (۴) (الف) نمودار ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال خنک‌کننده بر حسب ارتفاع قلب برای غنای بوشهر؛ (ب) تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین سیال خنک‌کننده را با تغییر غنای سوخت

همانطور که در نمودار موجود در شکل (۴-ب) مشخص است، با افزایش غنای سوخت، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. این افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی به دلیل افزایش گام شبکه (افزایش رینولدز) با افزایش غنای سوخت است (توان تولیدی قلب در غناهای مختلف ثابت فرض شده است).

افت فشار سیال در ارتفاع قلب پارامتر دیگری است که در تحلیل ترموهیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۵-الف) فشار سیال بر حسب ارتفاع برای چند غنای مختلف سوخت آورده شده است و شکل (۵-ب) تغییرات افت فشار سیال در ارتفاع قلب را در غناهای مختلف سوخت نشان می‌دهد

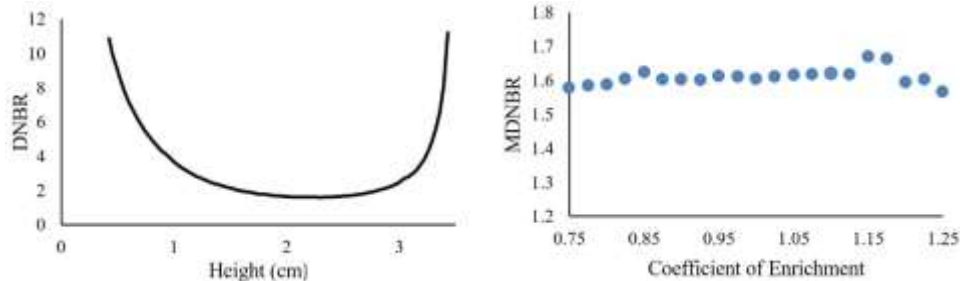


شکل (۵) (الف) فشار سیال در ارتفاع قلب برای غنای بوشهر و تغییر غنای ۲۵٪ و ۲۵٪.

(ب) افت فشار سیال در ارتفاع قلب برای غناهای مختلف سوخت

در شکل (۵-ب) مشخص شد که با افزایش غنای سوخت و افزایش گام شبکه، افت فشار سیال هنگام حرکت در راستای ارتفاع قلب، افزایش می‌یابد. این افزایش افت فشار مانند افزایش گام شبکه به مقدار بسیار ناچیزی رخ می‌دهد (در حد 0.0137 MPa).

DNBR مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۶-الف) نمودار DNBR بر حسب ارتفاع میله سوخت را برای کانال داغ قلب شبیه‌سازی شده‌ی راکتور بوشهر نشان می‌دهد.

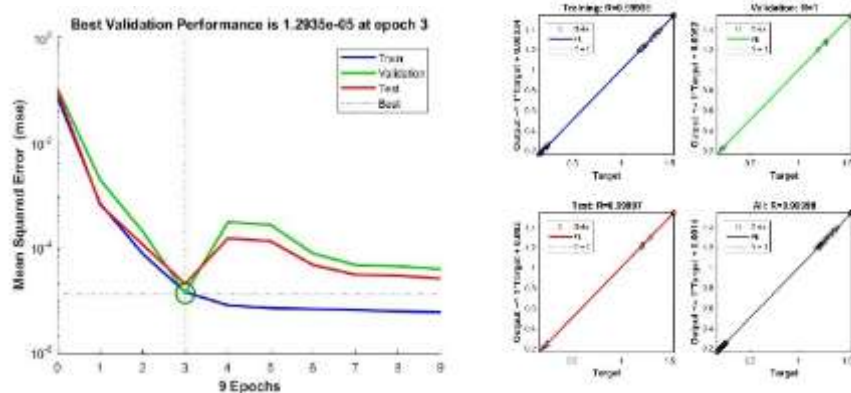


شکل (۶) (الف) نمودار DNBR بر حسب ارتفاع قلب در غنای بوشهر

(ب) نمودار تغییرات MDNBR بر حسب تغییر غنای سوخت

پس از به دست آمدن DNBR برای تمام غناهای طراحی شده، کوچکترین مقدار آن برای هر غنا پیدا شد و این مقادیر برای هر غنای سوخت مورد نظر با دیگر غناها مقایسه گردید. شکل (۶-ب) کوچکترین DNBR (MDNBR) را در غناهای مختلف سوخت نشان می‌دهد.

پس از بررسی داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی، بمنظور انجام یک شبیه‌سازی جامع، به کمک نرم‌افزار متلب شبکه‌ی عصبی مصنوعی مربوط به داده‌ها ایجاد شد که ورودی این شبکه ضریب تغییر غنای سوخت بوده و خروجی آن سه پارامتر ضریب انتقال حرارت جابجایی، MDNBR و افت فشار می‌باشند.



شکل (۷) نمودارهای شبکه عصبی مصنوعی

همان‌طور که در نمودارها (شکل ۷) مشخص است، شبکه‌ی عصبی ایجاد شده با دقت بسیار بالایی بر داده‌های موجود، منطبق شده است.

برای اعتبارسنجی^۴ این شبکه، یک غنای دلخواه (غیر از غناهای بررسی شده) در نظر گرفته شد و به عنوان ورودی به شبکه داده شد و سه پارامتر خروجی ذکر شده از شبکه بدست آمد، سپس راکتور در همان غنا، توسط نرم افزارهای یاد شده شبیه‌سازی گردید

^۴Validation



و پارامترهای خروجی شبکه از طریق شبیه‌سازی بدست آمد، در نهایت برای اعتبارسنجی شبکه به مقایسه‌ی پارامترهای خروجی شبکه با همان پارامترها که از شبیه‌سازی حاصل شدند پرداخته شد (جدول ۱).

جدول (۱) اعتبارسنجی شبکه عصبی مصنوعی

ضریب تغییر غنا	۱٪/۱۸		
	MDNBR	$h (w/m^2.K)$	$\Delta P (MPa)$
پارامترهای مورد نظر			
شبکه مصنوعی	۱/۶۴۴۴	۶۸۱۴۵	۰/۳۷۶۵
شبیه‌سازی	۱/۶۳۶۷	۶۸۱۳۹	۰/۳۷۴۸
خطای شبکه	۰٪/۴۷	۰٪/۰۱	۰٪/۴۵

در این جدول (جدول ۲) مشخص است که خطای این شبکه‌ی عصبی ایجاد شده زیر ۱٪ بوده و از دقت بسیار بالایی برخوردار است. با این شرایط می‌توان هر غنای دلخواه را در شبکه وارد و پارامترهای خروجی مورد نظر را به راحتی بدست آورد.

بحث و نتیجه گیری :

در این مقاله تاثیر تغییر غنای سوخت بر پارامترهای ترموهیدرولیکی قلب یک راکتور VVER-1000 به کمک تحلیل کانال داغ، با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی مدل‌سازی گردید. از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر تغییر غنای سوخت بر پارامترهای نوترونیکی به گونه‌ای است که ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش غنا، افزایش می‌یابد اما تغییر غنا تاثیر بسزایی بر افت فشار در راستای ارتفاع نداشته و تاثیر تغییرات غنا بر پارامتر MDNBR به تغییر فاکتور بیشینه قدرت شعاعی و مکان کانال داغ بستگی دارد. با توجه به محاسبات انجام شده، حالت افزایش سطوح غنا با ضریب ۱/۱۷۵٪ بهترین حالت را از لحاظ ترموهیدرولیکی دارد زیرا بیشترین MDNBR را داراست و ضریب انتقال حرارت بالایی دارد.

مراجع :

1. Ministry of Russian Federation of Atomic Energy (Atomenergoproekt), Moscow.
2. M.M.El-Wakil, NUCLEAR HEAT TRANSPORT. 1971.
3. M.M.El-Wakil, Powerplant technology. 1985: Tata McGraw-Hill Education.
4. Tong, L., Prediction of departure from nucleate boiling for an axially non-uniform heat flux distribution. J Journal of Nuclear Energy, 1967. 21(3): p. 241-248.
5. G.Ansarifar, and M. Ebrahimian, Design and neutronic investigation of the Nano fluids application to VVER-1000 nuclear reactor with dual cooled annular fuel. J Annals of Nuclear Energy, 2016. 87: p. 39-47.
6. M.Zaidabadi, G. Ansarifar, and M. Esteki, Thermal hydraulic analysis of VVER-1000 nuclear reactor with dual-cooled annular fuel using K- ω SST Turbulence model. J Annals of Nuclear Energy, 2017. 101: p. 118-127.



بیت و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۸ و ۷ اسفندماه ۱۳۹۸ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران



۷. ع. کرانیانی و غ. انصاری فر، بررسی تاثیر غنای سوخت بر راکتیویته‌ی اضافی قلب و فاکتورهای بیشینه‌ی توزیع قدرت شعاعی و محوری در یک راکتور هسته‌ای VVER-1000 با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۸.