



Sci. and Tech. note
یادداشت علمی و فنی

بررسی اثر غلظت و اندازه‌ی نانوسیال آب / آلومینا بر پارامترهای نوترونیکی و ترموهیدرولیکی در راکتور هسته‌ای VVER-1000 با مجتمع‌های سوخت حلقوی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

مصطفی رضایی، غلامرضا انصاری فر*، مهدی نصری نصرآبادی

گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶، اصفهان - ایران

چکیده: امروزه برای بهبود راندمان نیروگاه‌های هسته‌ای، پژوهش‌های زیادی از جمله استفاده از میله‌ی سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی از داخل و خارج که مزایای فراوانی در بهبود ویژگی‌های انتقال حرارت دارد صورت گرفته است. هم‌چنین برخی مطالعات نشان داده است که استفاده از ذرات نانو در سیال خنک‌کننده منجر به بهبود خواص حرارتی سیال می‌شود. استفاده از کدهای نوترونیکی و ترموهیدرولیکی به منظور بررسی اثر نانوسیالات در راکتورهای هسته‌ای، نیازمند شبیه‌سازی‌های پیچیده، دقیق و صرف هزینه‌های اقتصادی و زمان زیاد است. در این مقاله تأثیر درصد‌های حجمی و اندازه‌ی نانو ذره‌ی آلومینا بر پارامترهای نوترونیکی و ترموهیدرولیکی راکتور VVER-1000 با استفاده از یک شبکه‌ی عصبی مناسب بررسی می‌شود. نتایج حاصل، نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که شبکه‌ی عصبی آموزش داده شده، هم‌گرایی مناسب و دقت کافی در تعیین پارامترهای نوترونیکی و ترموهیدرولیکی دارد. با استفاده از شبکه‌ی عصبی ارائه شده، می‌توان پارامترهای اساسی یک راکتور را بدون استفاده از کدها و نرم‌افزارهای نوترونیکی و ترموهیدرولیکی تعیین کرد که باعث صرفه‌جویی زمانی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: نانوسیال، سوخت حلقوی، راکتور هسته‌ای، پارامترهای نوترونیکی، پارامترهای ترموهیدرولیکی، شبکه‌ی عصبی مصنوعی

Investigation of the Al₂O₃/ Water Nano-Fluid Concentration and Size Effects on the Neutronics and Thermal-Hydraulic Parameters in the VVER-1000 Nuclear Reactor Using Artificial Neural Networks

M. Rezaee, Gh.R. Ansarifar*, M. NasriNasrabadi

Department of Nuclear Engineering, Faculty of Advanced Sciences and Technologies, University of Esfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan-Iran

Abstract: Nowadays, many researches have been done to improve the efficiency of the nuclear power plants, one of which is the use of the dual cooled annular fuel which is an internally and externally cooled annular fuel with many advantages in heat transfer characteristics. Also, some studies have suggested that the usage of the nanoparticles in a fluid as nano-fluid can provide dramatic improvements in the thermal properties of fluid. However, the usage of neutronics and the thermal hydraulic codes in order to investigate the nano-fluid effects in the nuclear reactors is complex, uneconomical and time consuming. Therefore, in this paper, to investigate the nano-fluid effects on the important parameters of the VVER-1000 nuclear reactor with dual-cooled annular fuel, effects of Al₂O₃/ water nano-fluid concentration and size on neutronics and the thermal-hydraulic parameters in the VVER-1000 nuclear reactor are investigated using a proper Artificial Neural Network. Results show that the trained Neural Network has good convergence and accuracy in determination of the neutronics and the thermal-hydraulic parameters. Using the presented Neural Network, important reactor parameters can be determined without neutronics and the thermal hydraulic codes, thus saving time.

Keywords: Nanofluid, Annular Fuel, Nuclear Reactor, Neutronic Parameters, Thermal-Hydraulic Parameters, Artificial Neural Networks



۱. مقدمه

امروزه اکثر نیروگاه‌های هسته‌ای از سوخت توپر استفاده می‌کنند که با محدودیت‌هایی روبه‌رو است. در حالی که سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی داخلی، دارای دو سطح خنک‌کنندگی است، به طوری که سیال خنک‌کننده هم از داخل و هم از خارج میله‌ی سوخت عبور می‌کند و از انباشت حرارت و ذوب شدن میله‌ی سوخت جلوگیری می‌شود. هم‌چنین بهره‌برداری از این فناوری باعث کاهش دمای بیشینه‌ی سوخت راکتور و افزایش سطح ایمنی آن می‌شود [۱]. در این نوع سوخت، با افزایش سطح انتقال حرارت، می‌توان برداشت حرارت بیش‌تری از سوخت داشت و راندمان حرارتی نیروگاه را افزایش داد. با توجه به پژوهش‌های انجام‌گرفته‌ی مؤسسه‌ی تحقیقاتی MIT و سازمان تحقیقات انرژی اتمی کُره، استفاده از این تکنولوژی می‌تواند توان حرارتی راکتور آبی تحت فشار را افزایش دهد، در حالی که در مسائل ایمنی راکتور خللی وارد نشود [۲، ۳]. شکل ۱ دو نوع سوخت توپر و حلقوی را نشان می‌دهد.

مطالعات انجام‌شده روی خنک‌کننده با اضافه کردن ذرات نانو بیان‌کننده‌ی آن است که خواص حرارتی سیال بهبود می‌یابد و هم‌چنین تأثیر به‌سزایی روی شار حرارتی بحرانی دارد [۴-۶]. تأثیر نانوسیال بر راکتور VVER-1000 با استفاده از کد MCNP4C بیان‌کننده‌ی آن است که نانوذره‌ی آلومینا کم‌ترین تأثیر را بر کاهش ضریب تکثیر مؤثر دارد [۳-۷]. هم‌چنین انصاری‌فر و ابراهیمیان مطالعات نوترونیکی را بر روی نانوسیال‌های مختلف برای راکتور بوشهر با سوخت حلقوی انجام داده‌اند که در آن قلب یک راکتور VVER-1000 براساس یک نوع سوخت حلقوی طراحی، و اثر نوترونیک استفاده از نانوسیال در آن بررسی شده است [۸]. براساس نتایجی که از بررسی شش نوع نانوذره‌ی آلومینا، آلومینیم، زیرکونیا، تیتانیا، مس و اکسید مس در درصد‌های حجمی مختلف حاصل شده است، در شرایط کارکرد عادی راکتور، در غلظت‌های کم (حدود کسر حجمی ۰/۰۲)، زیرکونیا و آلومینا بهترین نانوذرات به علت راکتیویته‌ی منفی کم از نظر نوترونیکی و خواص حرارتی مناسب هستند. به همین دلیل، خنک‌کننده به صورت آب همراه با نانوذره‌ی آلومینا مدل‌سازی شده است و در شبیه‌سازی مجتمع سوخت، از طول گام مناسب طراحی شده برای ناحیه‌ی under-moderated برای منفی بودن بازخورد دمایی خنک‌کننده استفاده شده است

[۸]. حداد و همکاران پژوهش‌هایی را برای به کارگیری نانوسیال به جای آب



شکل ۱. نمونه‌ی قرص‌های توپر و حلقوی سوخت هسته‌ای.

معمولی در راکتور VVER-1000 انجام داده‌اند [۹]. نتایج این پژوهش برای پنج نوع نانوذره‌ی مختلف و در درصد‌های حجمی مختلف، نانوذره‌ی آلومینا را در غلظت پایین از نظر نوترونیکی برای این راکتور مناسب می‌داند. لازم به ذکر است که نانوذرات به دلیل گشتاور وارد شده می‌توانند منجر به صدمات فیزیکی به ساختار داخلی پمپ‌ها شوند که نسبت به افزایش انتقال حرارت ناشی از نانوذرات و نیز نقش مؤثر آنها در یکنواخت کردن توزیع قدرت و کاهش فاکتور بیشینه قدرت قلب راکتور، قابل توجه نیست و مشکل جدی ایجاد نمی‌کند.

در این پژوهش با ترکیب این دو روش، ابتدا اثر نوترونیک استفاده از نانوسیال در سوخت حلقوی به کار رفته در قلب یک راکتور VVER-1000 بررسی می‌شود. سپس پارامترهای ترموهیدرولیکی مجتمع سوخت داغ آن ارزیابی و تحلیل خواهند شد.

علاوه بر این، محاسبات نوترونیکی و ترموهیدرولیکی راکتور بوشهر با سوخت حلقوی و قابلیت خنک‌شوندگی از داخل و خارج و نانوسیال آلومینا به عنوان خنک‌کننده، به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی با هدف تسریع در روند محاسبات پارامترهای مهم راکتور انجام می‌شوند.

۲. روش کار

۲.۱ کدها و نرم‌افزارهای به کار رفته

۲.۱.۱ کد WIMS

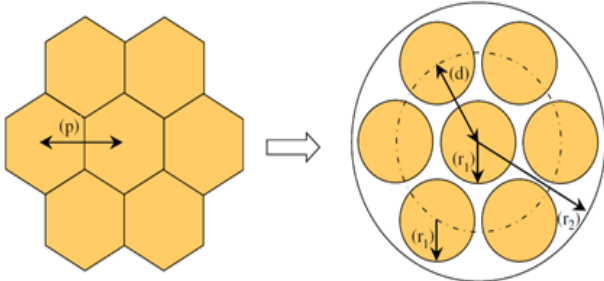
کد کامپیوتری WIMS قابلیت مدل کردن چهار نوع هندسه را دارد، اما از آن‌جا که مجتمع‌های سوخت راکتور بوشهر از نوع



برای به دست آوردن ماتریس ضرایب شار نوترونی:

$$\phi = \frac{1}{k} A^{-1} B \phi \quad (2)$$

که این معادله با استفاده از کد CITATION به روش تکراری SOR حل می‌شود.



شکل ۲. شمای مدل سوخت خوشه‌ای برای هندسه‌ی شش ضلعی [۱۰].

۳.۱.۲ نرم‌افزار گمبیت

برای حل یک مسئله‌ی دینامیک سیالاتی، به هندسه‌ی آن و شبکه نیاز است. نرم‌افزار گمبیت برای کمک به طراحان در تولید هندسه و به صورت اختصاصی تولید شبکه‌ها در کاربردهای دینامیک سیالات عددی طراحی شده است. در واقع این بسته‌ی نرم‌افزاری، یک پیش‌پردازنده برای نرم‌افزارهای دینامیک سیالات عددی نظیر فلوئنت است که خروجی این برنامه پیش‌پردازنده‌ای به شکل فایل‌های ورودی برای نرم‌افزار سیالاتی فلوئنت است. هم‌چنین در این نرم‌افزار می‌توان نوع شرایط مرزی را روی هر سطح تعیین، و برای مقادری در نرم‌افزار فلوئنت آماده کرد.

۴.۱.۲ نرم‌افزار فلوئنت

برای به دست آوردن پارامترهای ترموهیدرولیکی در یک هندسه‌ی مشخص نیاز به حل معادلات ناویر-استوکس است. این معادلات وابسته به هم هستند و با گسسته‌سازی آنها و ایجاد دستگاه معادلات می‌توان یک مسئله را از نظر حرارتی بررسی کرد. معادلات حاکم بر مسئله در شرایط پایا و جریان مغشوش تراکم‌ناپذیر عبارتند از:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3)$$

جرم: بقاء معادله‌ی

شش ضلعی و حاوی میله‌های جاذب سوختنی نیز هستند، در این پژوهش از مدل خوشه‌ای و نوع حلقوی (شکل ۱) استفاده شد. در این مدل تعدادی از سلول‌های پایه (بدون هیچ‌گونه محدودیتی بر روی تعداد آنها) انتخاب می‌شوند و ثابت‌های گروهی برای کل سلول تولید می‌شود. برای این کار ابتدا باید قسمتی از شبکه‌ی راکتور (که هدف، محاسبه آن است) از شکل واقعی به شکل دایره‌ای معادل، متشکل از لایه‌های استوانه‌ای تبدیل شود. کد در هنگام حل معادله‌ی ترابرد نوترون، محتویات داخل هر یک از لایه‌های استوانه‌ای نشان داده شده در شکل ۲ را همگن^(۱) می‌کند. پس از حل معادله‌ی ترابرد، طی فرایند ناهمگن‌سازی^(۲) محتویات داخل لایه‌های استوانه‌ای به حالت اول برمی‌گردد [۱۰]. هم‌چنین به منظور بالا بردن دقت، حل در شبیه‌سازی، از روش گسسته کردن جهت حرکت استفاده شد. در این روش، کد WMIS برای حل مشکل جهت نوترون، اقدام به گسسته سازی متغیر جهت می‌کند.

۲.۱.۲ کد CITATION

کد محاسباتی CITATION، معادله‌ی چند گروهی پخش نوترون را با روش تفاضل محدود حل می‌کند. این کد قابلیت حل این معادله را در فضاهای یک، دو و سه‌بعدی و در دستگاه‌های مختصات مختلف دارد. از جمله قابلیت‌های این کد می‌توان به محاسبه‌ی توزیع شار نوترونی (توزیع قدرت) در قلب راکتور و ضریب تکثیر بی‌نهایت و مؤثر محیط، محاسبات مدیریت سوخت، محاسبات تهی شدن سوخت و محاسبات اختلال شار اشاره کرد [۱۱].

با گسسته‌سازی متغیر انرژی و استفاده از روش اختلاف محدود، معادله‌ی پخش چندگروهی یک‌بعدی نوترون به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$(1)$$

$$A \phi = \frac{1}{k} B \phi$$

که در آن:

A: ماتریس جملات پراکندگی و جذب،

B: ماتریس جملات شکافت،

k: ضریب تکثیر مؤثر راکتور،

φ: بردار توزیع شار نوترون (بردار مجهول) است.



برای انجام شبیه‌سازی نوترونیکی، ابعاد دقیق مجتمع‌های سوخت باید در دسترس باشند. به همین منظور، سوخت جدید حلقوی طوری انتخاب شده است که جرم بحرانی قلب راکتور جدید با جرم بحرانی راکتور بوشهر برابر باشد. ابعاد هندسی این سوخت در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که ابعاد این سوخت برگرفته از یک سوخت حلقوی به کار رفته در راکتور هسته‌ای OPR-۱۰۰۰ است [۱۲].

جدول ۱. مشخصات میله‌ی سوخت حلقوی

ابعاد میله سوخت (mm)	
۱۳٫۶۶	قطر خارجی غلاف خارجی
۰٫۸۷	ضخامت غلاف خارجی
۱۱٫۹۲	قطر داخلی غلاف خارجی
۰٫۰۵	ضخامت gap خارجی
۱۱٫۸۲	قطر خارجی سوخت
۹٫۲	قطر داخلی سوخت
۰٫۰۶	ضخامت gap داخلی
۹٫۰۸	قطر خارجی غلاف داخلی
۰٫۵۴	ضخامت غلاف داخلی
۸	قطر داخلی غلاف داخلی

شبیه‌سازی مجتمع‌های سوخت بوشهر توسط کد WIMS با گام مناسب با فرض جلوگیری از بروز حوادث در اثر بالا رفتن دمای قلب و منفی بودن ضریب بازخورد دمایی خنک‌کننده صورت گرفت [۸]. لازم به ذکر است که به منظور طراحی گام شبکه، قلب راکتور در شرایط عاری از سموم نوترونی، تولید قدرت صفر، دمای 300°K تمام اجزای آن، خنک‌کننده‌ی با غلظت اسیدبوریک 8.2g/kg آب و مجتمع‌های سوخت با میله‌های جاذب سوختنی که به صورت ابتدای سیکل اول کاری است، شبیه‌سازی شده است. با توجه به قابلیت کد WIMS برای شبیه‌سازی دقیق‌تر، بیرونی‌ترین مرز مجتمع سوخت، مانند مجتمع سوخت راکتور بوشهر به شکل شش ضلعی مدل شده است. برنامه‌ی نوشته شده برای کد، معادله‌ی انتقال نوترون را برای شش

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}) + \rho \vec{g} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = -\nabla \cdot q - \tau_i \cdot \nabla \vec{v} \quad (5)$$

در این معادلات، \vec{v} بردار سرعت، p فشار، H آنتالپی، و τ_i تانسور تنش است.

مدل استفاده شده برای این پروژه، k-ε استاندارد است. مدل‌های دو معادله‌ای از ساده‌ترین مدل‌های مغشوش نسبتاً کاملند، چون حل دو معادله‌ی انتقال به صورت جداگانه، باعث می‌شود که سرعت اغتشاش و طول مشخصه به صورت مجزا تعیین شوند. مدل k-ε استاندارد، در گروه مدل‌های مغشوش قرار دارد و جزء یکی از قدرتمندترین آنها برای مسائل مهندسی محسوب می‌شود [۴]. قدرتمندی، اقتصادی بودن محاسبات و داشتن دقت قابل قبول در محدوده‌ی وسیعی از جریان‌های مغشوش، باعث محبوبیت این مدل در مسائل صنعتی و انتقال حرارت شده است. معادلات بالا با استفاده از نرم‌افزار فلونت حل شده‌اند. برای تعریف شار محوری به صورت کسینوسی، از قابلیت برنامه‌نویسی نرم‌افزار استفاده شده است که به این منظور یک "تابع تعریف‌شونده توسط کاربر"^(۳) برای کد نوشته شده است. هم‌چنین برای تعیین رفتار متغیر معادلات (۴) و (۵) با دما، دو تابع کریر تعریفی جداگانه نوشته شده است. در دینامیک سیالات محاسباتی، معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر سیالات به معادلات جبری تبدیل، و به این صورت امکان حل عددی معادلات فراهم می‌شود. اساس معادلات مورد استفاده در این زمینه، معادلات ناویر-استوکس است. ناحیه‌ی مورد نظر برای تحلیل به اِلمان‌های کوچک تری تقسیم می‌شود و با اعمال شرایط مرزی بر گره‌های مرزی، یک دستگاه معادلات خطی به دست می‌آید که با حل این دستگاه، میدان سرعت، فشار و دما در ناحیه‌ی مربوطه به دست می‌آید. برای حل مسئله توسط نرم‌افزار فلونت، شرط مرزی دبی جرمی سیال ورودی در ورودی و فشار سیال خروجی در خروجی مجتمع سوخت در نظر گرفته شد.

۲.۲ روند حل مسئله

۱.۲.۲ تحلیل نوترونیکی



نمایی از قلب راکتور شبیه‌سازی شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

۲.۲.۲ خواص ترموفیزیکی نانوسیال

برای بررسی نحوه‌ی انتقال حرارت نانوسیال، از مدل تک‌فاز استفاده شد. در این مدل، مجموعه سیال نانو به عنوان یک سیال تک‌فاز در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود که تعادل دمایی بین ذرات نانومتری و فاز مایع برقرار است و هم‌چنین سرعت جریان برای هر دو بخش ذرات جامد و مایع یکسان است. این رویکرد ساده‌تر است و به زمان محاسبه کم‌تری نیاز دارد.

۱.۲.۲.۲ چگالی جرمی

برای چگالی نانوسیال، وانگ و همکارانش رابطه‌ی زیر را ارائه کرده‌اند [۱۳]:

(۶)

$$(\rho)_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p$$

۲.۲.۲.۲ ظرفیت گرمایی ویژه

برای تعیین ظرفیت گرمایی ویژه‌ی نانوسیال، از مدل پیشنهادی ژوان و روتزل که با فرض تعادل گرمایی بین نانوذرات و سیال پایه‌ی استخراج شده استفاده می‌شود [۱۴]:

(۷)

$$C_{p,nf} = \frac{(1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p}{\rho_{nf}}$$

۳.۲.۲.۲ ضریب هدایت حرارتی

در این پژوهش برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از مدل چون و همکاران استفاده شده است [۱۵]. این مدل که مینستا و همکارانش نیز تأیید کرده‌اند [۱۶] مطابق رابطه‌ی زیر است:

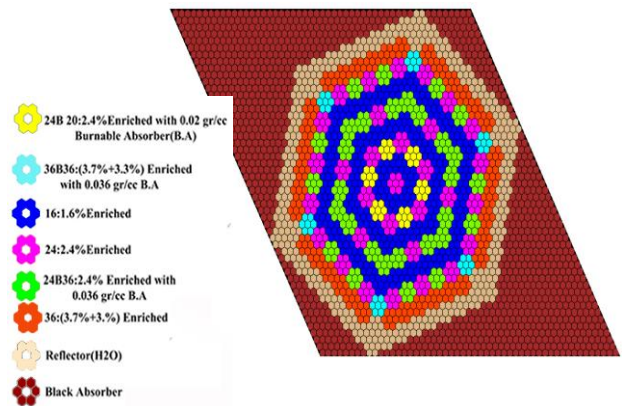
$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64,7\phi^{0,746}(d_f/d_p)^{0,369} \times (k_p/k_f)^{0,746} Pr^{0,985} Re^{1,221} \quad (8)$$

در معادله‌ی فوق، d_p و d_f به ترتیب قطر ملکول‌های سیال پایه

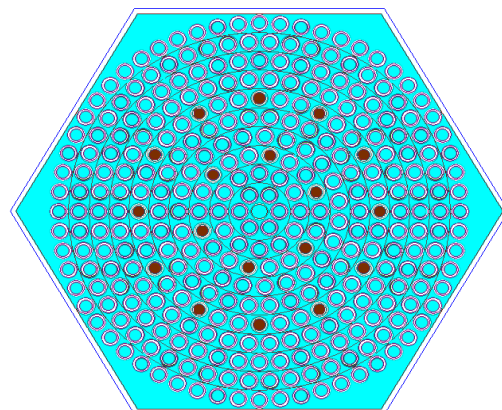
و قطر متوسط نانوذرات هستند. $Pr = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f}$ و $Re = \frac{\rho_f k_b T}{3\pi\mu_f \lambda_f}$

نوع مجتمع سوخت استفاده شده در قلب راکتور (شکل ۳)، در سیکل اول کاری راکتور، با ایجاد ۶۰ گره (مش) شعاعی و از روش

گسسته‌سازی زاویه فضایی (DSN) حل می‌کند. شکل ۴ یک نوع مجتمع سوخت حلقوی شبیه‌سازی شده را در کد WIMS نشان می‌دهد.



شکل ۳. شبیه‌سازی قلب راکتور بوشهر با استفاده از کد CITATION.



شکل ۴. شبیه‌سازی مجتمع سوخت حلقوی راکتور بوشهر با استفاده از کد WIMS.

برای به دست آوردن ضریب تکثیر مؤثر قلب راکتور بوشهر، داده‌های گروهی از کد WIMS را باید در دو گروه سریع و حرارتی برای مجتمع‌های سوخت به کار رفته در آن استخراج، و به کد CITATION معرفی کرد. در کد CITATION، هندسه‌ی قلب به شکل کامل شبیه‌سازی شده است به طوری که هر مجتمع سوخت به ۷ مش شعاعی به منظور بالا بردن دقت کد در محاسبات تقسیم، و طبق چیدمانی راکتور بوشهر که در دفترچه‌ی راهنمای آن آمده است، در کنار هم قرار داده شده‌اند.



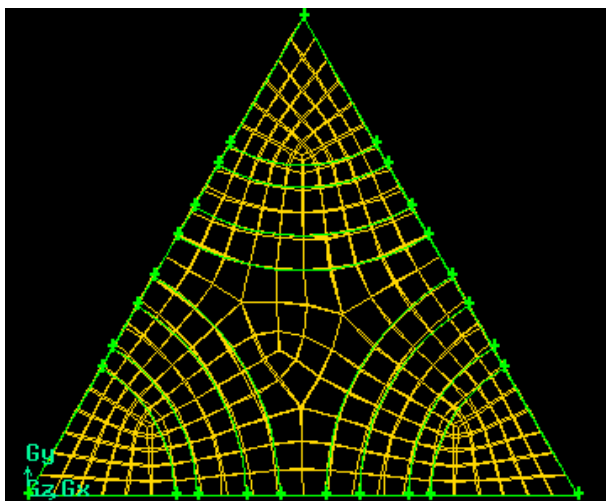
برای تحلیل مسئله در نرم‌افزار فلوئنت بعد از اجرای فضای

تولید شده در گمبیت، شرایط مرزی زیر مقداردهی اولیه شد:

۱. شرط مرزی ورودی: Mass-Flow-Inlet
۲. شرط مرزی خروجی: Pressure-Outlet
۳. مرزهای اطراف: Symmetric

شرایط مرزی برای حل نیازمند مقادیر اولیه‌اند که عبارتند از:

۱. دبی جریان ورودی: $\dot{m} = 2/436 \text{ kg/s}$
۲. فشار کاری سیستم: 15.7 MPa
۳. شار حرارتی: $q''' = 1.0377 \times 10^9 \cos(\frac{\pi z}{3.53}) \text{ W/m}^3$



شکل ۵. شبیه‌سازی شده میله‌های سوخت حلقوی با آرایش مثلی در نرم‌افزار گمبیت.

برای تولید شار حرارتی کسینوسی و خواص وابسته به دمای نانوسیال در نرم‌افزار فلوئنت، باید با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C++ برای آن یک فایل UDF ساخت.

۳.۲ معیار هم‌گرایی و عدم وابستگی نتایج به شبکه‌بندی

معیار هم‌گرایی در این پروژه رسیدن به باقی‌مانده خطای 10^{-8} در نظر گرفته شده است. نمودار باقی‌مانده‌ها، که نشان‌دهنده‌ی هم‌گرایی حل عددی مسئله است نیز در شکل ۶ نشان داده شده است.

به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج به تعداد گره‌های تولید شده و اطمینان از ایجاد شبکه‌ی مناسب، از دو کمیت بیش‌ترین دمای غلاف بیرونی و متوسط دمای سیال خروجی استفاده شده

به ترتیب اعداد پرانتل و رینولدز هستند و α_f ضریب پخش حرارتی، k_b ثابت بولتزمن و λ_f مسافت آزاد میانگین ملکول‌های آب است که در این پژوهش طبق پیشنهاد چون و همکاران، 0.17 nm در نظر گرفته شد [۱۵].

۴.۲.۲.۲ لزجت دینامیکی

معصومی و همکارانش یک مدل جدید برای لزجت دینامیکی نانوسیال ارائه دادند که اثر حرکت براونی، دما و قطر نانوذره را در نظر می‌گرفت [۱۷]:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + \rho_p V_b d_p^* / \sqrt{2} N \delta \quad (9)$$

که در آن $\delta = \sqrt{\frac{\pi}{\epsilon \phi}} d_p$ فاصله‌ی بین مرکز نانوذرات از یک‌دیگر، $V_b = \frac{1}{d_p} \sqrt{\frac{18 k_b T}{\pi \rho_p d_p}}$ سرعت براونی و k_b ثابت بولتزمن است. هم‌چنین N در معادله‌ی (۹)، تابعی از قطر نانوذره است که معادله‌ی زیر برای آن پیشنهاد شده است:

$$(10)$$

$$N = (c_1 \phi + c_2) d_p + (c_3 \phi + c_4)$$

برای این معادله، مقادیر زیر با برازش منحنی‌های تجربی استخراج شده است:

$$c_1 = +9.0 \times 10^{-8}, c_2 = -2.771 \times 10^{-6}, c_3 = -1.133 \times 10^{-6} \text{ و } c_4 = -3.93 \times 10^{-7}$$

۳.۲.۲ تحلیل ترموهیدرولیکی

شبیه‌سازی مجتمع سوخت داغ راکتور به وسیله‌ی نرم‌افزارهای گمبیت و فلوئنت با سوخت حلقوی انجام شد. در این شبیه‌سازی، به منظور در نظر گرفتن اثر حرارتی میله‌های سوخت روی یک‌دیگر و سیال خنک‌کننده، سه میله‌ی سوخت با آرایش مثلی در نرم‌افزار گمبیت طراحی شد که تعداد ۲۰۴۸۶۴۵ گره شبکه دارد. شکل ۵ میله‌های سوخت طراحی شده را نشان می‌دهد.



۱.۳ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

با توجه به این که سوخت دارای دو سطح انتقال حرارت است، بنابراین در تعیین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سطوح داخلی و خارجی غلاف مؤثرند. در این مقاله برای تعیین این پارامتر از رابطه‌ی (۱۲) استفاده می‌شود. از آنجا که مسئله در حالت فشار ثابت حل می‌شود، می‌توان از رابطه‌ی (۱۱) نرخ برداشت حرارت در حالت فشار ثابت را محاسبه کرد:

$$(11)$$

$$q = \dot{m} C_p \Delta T$$

$$(12)$$

$$h_{total} = \frac{q_{in} + q_{out}}{A_{in} \Delta T_{in} + A_{out} \Delta T_{out}}$$

۲.۳ ضریب حاشیه‌ی ایمنی

ضریب حاشیه‌ی ایمنی یکی از پارامترهای مهم و اساسی در مبحث ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای است که محدودکننده‌ی شار حرارتی نیروگاه برای جلوگیری از ورود به ناحیه‌ی جوشش فیلمی است [۱۸]. برای محاسبه‌ی این پارامتر، از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$(13)$$

$$DNBR = \frac{q''_c}{q''_{act}}$$

در این رابطه، q''_{act} شار حرارتی واقعی خروجی از سطوح انتقال حرارت به سیال خنک‌کننده، و q''_{ct} شار حرارتی بحرانی نام دارند. برای محاسبه‌ی ضریب حاشیه‌ی ایمنی در این مقاله، شار واقعی از نرم‌افزار فلوئنت استخراج، و برای شار حرارتی بحرانی نیز رابطه‌ی جنز و لوتز استفاده شده است [۱۹]:

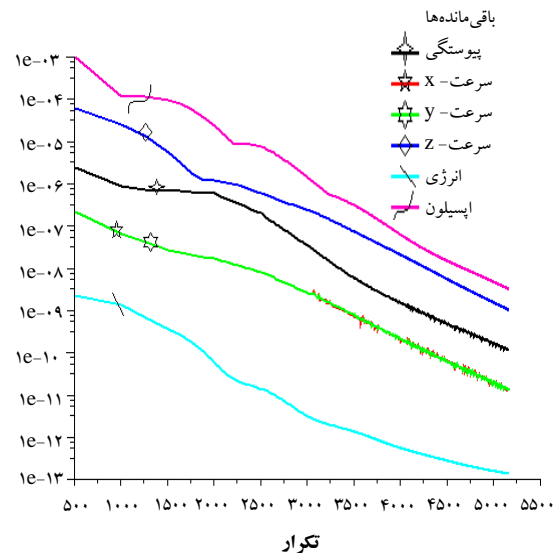
$$q''_c = C \times 10^6 \left(\frac{G}{10^6} \right)^m \Delta T_{sub}^{0.22} \quad (14)$$

که C و m پایاهای تابع فشارند و مقدار آنها به ترتیب ۰٫۴۴۱ و ۰٫۵۶۷۱ است. G ، فلوی جرمی خنک‌کننده بر حسب $lb/hr-ft^2$

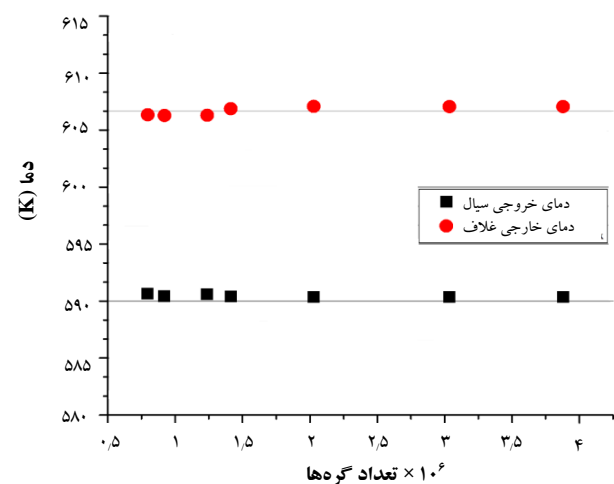
است، به طوری که با ایجاد شبکه‌های مختلف، مقادیر این دو کمیت یادداشت شده و تعداد گره‌های مسئله تا مشاهده‌ی کامل عدم وابستگی این مقادیر به تعداد آنها افزایش داده شده‌اند. نتایج این قسمت در شکل ۷ نشان داده شده است.

۳. روش تحلیل

برای تعیین پارامترهای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، حاشیه‌ی ایمنی و اُفت فشار در مجتمع سوخت، نیاز است که پروفایل دمای سیال و غلاف سوخت درونی، سیال، غلاف سوخت بیرونی و فشار تحلیل شود. با استخراج و تحلیل این پروفایل‌ها می‌توان پارامترهای ذکر شده را به دست آورد. در ادامه، چگونگی تحلیل پروفایل‌های دمایی برای استخراج این پارامترها بیان خواهد شد.



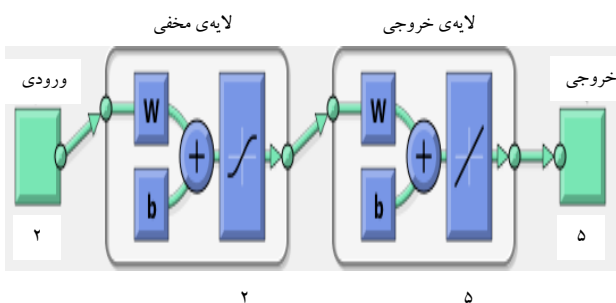
شکل ۶. باقی مانده‌های حل عددی.



شکل ۷. عدم وابستگی نتایج به شبکه‌بندی.



شبکه از الگوریتم Levenberg-Marquardt به صورت پیش‌فرض به عنوان تابع آموزش استفاده می‌کند. این الگوریتم با نام روش کاهش مربعات خطا برای حل مسائل غیرخطی نیز شناخته می‌شود که در مسائل برازش منحنی به منظور کمینه‌سازی مربعات خطای بین بردار هدف و خروجی شبکه به کار گرفته می‌شود [۲۱]. ضمناً بردارهای ورودی به صورت تصادفی به سه مجموعه تقسیم می‌شوند: ۷۰٪ داده‌ها در مجموعه‌ی آموزش، ۱۵٪ داده‌ها در مجموعه‌ی ارزیابی در راستای جلوگیری از بیش‌برازش شبکه، و ۱۵٪ داده‌ها در مجموعه‌ی تست برای بررسی عملکرد شبکه نهایی.



شکل ۸. شبکه‌ی عصبی تعیین شده به منظور آموزش.

با توجه به تنظیمات اعمال شده به برنامه، روال آموزش در صورتی که خطای مجموعه‌ی ارزیابی در ۶ تکرار متوالی افزایش یابد متوقف می‌شود. در شکل ۹ نمودار عملکرد شبکه برای خطاهای آموزشی، ارزیابی و تست نشان می‌دهد توقف در مرحله‌ی ۷۶ رخ داده است.

۱. مقدار میانگین مربعات خطای نهایی کوچک است.
۲. خطای مجموعه‌های آزمایشی و ارزیابی دارای رفتار مشابه و هم‌گرا شونده است.
۳. تا تکرار ۷۶ هیچ‌بیش‌برازشی^(۴) رخ نداده است.

همان‌طور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، شبکه‌ی عصبی طی آموزش به خوبی هم‌گرا شده است و پس از آموزش، رگرسیون مناسب و قابل قبولی دارد، بنابراین در تعیین پارامترهای نوترونیکی و ترموهیدرولیکی راکتور هسته‌ای دقت مناسب دارد.

۷.۳ رگرسیون شبکه

ΔT_{sub} اختلاف درجه‌ی حرارت بین درجه حرارت موضعی و اشباع برحسب فارنهایت است. از آن‌جا که کمینه مقدار این پارامتر در راکتور دارای اهمیت و تعیین‌کننده‌ی حاشیه‌ی ایمنی است، مقدار کمینه‌ی ضریب حاشیه ایمنی بین دو سطح داخلی و خارجی از روابط و پروفایل‌های دمایی بیان شده استخراج شد.

۳.۳ افت فشار

پارامتر افت فشار را می‌توان با توجه به فشار ورودی در مجتمع سوخت به دست آورد، چون در خروجی مسئله، شرط مرزی فشار خروجی اعمال شده است، بنابراین برای جریان افت فشار ناشی از تنش‌های موجود در مدل‌سازی، فشار در ورودی بالا می‌رود و با توجه به اختلاف آن با فشار خروجی می‌توان این پارامتر را محاسبه کرد.

۴.۳ نمونه‌گیری

با انجام مراحل بیان شده برای غلظت‌های حجمی و اندازه‌های مختلف نانوسیال، می‌توان نمونه‌هایی از رفتار سیستم در شرایط مختلف را به دست آورد. در این حالت، توابع تعریف شده با رفتار نانوسیال در غلظت‌های حجمی بین ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ... ۰/۲ و با اندازه‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ... ۱۰۰ nm (نمونه ۲۰۰) توسط کاربر تهیه، به نرم‌افزار فلونت داده و نتایج حاصل از آن استخراج شد. سپس این نمونه‌ها در ماتریس‌هایی به نام ماتریس ورودی و هدف برای ورود به شبکه‌ی عصبی در نرم‌افزار متلب آماده شدند. ماتریس ورودی اطلاعات مربوط به غلظت و اندازه-ی نانوسیال و ماتریس هدف شامل اطلاعات ضریب تکثیر مؤثر، بیشینه توان تولیدی، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، ضریب حاشیه ایمنی و افت فشار نظیر درایه‌های ماتریس ورودی است.

۵.۳ مشخصات شبکه‌ی عصبی

با استفاده از برنامه‌ی شبکه‌ی عصبی [۲۰] نوشته شده در نرم‌افزار متلب، یک شبکه‌ی عصبی چند لایه با تابع انتقال tan-sigmoid با ۲ نورون در لایه‌ی مخفی و تابع انتقال خطی با ۵ نورون در لایه‌ی خروجی ایجاد شد. شکل ۸، شبکه‌ی عصبی تعیین شده به منظور آموزش را نشان می‌دهد.



تحلیل آسان‌تر عملکرد الگوریتم ژنتیک، پارامتری به نام تعداد دفعات ارزیابی تابع هزینه^(۵) در نظر گرفته شد. به کمک این پارامتر می‌توان عملکرد الگوریتم در رسیدن به جواب بهینه را بررسی کرد. با افزایش تعداد دفعات فراخوانی این تابع، مقدار تابع هزینه رو به افزایش می‌رود که خود بیان‌کننده‌ی کارایی و درستی عملکرد الگوریتم ژنتیک نوشته شده است.

۴. نتایج

۴.۱ تعیین ضریب تکثیر به کمک شبکه‌ی عصبی

به نسبت تعداد نوترون‌ها در دو نسل متوالی، ضریب تکثیر قلب راکتور گفته می‌شود [۲۰]. از آنجا که این ضریب مستقیماً به مدت زمان تولید توان در نیروگاه هسته‌ای مربوط می‌شود، لازم است که به تغییرات آن توجه شود. یکی از عواملی که باعث تغییر ضریب تکثیر می‌شود، تغییر در مواد به کار رفته در قلب راکتور، خصوصاً خنک‌کننده‌ی آن است. بنابراین با اضافه شدن ذرات خنک‌کننده، تغییرات ضریب تکثیر مهم می‌شوند.

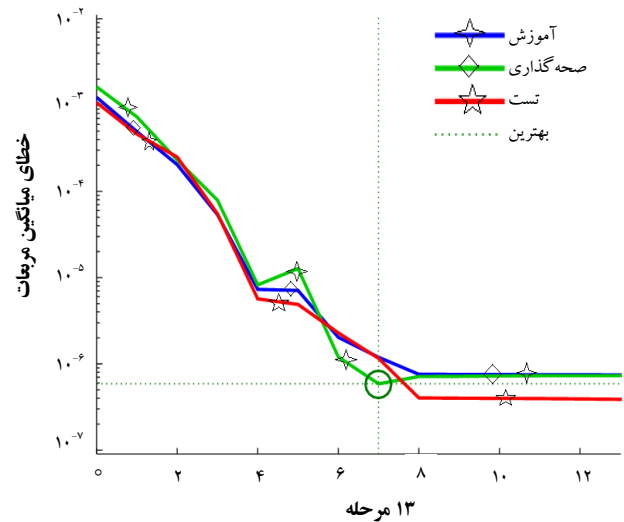
ضریب تکثیر و بیشینه توان تولیدی راکتور، به نوع و میزان مواد به کار رفته در قلب راکتور بستگی دارند. بنابراین اندازه‌ی نانوذره تأثیری در تعیین این پارامترها ندارد. به همین منظور، نمونه‌های ورودی شبکه‌ی عصبی به شکلی تعیین شدند که پارامترهای نوترونیکی مستقل از اندازه‌ی نانوذره باشند. بنابراین اندازه‌ی نانوذره تأثیری در تعیین این پارامترها ندارد. برای تعیین پارامتر ضریب تکثیر مؤثر راکتور، نمونه‌های ورودی به صورت مستقل از اندازه‌ی نانوذره در نظر گرفته شدند. شکل ۱۰، مربوط به ضریب تکثیر مؤثر است و با توجه به خروجی‌های شبکه عصبی

آموزش‌یافته برای درصدهای حجمی مختلف نانوسیال ترسیم شده است.

۴.۲ تعیین ضریب بیشینه توان تولیدی به کمک شبکه‌ی عصبی

یکی از پارامترهای مهمی که در قلب یک راکتور هسته‌ای تحت فشار که به منظور توزیع یکنواخت قدرت و جلوگیری از ذوب

برای تحلیل آماری عملکرد شبکه، رگرسیون داده‌های هدف و خروجی با شبکه‌ی عصبی تعیین می‌شود. بیشینه و میانگین خطای داده‌های آموزش به ترتیب از مرتبه‌ی 10^{-6} و 10^{-7} و برای داده‌های تست، و بیشینه و میانگین خطا به ترتیب از مرتبه‌ی 10^{-6} و 10^{-8} است که نشان از انطباق خوب داده‌های خروجی با هدف و در واقع دقت شبکه در تعیین پارامترهای موردنظر است.



شکل ۹. نمودار کارایی شبکه.

۸.۳ الگوریتم ژنتیک

در ابتدای حل هر مسئله، بهینه‌سازی با تعریف تابع هزینه‌ی متناسب با آن، میزان شایستگی هر یک از افراد جمعیت تعیین می‌شود و با توجه به آن، مراحل بعدی حل از جمله انتخاب والدین ادامه می‌یابد [۲۲]. در این پژوهش برای یافتن غلظت و اندازه بهینه‌ی نانوسیال از تابع هزینه زیر استفاده شد:

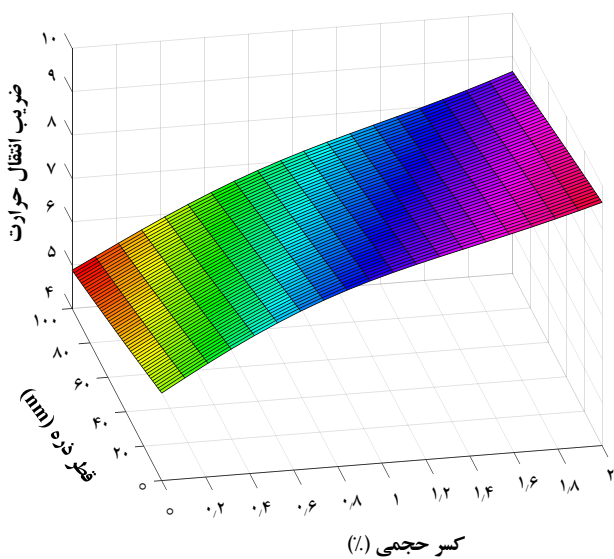
$$\text{Cost Function} = \frac{(h - 6,3010)^2 + (\text{MDNBR} - 1,9764)^2}{(\text{TDP} - 8,6093)^2 + (K - 1,2263)^2 + (\text{PPF} - 1,78)^2} \quad (15)$$

در این تابع هزینه، فاصله‌ی پارامترها با مقدار آنها در حالت سیال خالص آب مقایسه شد تا درصد حجمی و اندازه‌ی نانوذره‌ای که بتواند ضریب انتقال حرارت و حاشیه‌ی ایمنی را افزایش دهد، در حالی که اُفت فشار، کاهش ضریب تکثیر و فاکتور بیشینه توان تولیدی کم‌تری ایجاد کند را به طور دقیق تعیین کند. به منظور



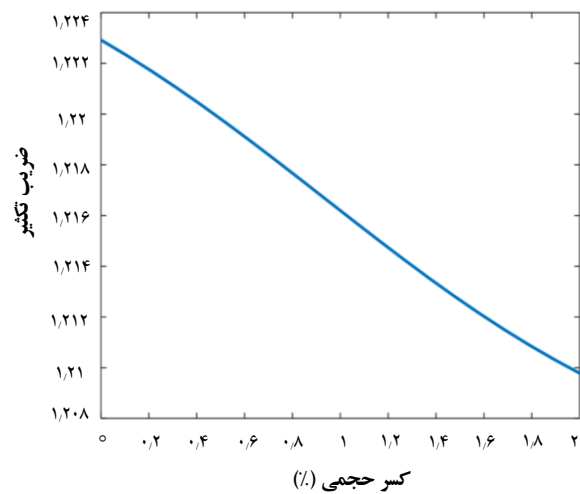
۳.۴ تعیین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به کمک شبکه‌ی عصبی

مدل چون و همکارانش [۱۵] پیش‌بینی می‌کند با افزایش درصد حجمی و کاهش اندازه‌ی نانوذره، ضریب هدایت گرمایی افزایش می‌یابد. همین موضوع می‌تواند باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال خنک‌کننده‌ی راکتور شود. هم‌چنین ظرفیت گرمایی سیال خنک‌کننده نیز افزایش می‌یابد و موجب انتقال گرمای بیش‌تر از قلب راکتور به مدار ثانویه می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، بیان‌گر افزایش آن با افزایش درصد نانوسیال است. از طرفی با کاهش قطر نانوذره، این ضریب افزایش می‌یابد، چون سطح ذرات نانو با سطح خنک‌شونده بیش‌تر تماس پیدا می‌کند و هم‌چنین بین ذرات نانو و سیال نیز انتقال حرارت بهتر صورت می‌گیرد. در واقع با افزودن نانوذره به سیال خنک‌کننده، میزان تر شوندگی سطح خنک‌شونده افزایش می‌یابد، که این امر در بهبود انتقال حرارت بسیار مؤثر است. هم‌چنین کاهش قطر نانوذره حضور آن را در یک کسر حجمی معین بالا می‌برد که این امر موجب افزایش انتقال حرارت از سطح به سیال خنک‌کننده می‌شود. شکل ۱۲، تأثیر نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را با استفاده از شبکه‌ی عصبی نشان می‌دهد.

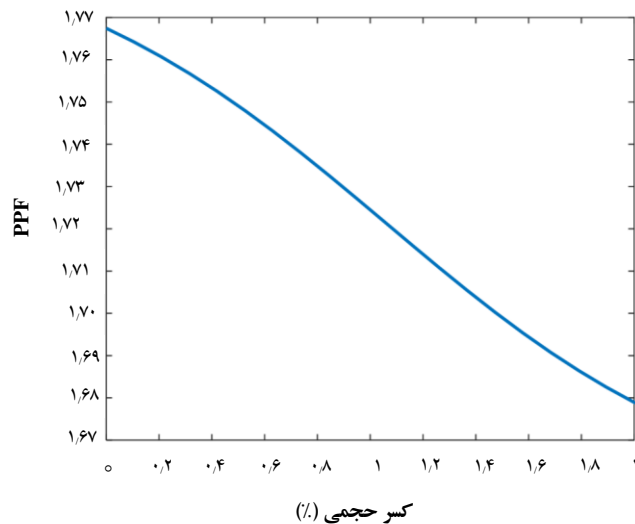


شکل ۱۲. تأثیر نانوسیال بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با استفاده از شبکه‌ی عصبی.

قلب باید به آن توجه شود، توزیع محلی چگالی توان^(۶) است. به این منظور کمیت ضریب بیشینه توان تولیدی، به صورت نسبت بیش‌ترین چگالی محلی توان به متوسط چگالی توان قلب راکتور تعریف شده است [۲۱]. این کمیت برای جلوگیری از ذوب و بالا رفتن دمای بخش‌های داغ راکتور نیز بسیار مهم است. ضریب بیشینه توان تولیدی راکتور مستقل از اندازه‌ی نانوذره است. شکل ۱۱ مربوط به بیشینه توان تولیدی است که با توجه به خروجی‌های شبکه‌ی عصبی آموزش‌یافته برای درصدهای حجمی مختلف نانوسیال ترسیم شده است.



شکل ۱۰. تأثیر نانوسیال بر ضریب تکثیر مؤثر قلب با استفاده از شبکه‌ی عصبی.



شکل ۱۱. تأثیر نانوسیال بر فاکتور بیشینه توان تولیدی قلب با استفاده از شبکه‌ی عصبی.



اُفت فشار در یک راکتور هسته‌ای می‌تواند از نوع استاتیکی یا دینامیکی باشد. در یک راکتور هسته‌ای، از آن‌جا که خنک‌کننده از پایین قلب به سمت بالا و در خلاف جهت گرانش زمین حرکت می‌کند، هر دو نوع اُفت فشار وجود دارند. فشار استاتیکی به چگالی سیال بستگی دارد و از آن‌جا که نانوسیال چگال‌تر از سیال خالص است، اضافه کردن نانوسیال موجب افزایش اُفت فشار می‌شود (شکل ۱۴). هم‌چنین اضافه کردن نانوذره به سیال خنک‌کننده موجب افزایش اغتشاش و تنش در سیال می‌شود، همین امر موجب افزایش اُفت فشار دینامیکی می‌شود. این اثر منفی افزایش اُفت فشار به علت استفاده از نانوسیال باید به وسیله‌ی

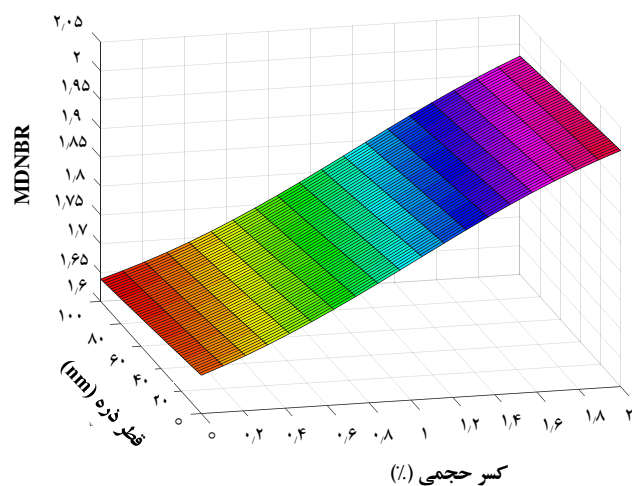
پمپ‌ها جبران شود. اما اُفت فشار ایجاد شده ناشی از نانوسیال نسبت به افزایش انتقال حرارت قابل توجه نیست و به صرفه است، زیرا افزایش انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال تا دو برابر سیال خالص است.

۶.۴ ارزیابی شبکه‌ی عصبی با کدهای نوترونیکی WIMS و CITATION

برای اطمینان بیش‌تر از دقت و کارکرد شبکه‌ی عصبی، کدهای نوترونیکی و خروجی شبکه‌ی عصبی، برای چند نمونه‌ی خروجی مقایسه و ارزیابی شدند. برای این کار از داده‌های خارج از

نمونه‌های داده شده برای آموزش شبکه عصبی استفاده شد. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، برای درصدهای حجمی مختلف، پارامترهای ضریب تکثیر مؤثر و بیشینه توان تولیدی با کدهای نوترونیکی WIMS و CITATION و سپس شبکه عصبی تعیین شده‌اند. خطای شبکه‌ی عصبی در تعیین این پارامترها بسیار کم و قابل قبول است، از این رو می‌توان به شبکه‌ی عصبی اطمینان داشت و از آن برای محاسبات نوترونیکی یک راکتور با سوخت حلقوی و خنک‌کننده‌ی نانوسیال آلومینا استفاده کرد. این شبکه‌ی عصبی می‌تواند باعث صرفه‌ی اقتصادی و زمانی در تعیین پارامترهای نوترونیکی شود، نیاز به شبیه‌سازی‌های پیچیده را برطرف سازد، و باعث افزایش سرعت محاسبات نوترونیکی شود.

۴.۴ تعیین ضریب حاشیه‌ی ایمنی به کمک شبکه‌ی عصبی یکی از پارامترهای مهم در بحث ایمنی راکتورهای هسته‌ای، ضریب حاشیه‌ی ایمنی است. با لحاظ کردن این پارامتر، شار راکتور محدود می‌شود و راکتور به ناحیه‌ی جوشش هسته‌ای وارد نمی‌شود. اضافه کردن نانوذره به سیال، باعث تغییر در سطح خنک‌شونده می‌شود و مقدار این پارامتر را تغییر می‌دهد. با اضافه شدن ذرات نانو به داخل خنک‌کننده، مقدار این کمیت کاهش یافته است، ولی نه به مقدار قابل توجهی که استفاده از آنها را غیرقابل قبول کند. نکته‌ی دیگر این که کاهش ضریب حاشیه‌ی ایمنی نانوسیال را می‌توان با افزایش کسر حجمی و کاهش اندازه ذرات نانو تا حدی برطرف ساخت. از آن‌جا که برداشت حرارت با افزایش میزان نانوسیال به علت بالا رفتن ضریب هدایت گرمایی افزایش می‌یابد، ضریب حاشیه‌ی ایمنی نیز افزایش می‌یابد، چون سطح خنک‌تر شده و از ناحیه‌ی جوشش فیلمی فاصله گرفته شده است. از طرفی با افزایش قطر نانوذره، برداشت حرارت کاهش، و به همین دلیل خنک‌کاری سطح ضعیف‌تر می‌شود و فاصله از ناحیه‌ی جوشش هسته‌ای کاهش، و ضریب حاشیه‌ی ایمنی کاهش می‌یابد. تأثیر نانوسیال بر ضریب حاشیه‌ی ایمنی با استفاده از شبکه‌ی عصبی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳. تأثیر نانوسیال بر ضریب حاشیه‌ی ایمنی با استفاده از شبکه‌ی عصبی.

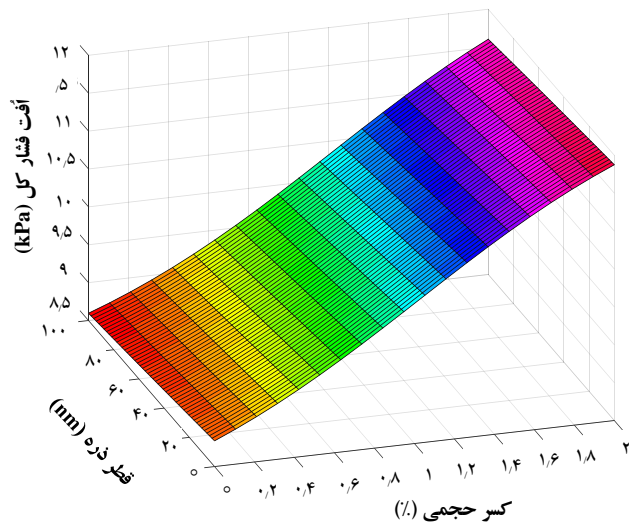
۵.۴ تعیین اُفت فشار به کمک شبکه‌ی عصبی



قابل قبول است، از این رو می‌توان به شبکه‌ی عصبی اطمینان داشت و از آن برای انجام محاسبات ترموهیدرولیکی استفاده کرد. این شبکه‌ی عصبی می‌تواند باعث صرفه‌ی اقتصادی و زمانی در تعیین پارامترهای ترموهیدرولیکی شود، نیاز به شبیه‌سازی‌های پیچیده و اجزای طولانی را برطرف سازد و باعث افزایش سرعت محاسبات ترموهیدرولیکی شود.

۸.۴ درصد و اندازه‌ی بهینه‌ی نانوذره

به منظور بررسی درصد حجمی و اندازه‌ی بهینه‌ی نانوسیال از شبکه‌ی عصبی به عنوان الگوی رفتاری پارامترهای قلب راکتور استفاده شد. در حقیقت برای بهینه‌سازی، بین الگوریتم ژنتیک و شبکه‌ی عصبی ارتباط برقرار شد، که الگوریتم ژنتیک برای محاسبه‌ی پارامترهای راکتور با فراخوانی شبکه‌ی عصبی ارزیابی را انجام می‌داد. با توجه به تابع هزینه‌ی در نظر گرفته شده، الگوریتم ژنتیک درصد حجمی ۱/۳۵٪ و قطر ۳۵nm را برای کارکرد بهینه راکتور پیشنهاد می‌کند. جدول ۴، مقدار پارامترهای راکتور در این شرایط را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. تأثیر نانوسیال بر افت فشار با استفاده از شبکه‌ی عصبی.

جدول ۲. ارزیابی شبکه‌ی عصبی با کد WIMS و CITATION

درصد حجمی (%)	خروجی کد CITATION	خروجی شبکه‌ی عصبی	درصد خطای شبکه‌ی عصبی
۰,۳۳	K=۱,۲۲۲۷	K=۱,۲۲۳۱	۰,۳۲۷۱
۰,۴۶	K=۱,۲۲۱۷	PPF=۱,۷۶۰۸	۰,۵۱۱۳
۰,۶۷	K=۱,۲۲۰۲	K=۱,۲۲۲۱	۰,۳۲۷۴
۱,۲۵	PPF=۱,۷۴۶۵	PPF=۱,۷۵۶۱	۰,۵۱۲۷
۱,۸۵	K=۱,۲۱۰۷	K=۱,۲۲۰۵	۰,۴۰۹۷
	PPF=۱,۶۸۸۷	PPF=۱,۷۴۳۸	۱,۴۵۴
		K=۱,۲۱۳۷	۰,۶۵۸۷
		PPF=۱,۷۱۸۴	۰,۵۲۳۷
		K=۱,۲۱۰۱	۰,۴۹۵۵
		PPF=۱,۶۸۵۴	۱,۹۵۴

جدول ۳. ارزیابی شبکه‌ی عصبی با کد FLUENT

درصد حجمی (%) قطر نانوذره (nm)	خروجی کد FLUENT	خروجی شبکه‌ی عصبی	خطای شبکه‌ی عصبی %
۰,۳۳	h=۶۲۷۲۱	h=۶۲۹۵۴	۰,۳۷۱۴
۰,۴۶	MDNBR=۱,۹۳۵۴	MDNBR=۱,۹۳۵۹	۰,۲۱۲۴
۰,۶۷	TDP=۹۱۴,۱۲	TDP=۹۰۸,۵۰	۰,۶۱۴۸
۱,۲۵	h=۶۵۳۰۸	h=۶۵۹۵۴	۰,۹۸۹۱
۱,۸۵	MDNBR=۱,۹۳۶۵	MDNBR=۱,۹۳۶۰	۰,۲۶۸۳
	TDP=۹۳۲,۸۱	TDP=۹۱۸,۴۵	۰,۵۳۶۴
	h=۶۹۰۸۱	h=۶۹۹۱۲	۰,۷۶۸۶
	MDNBR=۱,۹۳۶۹	MDNBR=۱,۹۳۶۳	۰,۳۲۴۹
	TDP=۹۷۲,۵۱	TDP=۹۲۸,۳۱	۴,۵۲۶
	h=۸۱۶۰۱	h=۸۱۰۱۸	۰,۷۱۴۴
	MDNBR=۱,۹۳۷۱	MDNBR=۱,۹۳۷۸	۰,۷۲۲۵
	TDP=۹۶۱,۴۷	TDP=۹۸۴,۲۵	۲,۳۹۳
	h=۸۹۱۴۹	h=۸۹۷۶۵	۰,۷۱۴۴
	MDNBR=۱,۹۶۴۵	MDNBR=۱,۹۷۵۵	۰,۷۲۲۵
	TDP=۱۱۸۲,۵	TDP=۱۱۵۶,۱	۲,۳۹۳

جدول ۴. مقادیر بهینه‌ی تعیین شده به وسیله‌ی الگوریتم ژنتیک

پارامترهای ترموهیدرولیکی	پارامترهای نوترونیکی	درصد حجمی قطر نانوذره
h=۶۲۷۲۱	K=۱,۲۲۰۲	۱/۳۵٪
MDNBR=۱,۹۳۷۱	PPF=۱,۷۴۶۵	۳۵ nm
TDP=۹۱۴,۱۲		

۵. نتیجه‌گیری

۷.۴ ارزیابی شبکه‌ی عصبی با نرم‌افزار ترموهیدرولیکی فلوئنت برای اطمینان بیشتر از دقت و کارکرد شبکه‌ی عصبی، چند نمونه‌ی خروجی نرم‌افزار فلوئنت و خروجی شبکه‌ی عصبی مقایسه و ارزیابی شدند. برای این کار از داده‌های خارج از نمونه‌های داده شده برای آموزش شبکه‌ی عصبی استفاده شد. همان‌طور که در جدول ۳ دیده می‌شود، برای درصدهای حجمی و اندازه‌ی ذرات گوناگون، پارامترهای ضریب انتقال حرارت، ضریب حاشیه‌ی ایمنی و اُفت فشار کلی توسط فلوئنت و شبکه‌ی عصبی تعیین شده‌اند. خطای شبکه‌ی عصبی در تعیین این پارامترها بسیار کم و



ϕ	درصد حجمی
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه
K	ظرفیت هدایت حرارتی
D	قطر
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رینولدز
α	ضریب پخش حرارتی
k_b	ثابت بولتزمن
τ	تانسور تنش
q	گرما
h	ضریب انتقال حرارتی جابه‌جایی
A	سطح
G, m	فلوی جرمی
T	دما
μ	لزجت دینامیکی
δ	فاصله‌ی بین مرکز نانوذرات
V_b	سرعت براونی
P	فشار
H	آنتالپی
λ	مسافت آزاد میانگین

پی‌نوشت‌ها

1. Smearing
2. Unsmearing
3. User Defined Function (UDF)
4. Over Fitting
5. Number of Function Evaluation (NFE)
6. Local Power Density (LPD)

در این مقاله، برای مجتمع سوخت حلقوی به همراه نانوسیال آب/آلومینا با استفاده از کدهای شبیه‌ساز، مدل‌سازی و محاسبات نوترونیکی و ترموهیدرولیکی انجام شد. اما استفاده از کدهای شبیه‌ساز نیازمند صرف هزینه‌های اقتصادی و زمانی است. بنابراین در این مقاله، با نمونه‌گیری از کدهای شبیه‌سازی برای غلظت‌ها و اندازه‌های مختلف نانوذره و آموزش شبکه‌ی عصبی با استفاده از این نمونه‌ها، پارامترهای نوترونیکی و ترموهیدرولیکی در راکتورهای هسته‌ای به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی طراحی شده برای هر غلظت و اندازه‌ی دیگر از نانوسیال تعیین شدند. به همین منظور، یک شبکه‌ی عصبی چند لایه‌ی مناسب در نرم‌افزار متلب با ورودی درصد حجمی و اندازه‌ی نانوذره و خروجی‌های ضریب تکثیر مؤثر، ضریب بیشینه توان تولیدی، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، MDNBR و اُفت فشار آموزش داده شد. با استفاده از این شبکه‌ی عصبی می‌توان بدون نیاز به کدهای شبیه‌ساز، پارامترهای بیان شده را برای هر غلظت حجمی و اندازه از نانوسیال به دست آورد و باعث صرفه‌ی اقتصادی و زمانی در این زمینه شد. نتایج حاصل از این مقاله نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که شبکه‌ی عصبی آموزش داده شده دارای هم‌گرایی مناسب و دقت کافی در تعیین پارامترهای ذکر شده است. در پایان درصد حجمی و اندازه‌ی بهینه‌ی نانوذره که بتواند ضریب انتقال حرارت و حاشیه‌ی ایمنی را افزایش دهد، در حالی که اُفت فشار، کاهش ضریب تکثیر و فاکتور بیشینه توان تولیدی کم‌تری ایجاد کند، به کمک الگوریتم ژنتیک تعیین شد.

مراجع

[1] K.H. Han, S.H. Chang, Development of a thermal-hydraulic analysis code for annular fuel assemblies, *Nuclear Engineering and Design* **226** (2003) 267-275.

[2] Y.S. Yang, C.H. Shin, T.H. Chun, K.W. Song, Evaluation of a dual-cooled annular fuel heat split and temperature distribution, *Nucl. Sci. Tech.* **46** (2009) 836-845.

پیوست ۱: واژه‌نامه (پارامترهای به کار رفته در مقاله)

نماد	مفهوم
CHF	شار حرارتی بحرانی
F	سیال
N	نانو
ρ	چگالی



- 1000 nuclear reactor with dual cooled annular fuel, *Annals of Nuclear Energy* **87** (2016) 39-47.
- [9] K. Hadad, A. Hajizadeh, K. Jafarpour, B. Ganapol, Neutronic study of nanofluids application to VVER-1000, *Ann. Nucl. Energy* **37** (2010) 1447-1455.
- [10] J. Donnelly, A user's manual for the Chalk River version of WIMS, Atomic Energy of Canada Limited, (1986).
- [11] T. Fowler, D. Vondy, NUCLEAR REACTOR CORE ANALYSIS CODE: CITATION, Oak Ridge National Lab. Tenn (1969).
- [12] C.H. Shin, T.H. Chun, D.S. Oh, W.K. In, Thermal hydraulic performance assessment of dual-cooled annular nuclear fuel for OPR-1000, *Nucl. Eng. Des.* **243** (2012) 291-300.
- [13] X.Q. Wang, A.S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, *Therm. Sci.* **46** (2007) 1-19.
- [14] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *Heat Mass Transfer* **43** (2000) 3701-3707.
- [15] C.H. Chon, K.D. Kihm, S.P. Lee, S.U. Choi, Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al_2O_3) thermal conductivity enhancement, *Appl. Phys. Lett.* **87** (2005) 107-123.
- [16] H.A. Mintsa, G. Roy, C.T. Nguyen, D. Doucet, New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids, *Therm. Sci.* **48** (2009) 363-371.
- [17] N. Masoumi, N. Sohrabi, A. Behzadmehr, A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids, *Appl. Phys.* **42** (2009) 5501-5508.
- [3] M. Kazimi, P. Hejzlar, Evaluation of high power density annular fuel for Korean OPR-1000 reactor: final report, Internal Report (2010).
- [4] S.U. Choi, Nanofluids: from vision to reality through research, *Heat Transfer* **131** (2009) 83-106.
- [5] M. Assael, C.F. Chen, I. Metaxa, W. Wakeham, Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water, *Thermophysics* **25** (2004) 971-985.
- [6] S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzel, Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, *Heat Transfer* **125** (2003) 567-574.
- [7] K.H. Han, K.W. Seo, D.H. Hwang, S.H. Chang, Development of a thermal hydraulic analysis code for gas-cooled reactors with annular fuels, *Nucl. Eng. Des.* **236** (2006) 164-178.
- [8] G. Ansarifar, M. Ebrahimian, Design and neutronic investigation of the Nano fluids application to VVER-
- [18] M.M. El-Wakil, Powerplant technology: Tata McGraw-Hill Education (1988).
- [19] W. Jens, P. Lottes, Analysis of heat transfer, burnout, pressure drop and density data for high-pressure water, Argonne National Lab. (1951).
- [20] J.R. Lamarsh, Introduction to nuclear reactor theory: Addison-Wesley Reading, MA (1966).
- [21] I.H. Bae, M.G. Na, Y.J. Lee, G.C. Park, Calculation of the power peaking factor in a nuclear reactor using support vector regression models, *Ann. Nucl. Energy* **35** (2008) 2200-2205.

