



تعیین خمش مجتمع‌های سوخت در رآکتور VVER-۱۰۰۰ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و فرض خمش C شکل

جواد وثوقی^{*}، ناصر وثوقی^{ID}، علی اکبر صالحی^{ID}

گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۱۱۴-۱۴۵۶۵، تهران - ایران

*Email: javadvosoughi@energy.sharif.edu

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۷ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۶

چکیده

تغییر شکل عرضی مجتمع‌های سوخت تحت تأثیر بارهای مکانیکی، هیدرولیکی، حرارتی و تشعشعی در قلب رآکتور، خمش مجتمع سوخت نامیده می‌شود. این پدیده پیامدهای متفاوتی برای ایمنی رآکتور و بهره‌برداری از آن به دنبال دارد. تغییر فاصله موضعی بین مجتمع‌های سوخت ناشی از پدیده خمش منجر به یک اختلال نوترونی می‌شود که بر روی توزیع توان و عدم تقارن آن تأثیرگذار است. در این پژوهش سعی شده است با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و فرض خمش C شکل، درک مناسبی نسبت به الگوی خمش مجتمع‌های سوخت در قلب رآکتور VVER-۱۰۰۰ پیدا کرد. این کار براساس توزیع توان ناشی از وجود خمش مجتمع سوخت انجام خواهد شد. این مسئله به بهره‌بردار کمک خواهد کرد تا با دانستن الگوی خمش داخل قلب رآکتور، چیدمان سیکل بعدی را طوری طراحی کند تا از گسترش خمش و پیامدهای آن در سیکل‌های بعدی جلوگیری شود.

کلیدواژه‌ها: شبکه عصبی مصنوعی، خمش مجتمع سوخت، توزیع توان

Determining the fuel assemblies bowing of the VVER-1000 reactor by using an artificial neural network and C-shape bowing assumption

J. Vosoughi*, N. Vosoughi, A.K. Salehi

Department of Nuclear Engineering, Faculty of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O.BOX: 1114-14565, Tehran - Iran

Research Article

Received: 29.08.2023,

Revised: 24.10.2023,

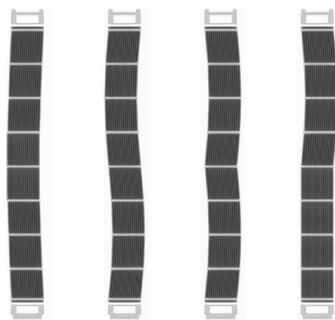
Accepted: 27.11.2023

Abstract

Fuel Assembly (FA) lateral deformation under mechanical, hydraulic, thermal, and radiation loads in the reactor core is referred to as FA bowing. This phenomenon has various implications for reactor safety and operation. Bowing results in a local change in distance between FAs, leading to a neutron perturbation that impacts power distribution and its symmetry. This study aims to determine the bowing pattern of FAs in the VVER-1000 reactor core using an artificial neural network and the assumption of C-shape bowing. This will be accomplished based on the power distribution resulting from the presence of FA bowing. Addressing this issue will assist operators in designing the arrangement of FAs in the next cycle by understanding the bowing pattern in the reactor core, thereby preventing the escalation of bowing and its consequences in subsequent fuel cycles.

Keywords: Artificial neural network, Fuel assembly bowing, Power distribution





شکل ۱. انواع تغییر شکل مجتمع سوخت در اثر خمش (C-S-B-P) [۴].

۱. مقدمه

مجتمع‌های سوخت تحت تأثیر بارهای مکانیکی، هیدرولیکی، حرارتی و تشعشعی موجود در قلب رآکتور، دچار تغییر شکل راستای عرضی می‌شوند. این تغییر شکل تحت عنوان خمش مجتمع سوخت مطرح می‌گردد که پیامدهای متفاوتی برای ایمنی رآکتور و همچنین بهره‌برداری از آن به دنبال دارد [۱]. به عنوان مثال وقوع خمش در مجتمع سوخت می‌تواند منجر به گیرکردن میله کنترل در کانال هادی هنگام بهره‌برداری و یا حادثه شود. از طرفی دیگر پدیده خمش باعث گیرکردن و جانرفتن مجتمع‌های سوخت در عملیات سوخت‌گذاری می‌شود. این اتفاق ضمن توقف عملیات سوخت‌گذاری می‌تواند منجر به آسیب مجتمع‌های سوخت در اثر برخورد با یکدیگر شود. از پیامدهای دیگر این پدیده اختلال در توزیع توان به دلیل تغییر فاصله بین مجتمع‌های سوخت به صورت موضعی می‌باشد که منجر به عدم تقارن در توزیع توان در قلب رآکتور می‌شود.

با توجه به پیامدهای پدیده خمش، پرداختن به این موضوع اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. به طور کلی هدف از مدل‌سازی و تحلیل پدیده خمش مجتمع‌های سوخت در قلب رآکتور را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود [۲]:

- تغییر، اصلاح و بهبود طراحی مجتمع سوخت برای کاهش میزان خمش تحت عوامل مؤثر که توسط طراح و سازنده مجتمع سوخت مورد توجه قرار خواهد گرفت.
- تغییر چیدمان مجتمع‌های سوخت قلب رآکتور با هدف جلوگیری از گسترش خمش در سیکل‌های آتی به منظور پیشگیری از پیامدهای عنوان شده که مورد توجه سازمان بهره‌برداری قرار می‌گیرد

نوع خمش یک مجتمع سوخت بسته به شرایط حاکم در قلب رآکتور و مکانیزم‌های دخیل در این فرایند می‌تواند به صورت C-S-B-P شکل باشد [۱]. اما عمده تغییر شکل در اثر خمش به صورت C شکل و S اتفاق می‌افتد [۱]. در شکل ۱ نمایی از انواع تغییر شکل در اثر پدیده خمش در مجتمع‌های سوخت نمایش داده شده است.

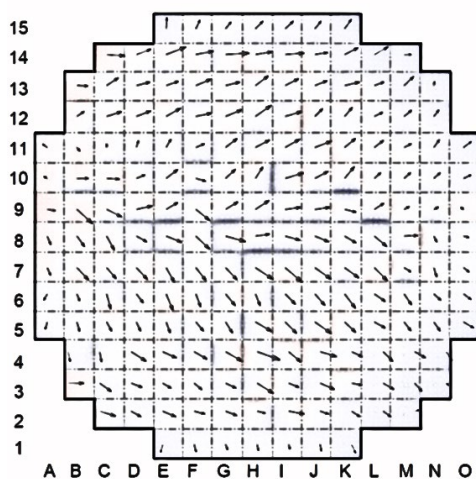
به طور کلی تحلیل خمش مجتمع‌های سوخت در قلب رآکتور با دو رویکرد متفاوت انجام می‌پذیرد. در رویکرد اول عوامل مؤثر در ایجاد خمش در نظر گرفته می‌شود و از محاسبات دینامیک سیالاتی بهره گرفته می‌شود. در این مورد می‌توان به پژوهش‌های Dressel در سال ۲۰۱۶ اشاره کرد [۳].

رویکرد دوم تحلیل پیامدهای خمش مجتمع سوخت می‌باشد که می‌توان به دو دسته تقسیم گردد. دسته اول به مدل‌سازی نیروهای وارد بر میله کنترل با در نظر گرفتن سطح تماس میله کنترل در کانال هادی مجتمع سوخت و شبیه‌سازی نیروی اصطکاک، جهت تعیین خمش می‌پردازد. در این مورد می‌توان به پژوهش Bosselut و همکاران در سال ۲۰۰۴ اشاره نمود [۵]. اما دسته دوم از این رویکرد مرتبط با فیزیک حاکم بر رآکتور است که مورد بحث این پژوهش می‌باشد. در این دسته سعی بر آن است تا از تأثیرات خمش مجتمع سوخت بر توزیع توان جهت تعیین الگوی خمش استفاده نمود. در این خصوص Dufek در سال ۲۰۱۷ با استفاده از مدل‌سازی‌های صورت گرفته تأثیر خمش بر توزیع قدرت در رآکتور KWU را مورد بررسی قرار داد [۴]. در پژوهش Rochman در سال ۲۰۱۷ تأثیر خمش مجتمع‌های سوخت بر روی توان و فرسایش سوخت در رآکتورهای PWR و BWR مورد بررسی قرار گرفت [۶]. همچنین مدل‌سازی تأثیر خمش روی توان به صورت یک عامل اصلاح بر روی سطح مقطع‌ها به عنوان ضرایب معادله پخش در پژوهش Yammaot در سال ۲۰۱۹، پیشنهاد شد [۷]. در این مدل به جای شبیه‌سازی صریح خمش مجتمع سوخت، سطح مقطع ماکروسکوپی در ناحیه مورد نظر تصحیح و توزیع توان بدون تغییر در هندسه محاسبه می‌شود. همچنین توسعه یک مدل محاسباتی برای شبیه‌سازی اثر خمش مجتمع سوخت رآکتور VVER-۱۰۰۰ بر توزیع توان براساس تصحیح سطح مقطع‌های ماکروسکوپی توسط نویسندگان مقاله حاضر انجام شده است [۸].

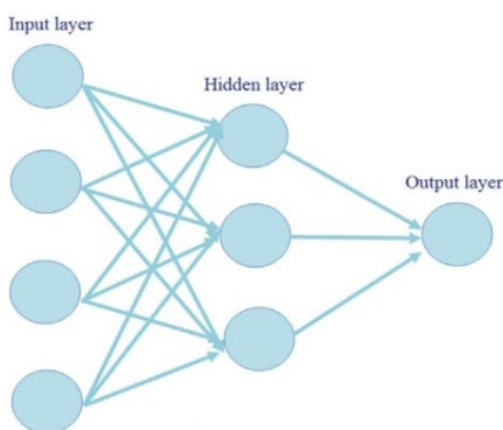
در پدیده خمش، تغییر فاصله بین سوخت‌ها در طول مجتمع سوخت بستگی به نوع خمش (به طور مثال C یا S شکل) دارد. بنابراین در ارتفاع‌های مختلف مجتمع سوخت در مقطعی فاصله بین سوخت‌ها کم‌تر، بدون تغییر و یا بیشتر می‌شود. به دلیل تغییر موضعی فاصله بین مجتمع‌های سوخت



به مقدار مطلوب به‌روزرسانی می‌کند تا نگرانی از ورودی به خروجی مسئله ارائه دهد. یک MLP^۱ ترکیب لایه‌ای از شبکه عصبی شامل لایه ورودی، لایه‌های مخفی و لایه خروجی می‌باشد. در شکل ۳ شمایی از یک MLP ارائه شده است. الگوریتم آموزش این شبکه از نوع خطای پس انتشار می‌باشد^۲ تا براساس آن تغییر وزن‌های شبکه به سمتی پیش برود که اختلاف بین خروجی شبکه با مقدار واقعی آن کاهش یابد [۱۰]. در ادامه این مقاله در بخش ۲ تولید داده‌های برای آموزش شبکه عصبی و در بخش ۳ ساختار شبکه عصبی و آموزش آن بحث می‌شود. در بخش ۴ خروجی شبکه به منظور اطمینان از عملکرد آن اعتبارسنجی می‌شود و در نهایت در بخش ۵ جمع‌بندی ارائه می‌گردد.



شکل ۲. از الگوی خمشی در یک رآکتور PWR [۶].



شکل ۳. شمایی از یک MLP.

در ارتفاع‌های مختلف، عملاً یک اختلال نوترونیک ایجاد می‌گردد به طوری که افزایش فاصله بین مجتمع‌های سوخت به صورت موضعی، منجر به افزایش موضعی مقدار آب به عنوان کندکننده می‌شود. افزایش نرخ کندکنندگی منجر به افزایش شار حرارتی و در نتیجه افزایش موضعی توان خواهد شد. اما از طرف دیگر افزایش مقدار آب، احتمال جذب نوترون در آن را بالا می‌برد که این اتفاق خود می‌تواند منجر به کاهش شار و در نتیجه کاهش توان گردد. برای یک سوخت نوعی تأثیر این دو اتفاق بر کاهش یا افزایش توان به غلظت اسید بوریک به عنوان جاذب نوترون و ابزار کنترل راکتیویته و همچنین گام شبکه بستگی دارد [۹].

همچنین در اثر پدیده خمشی یک اختلال ترموهیدرولیکی نیز ایجاد می‌شود که در آن افزایش موضعی سیال منجر به بهبود برداشت حرارت از سوخت و در نتیجه کاهش دمای سوخت خواهد شد که به دلیل پدیده داپلر با فیدبک دمایی منفی، باعث تزریق راکتیویته مثبت به سیستم می‌گردد [۹].

پدیده خمشی مجموعه‌ای از مجتمع‌های سوخت در قلب رآکتور را شامل می‌گردد و صرفاً معطوف به یک مجتمع سوخت نیست. توزیع خمشی مجتمع‌های سوخت در قلب رآکتور تحت عنوان الگوی خمشی شناخته می‌شود. شکل ۲ نمایی از الگوی خمشی در یک رآکتور PWR را نشان می‌دهد. زاویه هر بردار جهت تغییر شکل مجتمع سوخت به آن سمت را نشان می‌دهد. همچنین اندازه هر بردار با میزان تغییر شکل مجتمع سوخت متناسب است [۶].

به طور کلی هدف اصلی در این پژوهش بررسی توزیع توان در رآکتور VVER-۱۰۰۰ به منظور تعیین خمشی مجتمع‌های سوخت در قلب رآکتور می‌باشد. به طوری که با داشتن توزیع توان و عدم تقارن ناشی از وجود خمشی مجتمع سوخت بتوان درکی نسبت به الگوی خمشی مجتمع‌های سوخت پیدا کرد. این مسئله در نهایت به بهره‌بردار کمک خواهد کرد تا با دانستن الگوی خمشی داخل قلب رآکتور، چیدمان سیکل بعدی را طوری طراحی کند تا از گسترش خمشی و پیامدهای آن در آینده جلوگیری شود.

در این پژوهش به منظور تعیین الگوی خمشی داخل قلب رآکتور براساس توان آشکارسازی شده، از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. شبکه عصبی مصنوعی با الهام از نرون عصبی، ورودی‌های متعددی را با اعمال وزن دریافت می‌کند و سپس با یک تابع تحریک مناسب، یک خروجی می‌دهد [۱۰]. شبکه عصبی در طول آموزش، وزن‌ها خود را به منظور رسیدن

1. Multi-Layer Perceptron

2. Error Back Propagation

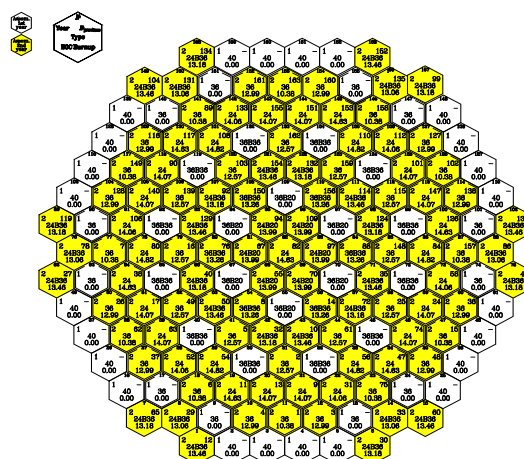


۲. تولید داده‌های آموزش

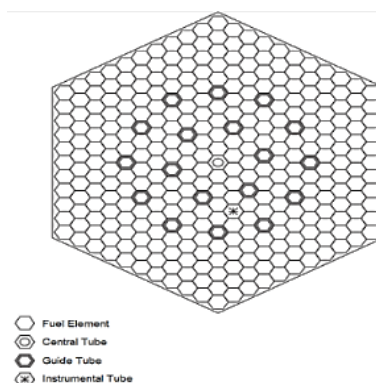
به منظور انجام پژوهش ابتدا باید داده‌های مورد نیاز برای آموزش شبکه عصبی تولید شود. این داده‌ها در واقع توزیع توان با وجود مجتمع‌های سوخت دارای خمش در قلب رآکتور می‌باشد که براساس محاسبات همبسته نوترونیک- ترموهیدرولیک تولید خواهد شد. سپس در رهیافتی معکوس با استفاده از شبکه عصبی براساس توزیع توان، خمش مجتمع‌های سوخت مشخص می‌شوند. که در آن توزیع توان به عنوان ورودی شبکه عصبی است و الگوی خمش مجتمع‌های سوخت خروجی آن می‌باشد.

به این منظور چیدمان نوعی قلب رآکتور VVER-۱۰۰۰ مطابق با شکل ۴ با در نظر گرفتن ۱۰ لایه در ارتفاع در نظر گرفته شده است [۱۱].

در شکل ۵ نیز نمایی از هندسه مجتمع سوخت VVER-۱۰۰۰ نشان داده شده است [۱۱]. این سوخت شامل ۳۱۱ میله سوخت UO_2 ، ۱۸ کانال هادی، ۱ حفره مرکزی و ۱ کانال اندازه‌گیری می‌باشد.

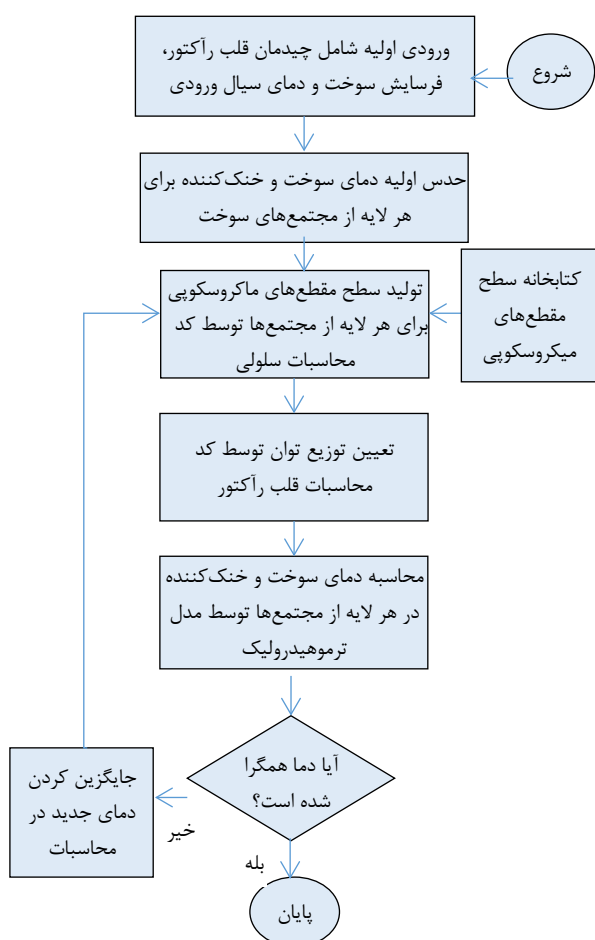


شکل ۴. چیدمان قلب رآکتور VVER-۱۰۰۰.



شکل ۵. نمایی از مجتمع سوخت رآکتور VVER-۱۰۰۰.

برای انجام محاسبات از همبسته‌سازی کدهای محاسبات سلولی، محاسبات قلب رآکتور و محاسبات ترموهیدرولیک استفاده شده است. که در آن برای انجام محاسبات سلولی جهت تولید سطح مقطع‌های نوترونی کد DRAGON به کار گرفته شده است. کد DRAGON یک کد محاسبات سلولی شامل مجموعه‌ای از روش‌های شبیه‌سازی رفتار نوترونی میله و یا مجتمع سوخت رآکتور هسته‌ای می‌باشد که اولین نسخه آن در سال ۱۹۹۱ توسط Alain Hebert و همکاران در دانشگاه صنعتی مونترال کانادا توسعه داده شد است [۱۲]. برای انجام محاسبات قلب رآکتور از کد PARCS استفاده شده است که یک کد محاسبات قلب رآکتور است که اولین نسخه آن در سال ۱۹۹۸ و در دانشگاه Purdue توسعه داده شده است [۱۳]. این کد توانایی انجام محاسبات سه‌بعدی قلب رآکتور در حالت‌های پایا و وابسته به زمان را دارد. از کد COBRA-EN نیز برای انجام محاسبات ترموهیدرولیک جهت تعیین توزیع دمای سوخت و خنک‌کننده در مجتمع‌های سوخت استفاده شده است [۱۴]. شکل ۶ الگوریتم محاسبات قلب رآکتور را نشان می‌دهد [۱۵].



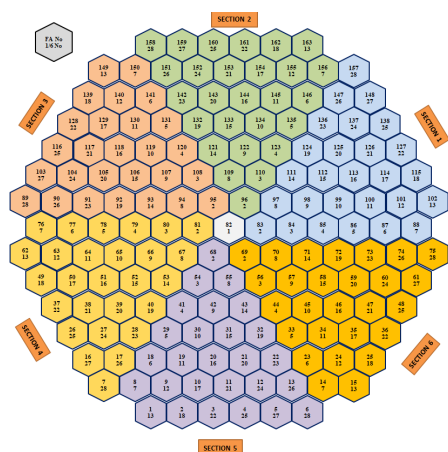
شکل ۶. الگوریتم محاسبات قلب رآکتور.



همان‌طور که عنوان شد هدف اصلی پژوهش دستیابی به ابزاری است که بتواند الگوی خمش داخل قلب را تعیین نماید. به منظور ورود به این پژوهش و درکی مناسب نسبت به موضوع لازم است تا ابتدا از فرض‌های ساده شونده استفاده شود تا در مراحل بعدی ابزار جامع‌تری توسعه یابد.

از پارامترهای موجود در مسئله، موقعیت اندازه‌گیری توان در نقاط مختلف قلب رآکتور است که به عنوان ورودی شبکه عصبی می‌باشد. در قلب رآکتور VVER-1000 تعداد ۵۴ مجتمع سوخت در ۷ لایه ارتفاع دارای آشکارساز می‌باشد. همچنین خروجی مسئله معکوس تعیین الگوی خمش است که نیازمند تعیین جهت‌گیری و اندازه خمش در هر مجتمع است. این مسئله برای هر شکل از خمش S, C و ... وجود خواهد داشت. با توجه به حجم بالای پارامترها و حالت‌های ممکن به منظور تولید داده‌های مورد نیاز شبکه، آموزش آن و حل مسئله با دقت مطلوب و زمان مناسب، مفروضات زیر جهت ساده‌سازی و حل مسئله معکوس در نظر گرفته شده است.

- حل مسئله معکوس برای ابتدای سیکل چیدمان شکل ۴ و میله‌های کنترل خارج از قلب در نظر گرفته شده است.
- حل مسئله معکوس فقط برای خمش C شکل انجام گرفته شده است.
- با توجه به این که بیشترین تأثیر خمش در عدم تقارن توان در قسمت پیک تغییر شکل مجتمع سوخت است، توان آشکارساز فقط در لایه وسط قلب رآکتور به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود.
- قلب رآکتور به ۶ قسمت تقسیم شده و برای هر قسمت میانگین اندازه خمش مجتمع‌های سوخت و جهت‌گیری آن تعیین می‌گردد. خروجی شبکه عصبی میانگین اندازه خمش و جهت‌گیری آن در هر ۱/۶ قلب رآکتور می‌باشد. بنابراین برای حل مسئله معکوس قلب رآکتور به ۶ بخش تقسیم شده است که در شکل ۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۷. تقسیم‌بندی قلب رآکتور به ۶ بخش.

با به‌کارگیری الگوریتم شکل ۶ در یک حلقه بزرگ‌تر و حدس اولیه برای اسید بوریک و اصلاح آن در جهت صفر شدن راکتیویته (ضریب تکثیر مؤثر برابر با ۱)، محاسبات بحرانی انجام خواهد شد. همچنین این مجموعه با قرارگیری در حلقه محاسبات مصرف سوخت کل سیکل بهره‌برداری از قلب رآکتور را مدل‌سازی خواهد کرد [۱۵]. همان‌گونه که در الگوریتم مشخص است، خروجی مدل ترموهیدرولیک شامل دما سوخت و سیال، چگالی آب و ... جهت تولید مجدد سطح مقطع‌های ماکروسکوپی در اختیار کد محاسبات سلولی قرار می‌گیرد. بنابراین تأثیر دما بر سطح مقطع میکروسکوپی مواد تشکیل‌دهنده به ویژه سوخت در ناحیه تشدید U_{238} و همچنین تأثیر دما و چگالی مواد در تولید سطح مقطع ماکروسکوپی لحاظ می‌گردد. لازم به ذکر است برای این پژوهش الگوریتم شکل ۶ با استفاده از کدهای PARCS, DRAGON و COBRA-EN در نرم‌افزار متلب همبسته شده است.

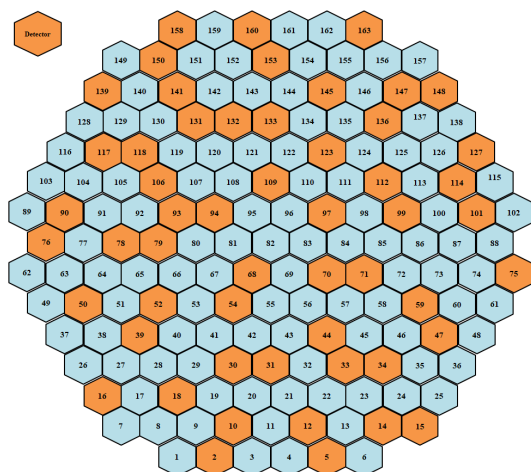
در بعضی مسائل برای انجام تحلیل‌های خاص برای رآکتور نوعی، کتابخانه‌ای مرتبط برای سطح مقطع‌ها ماکروسکوپی وجود ندارد و بنابراین لازم است محاسبات سلولی انجام شود. به عنوان مثال انجام محاسبات در تعداد گروه مشخص انرژی برای رآکتور خاص، بررسی نوین نوترونی ناشی از نوسان مجتمع‌های سوخت [۱۶] و یا توزیع نامتقارن سیال اطراف یک مجتمع سوخت در اثر خمش [۸]، از این دست مسائل هستند. با توجه به حجم محاسبات سلولی در مدل‌سازی قلب رآکتور از یک شبکه عصبی مصنوعی به جای اجرای کد محاسبات سلولی در الگوریتم شکل ۶ استفاده شده است. لازم به ذکر است نتایج خروجی این شبیه‌ساز در پژوهش‌های قبلی ارائه و مورد راستی‌آزمایی قرار گرفته است [۱۷]. که در آن غلظت اسید بوریک بحرانی، طول سیکل و همچنین توزیع توان در ابتدا، وسط و انتهای سیکل با مقادیر مرجع مقایسه شده است.

همچنین تأثیر خمش به صورت تصحیح سطح مقطع‌های ماکروسکوپی براساس یک مدل محاسباتی توسعه داده شده توسط نویسندگان مقاله حاضر برای شبیه‌سازی اثر خمش مجموعه سوخت رآکتور VVER-1000 بر توزیع توان، انجام شده است [۸]. در رآکتور VVER-1000 نوعی فیدبک ناشی از تغییر کندکننده از مرتبه 10^{-3} و فیدبک‌های دمایی سوخت و سیال از مرتبه 10^{-5} می‌باشد، در نتیجه اختلال نوترونیک ایجاد شده در اثر خمش مجتمع‌های سوخت از اختلال ترموهیدرولیک بزرگ‌تر است [۱۱]. بنابراین در این شبیه‌سازی صرفاً تأثیر خمش روی سطح مقطع‌ها و در نتیجه توزیع توان دیده شده است که در مدل ترموهیدرولیک اعمال می‌گردد.

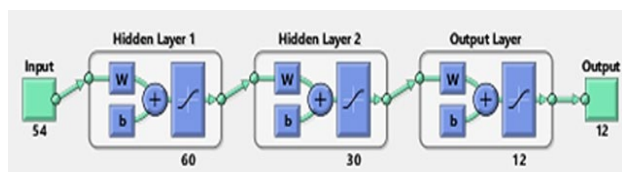


۶ بخش قلب رآکتور، جهت آموزش در اختیار یک شبکه با ساختار MLP ۳ لایه به صورت شکل ۹ قرار گرفت. ساختار این شبکه عصبی به صورت ۵۴ ورودی، ۶۰ نرون در لایه مخفی اول، ۳۰ نرون در لایه مخفی دوم و در نهایت ۱۲ خروجی طراحی شده است. لازم به ذکر است که به این منظور از ابزار شبکه عصبی نرم‌افزار متلب استفاده شده است که در آن ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش، ۱۵٪ برای تست و ۱۵٪ برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شده است. انتخاب این ساختار شبکه با توجه به نوع مسئله براساس تجربیات موجود در کارهای مشابه بوده است. توسعه ابزار ارائه شده با دقت مطلوب در کنار زمان محاسبات قدم اول پژوهش است. بهینه‌سازی این ابزار چه با فرض‌های ساده‌شونده و چه به صورت جامع در کارهای آینده بررسی خواهد شد.

پس از آموزش شبکه فوق میانگین مربعات خطا^۱ در آموزش این شبکه از مرتبه ۵-۱۰ به‌دست آمده و همچنین میزان رگرسیون ۹/۹۹۹ حاصل شد.



شکل ۸. موقعیت مجتمع‌های سوخت دارای آشکارساز.



شکل ۹. ساختار MLP مورد استفاده برای اندازه خمش و جهت آن.

با توجه به پارامترهای دخیل در مسئله و پیچیدگی آن برای تولید داده‌های آموزش، فرض می‌شود میانگین زاویه خمش در هر بخش یکی از ۶ حالت ۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۰۰ می‌باشد که در جهات عمود بر اضلاع مجتمع سوخت است. با توجه به این که برای هر بخش میانگین اندازه خمش در نظر گرفته می‌شود و فقط در حالتی این میانگین می‌تواند صفر باشد که همه مجتمع‌های آن بخش سوخت تازه باشند، در نتیجه حداقل میانگین اندازه خمش باید در نظر گرفته شود [۱۸]. زیرا مطابق شکل ۴ در این مسئله سوخت‌هایی با ۱ سال بهره‌برداری در قلب رآکتور وجود دارند. بنابراین میانگین اندازه خمش در هر بخش از ۱ میلی‌متر تا ۲/۵ میلی‌متر با گام‌ها ۰/۱ میلی‌متر انتخاب شده است.

برای جهت خمش ۶ حالت در نظر گرفته شده است که هر یک از ۶ بخش می‌تواند اختیار کند. به عبارتی مجموعاً ۶۶ حالت ممکن وجود دارد. از طرفی دیگر ۱۵ حالت برای اندازه خمش در هر بخش که خود ۱۵۶ حالت ممکن ایجاد می‌کند. در نهایت برای جهت و اندازه ۹۰۶ حالت ممکن وجود دارد. در نهایت از بین حالت موجود تعداد ۲۰۰۰۰ دسته داده به صورت تصادفی انتخاب شدند. هر دسته داده شامل اندازه خمش و جهت آن در هر بخش به عنوان ورودی به شبیه‌ساز داده شد تا توزیع توان مرتبط با آن محاسبه شود. تولید این تعداد داده آموزش برای شبکه عصبی توسط شبیه‌ساز توسعه داده شده به صورت محاسبات موازی در ۵ روز بر روی ۴ هسته محاسباتی انجام شده است.

۳. ساختار شبکه عصبی و آموزش آن

پس از تولید داده‌های آموزش شبکه عصبی به صورت تصادفی براساس پیکربندی‌های مختلف خمش داخل قلب رآکتور، در این قسمت دسته داده‌ها در اختیار شبکه عصبی قرار می‌گیرد. لازم به یادآوری است که در این داده‌ها خمش و جهت آن در هر بخش به عنوان ورودی به شبیه‌ساز داده شده بود تا توزیع توان مرتبط با آن محاسبه شود. از آنجایی که آشکارسازهای داخل قلب رآکتور محدود و پراکنده هستند بنابراین فقط از اطلاعات ۵۴ مجتمع سوخت دارای آشکارساز استفاده می‌شود. در شکل ۸ موقعیت مجتمع‌های سوخت دارای آشکارساز با رنگ نارنجی مشخص شده است [۱۱].

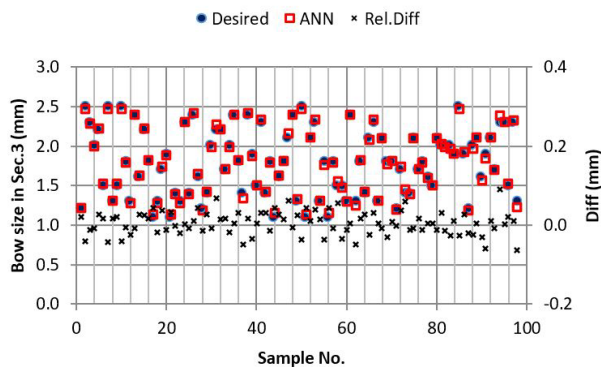
در ادامه این ۲۰۰۰۰ دسته داده شامل ۵۴ ورودی از توان آشکارسازهای قلب رآکتور در ابتدای سیکل برای لایه وسطی و ۱۲ خروجی شامل میانگین اندازه خمش و جهت‌گیری آن در هر



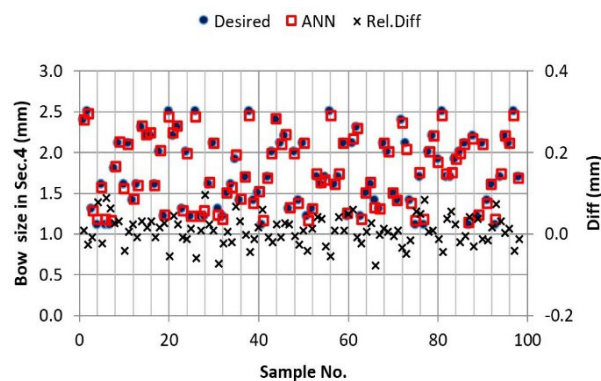
۴. بررسی عملکرد شبکه عصبی

جهت بررسی عملکرد خروجی شبکه عصبی، تعداد ۱۰۰ دسته داده به صورت تصادفی انتخاب گردید و برای هر کدام خروجی شبکه عصبی با مقدار واقعی آن مقایسه شد. لازم به ذکر است منظور از داده‌های واقعی همان اندازه خمش و جهت آن در هر بخش است که به عنوان ورودی به شبیه‌ساز داده شد تا توزیع توان مرتبط با آن محاسبه شود. خروجی شبکه عصبی نیز اندازه خمش و جهت آن در هر بخش است که توسط شبکه عصبی براساس آموزش آن و با توجه به توزیع توان دریافتی، تعیین می‌شود.

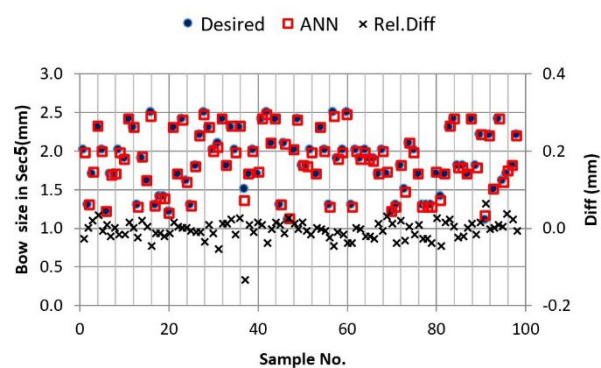
شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ میانگین اندازه خمش در هر بخش از قلب راکتور که توسط شبکه عصبی تعیین شده است و همچنین اختلاف آن با مقدار واقعی را نشان می‌دهد.



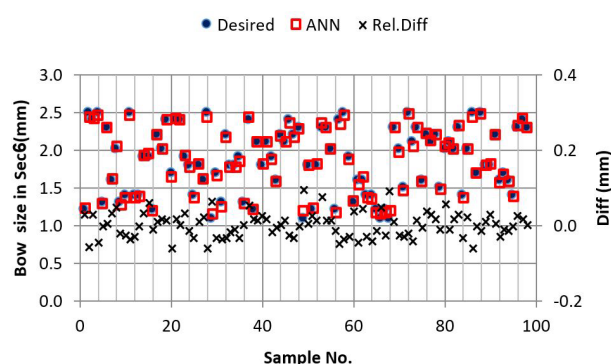
شکل ۱۲. میانگین اندازه خمش در بخش ۳ قلب راکتور.



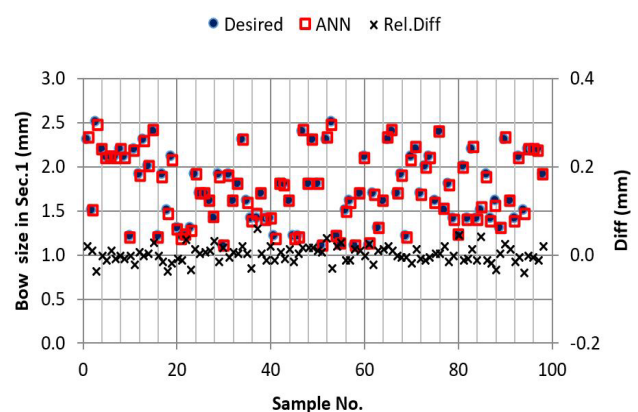
شکل ۱۳. میانگین اندازه خمش در بخش ۴ قلب راکتور.



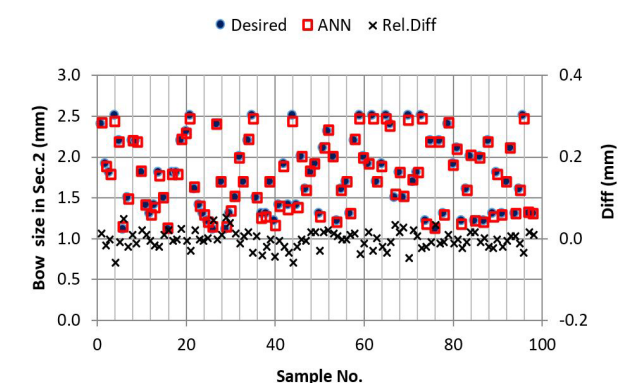
شکل ۱۴. میانگین اندازه خمش در بخش ۵ قلب راکتور.



شکل ۱۵. میانگین اندازه خمش در بخش ۶ قلب راکتور.

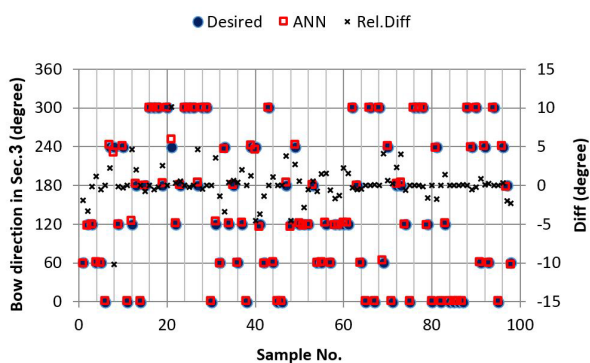


شکل ۱۰. میانگین اندازه خمش در بخش ۱ قلب راکتور.

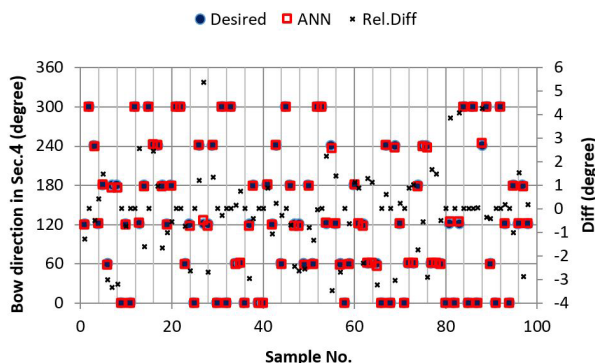


شکل ۱۱. میانگین اندازه خمش در بخش ۲ قلب راکتور.

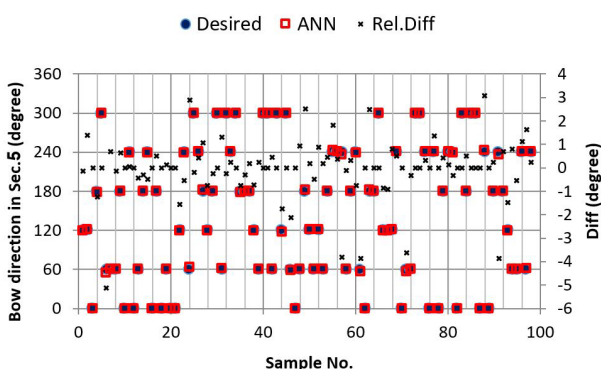




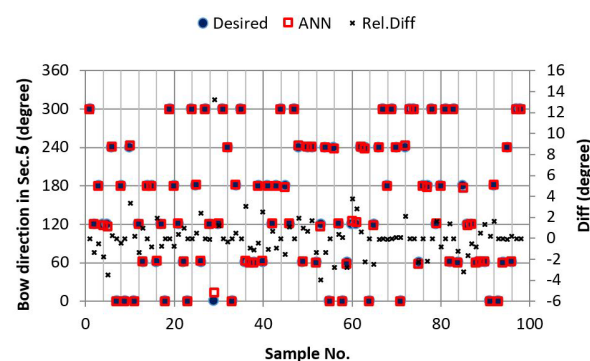
شکل ۱۸. میانگین زاویه خمش در بخش ۳ قلب رآکتور.



شکل ۱۹. میانگین زاویه خمش در بخش ۴ قلب رآکتور.



شکل ۲۰. میانگین زاویه خمش در بخش ۵ قلب رآکتور.



شکل ۲۱. میانگین زاویه خمش در بخش ۶ قلب رآکتور.

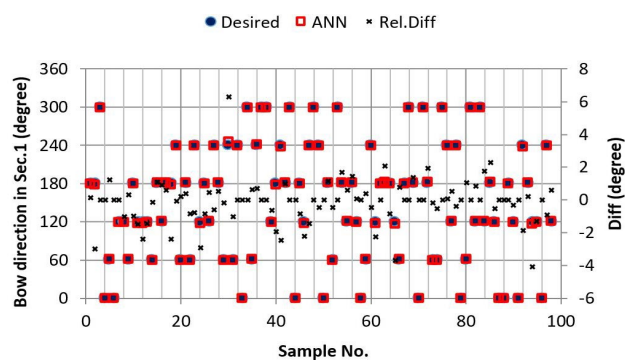
همچنین در جدول ۱ میانگین قدر مطلق اختلاف خروجی شبکه عصبی و بیشینه اختلاف آن با مقدار واقعی برای اندازه خمش در هر بخش آورده شده است.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود میانگین قدر مطلق اختلاف اندازه خمش در همه بخش‌های قلب رآکتور کمتر از ۰/۰۳ میلی‌متر می‌باشد. همچنین بیشینه اختلاف مربوط به بخش ۵ با مقدار ۰/۱۳ میلی‌متر است. همچنین شکل‌های ۱۶ تا ۲۱ میانگین زاویه خمش در هر بخش از قلب رآکتور که توسط شبکه عصبی تعیین شده است و همچنین اختلاف آن با مقدار واقعی را نشان می‌دهد.

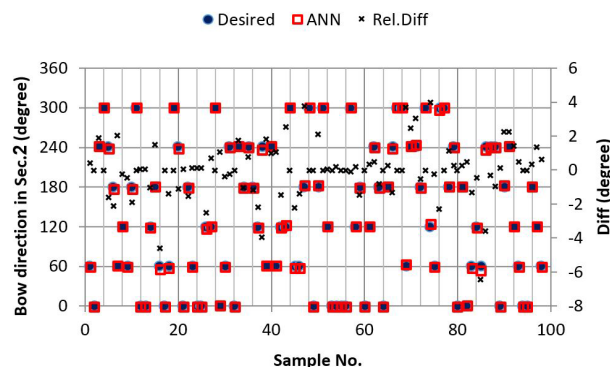
همچنین در جدول ۲ میانگین قدر مطلق اختلاف خروجی شبکه عصبی و بیشینه اختلاف آن با مقدار واقعی برای زاویه خمش در هر بخش آورده شده است.

جدول ۱. میانگین و بیشینه اختلاف اندازه خمش محاسبه شده توسط شبکه عصبی با مقدار واقعی

کمیت	میانگین قدر مطلق اختلاف (mm)	بیشینه اختلاف (mm)
اندازه خمش در قسمت ۱	۰/۰۲	۰/۰۶
اندازه خمش در قسمت ۲	۰/۰۲	۰/۰۶
اندازه خمش در قسمت ۳	۰/۰۳	۰/۰۹
اندازه خمش در قسمت ۴	۰/۰۲	۰/۰۹
اندازه خمش در قسمت ۵	۰/۰۱	۰/۱۳
اندازه خمش در قسمت ۶	۰/۰۲	۰/۰۹



شکل ۱۶. میانگین زاویه خمش در بخش ۱ قلب رآکتور.



شکل ۱۷. میانگین زاویه خمش در بخش ۲ قلب رآکتور.



محاسبه شده توسط شبکه عصبی با مقدار واقعی آن در همه بخش‌های قلب رآکتور کمتر از 0.3 میلی‌متر و بیشینه اختلاف 0.13 میلی‌متر به دست آمد. همچنین میانگین اختلاف زاویه خمش کمتر از 1.2 درجه و بیشینه اختلاف 13.2 درجه بود. بنابراین در این پژوهش با داشتن توزیع توان و عدم تقارن ناشی از وجود خمش C شکل مجتمع سوخت، به کمک شبکه عصبی درک مناسبی نسبت به الگوی خمش مجتمع‌های سوخت حاصل شد.

مراجع

1. Wanninger A. Mechanical Analysis of the Bow Deformation of Fuel Assemblies in a Pressurized Water Reactor Core. *PhD Thesis. Technische Universität München*. 2018.
2. Aleshin Y, Gabriellsson P. Bow evaluations to support fuel assembly design improvements. *Westinghouse Electric Company LLC. South Carolina*. 2018.
3. Dresssel B, Hazdic H. CDF Application for Nuclear Reactor Fuel Assembly Desing. *Fuel Mechanics Prague*. 2016.
4. Dufek J, Berger J. Impact of fuel assembly bowing on the power density distribution and its monitoring in Siemens/KWU PWR. *Master's Thesis. Royal Institue of Technology*. 2017.
5. Bosselut D, Andriambololona H. Insertion and Drop of Control Rod in Assembly Simulations and Parametric Analysis. *Département Mécanique Des Fluides et Transfert Thermique. Lyon*. 2004.
6. Rochman D, Mala P, Ferroukhi H. Bowing effects on power and burn-up distributions for simplified full PWR and BWR cores. *International Conference on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering. Jeju. Korea*. 2017.
7. Yamamoto A, Endo T, Nagano H, Ohoka Y. A simple treatment of increased gap due to fuel assembly bowing through correction of cross sections. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2019.
8. Vosoughi J, Vosoughi N, Salehi AA. Development of a calculation model to simulate the effect of bowing of the VVER-1000 reactor fuel assembly on power distribution. *Annals of Nuclear Energy*. 2023.
9. Bell G, Glasstone S. Nuclear Reactor Theory. *New York. Van Nostrand Reinhold Company*. 1970.
10. Haykin S. Neural Network Comprehensive Foundation. *Prentice Hall*. 2009.
11. Final Safety Analysis Report of BNPP-1. *2014*.
12. Marleau G. DRAGON theory manual. *Ecole Polytechnique de Montr'éal*. 2001.
13. Downar T. PARCS v3.0 U.S. NRC Core Neutronics Simulator. *University of Michigan*. 2009.

جدول ۲. میانگین و بیشینه اختلاف زاویه خمش محاسبه شده توسط شبکه عصبی با مقدار واقعی

کمیت	میانگین قدر مطلق اختلاف (degree)	بیشینه اختلاف (degree)
جهت خمش در قسمت ۱	۰.۸	۶.۲
جهت خمش در قسمت ۲	۱.۰	۶.۴
جهت خمش در قسمت ۳	۱.۲	۱۰.۱
جهت خمش در قسمت ۴	۱.۱	۵.۳
جهت خمش در قسمت ۵	۰.۷	۵.۱
جهت خمش در قسمت ۶	۱.۰	۱۳.۲

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود میانگین قدر مطلق اختلاف زاویه خمش در همه قسمت‌های قلب رآکتور کمتر از 1.2 درجه می‌باشد. همچنین بیشینه اختلاف مربوط به قسمت ۶ با مقدار 13.2 درجه است. با در نظر گرفتن اختلاف خروجی شبکه عصبی با مقدار واقعی آن، اندازه خمش مجتمع‌های سوخت و زاویه آن در هر بخش از قلب رآکتور با دقت مطلوبی معین شدند.

به‌طور قطع این شبکه قادر به تعیین خمش در تک‌تک مجتمع‌های سوخت نمی‌باشد. همان‌گونه که بیان شد این پژوهش به منظور ورود به موضوع و درکی مناسب نسبت به توسعه ابزار تعیین خمش انجام شده است. بنابراین لازم بود تا ابتدا از فرض‌های ساده شونده استفاده شود که یکی از مفروضات نیز در نظر گرفتن میانگین خمش متفاوت برای هر بخش است. در مراحل بعدی پژوهش ابزار جامع‌تری به منظور تعیین خمش هر سوخت و شکل خمش توسعه خواهد یافت.

۵. جمع‌بندی

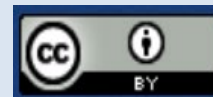
در این پژوهش سعی شد تا با داشتن عدم تقارن در توزیع توان به دلیل وجود خمش مجتمع‌های سوخت، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی درکی نسبت به الگوی خمش مجتمع‌های سوخت در رآکتور VVER-۱۰۰۰ پیدا کرد. برای ساده‌سازی قلب رآکتور به ۶ بخش تقسیم گردید و خمش C شکل در نظر گرفته شد. برای تولید تعداد ۲۰۰۰۰ دسته داده تصادفی جهت آموزش شبکه عصبی از شبیه‌ساز متناسب استفاده شد. در این داده‌ها میانگین اندازه خمش و جهت آن در هر بخش به عنوان ورودی به شبیه‌ساز داده شد تا توزیع توان مرتبط با آن محاسبه شود. از آنجایی که آشکارسازهای داخل قلب رآکتور محدود و پراکنده هستند بنابراین فقط از اطلاعات ۵۴ مجتمع سوخت دارای آشکارساز استفاده شد. میانگین اختلاف اندازه خمش



14. COBRA-EN code system for Thermal-Hydraulic Transient Analysis of Light Water Reactor Fuel Assemblies and Core. [Oak Ridge National Laboratory](#). 2001.
15. Duderstadt J, Hamilton L. Nuclear Reactor Analysis. JOHN WILEY & SONS. 1976.
16. Chionis D, Dokhane A. Development and verification of a methodology for neutron noise response to fuel assembly vibrations. [Annals of Nuclear Energy](#). 2020.
17. Vosoughi J, Vosoughi N, Salehi A.K. Using an artificial neural network in the generation of macroscopic cross-sections for the VVER-1000 reactor core calculations. [Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology](#). 2025;111(1):21-28 DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2023.1593> [In Persian].
18. IAEA-TECDOC-1454. Structural behaviour of fuel assemblies for water cooled reactors. In [Proceedings of a technical meeting](#). France. 2004.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

وژوقی، جواد، وژوقی، ناصر، صالحی، علی‌اکبر. (۱۴۰۴)، تعیین خمش مجتمع‌های سوخت در رآکتور VVER-۱۰۰۰ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و فرض خمش C شکل. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۱۲ (۲)، ۴۸-۳۹. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2023.1616>
 Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1616.html

