



طراحی نوترونیکی مجتمع سوختی و قلب راکتور آب سنگین در توانهای کاری و ساختارهای هندسی مختلف (شش ضلعی و مربعی)

یاشار رحمانی*^(۱)، صابر خواجهیان^(۱)، زهرا پاکزاد اصل^(۱)

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری، دانشکده فنی و مهندسی، گروه فیزیک

چکیده:

هدف از ارائه این مقاله نه فقط تشریح حالتی خاص از طراحی، بلکه ارائه نقشه راهی در راستای طراحی مجتمعهای سوختی و قلب راکتور آب سنگین در حالات هندسی و ابعاد مختلف بود. بدین منظور به طراحی بلوکهای محاسباتی پرداخته شد تا بتواند به برآورد بهینه شعاع و گام شبکه میله های سوختی، گام مجتمعها و مهمتر از همه تعداد لایه های چینی قلب راکتور و همچنین مجتمع سوختی در دو حالت چیدمانی شش ضلعی و مربعی بپردازد. شایان ذکر است که بدلیل حجم وسیع محاسباتی و تسهیل در فرآیند شبیه سازی نوترونیکی مجتمعهای سوختی و قلب راکتور به فرمولیزه سازی ساختار هندسی شان پرداخته شد تا تنظیم ورودی کدهای WIMSD5-B و CITATION-LDI2 بصورت اتوماتیک انجام پذیرد. در این تحقیق به طراحی ۴ حالت از قلب راکتور بحرانی آب سنگین با سطوح توان حرارتی تولیدی، ۲۸۸، ۴۰۶، ۷۰۰ و ۱۰۹۲ مگاوات و در دو حالت چینی شش ضلعی و مربعی پرداخته شد و بمنظور برآورد اندازه توان خطی ایمن و همچنین آنالیز ترموهیدرولیکی مجتمع سوختی طراحی شده از قابلیتهای کد FRAPCON 3.1 استفاده شد. علاوه بر این جهت اطمینان از صحت نتایج برنامه های محاسباتی طراحی شده به مقایسه نتایج آنها با داده های گزارش مرجع پرداخته شد که حاکی از دقت مطلوب در نتایج داشت.

کلمات کلیدی: طراحی نوترونیکی، مجتمع سوختی، قلب راکتور، آب سنگین، شش ضلعی، مربعی

مقدمه:

گرچه که از دهه ۵۰ میلادی راکتورهای آب سنگین شروع به کار و توسعه نموده اند، اما در خلال این سالها پژوهشها در این زمینه متوقف نبوده و بررسی ها و بهینه یابی های متعددی در این رابطه صورت پذیرفته است. در این راستا می توان به تحقیقات اخیر هم چون استفاده از سوختهای توریومی در راکتورهای آب سنگین [1,2,3]، بهره گیری از میله های

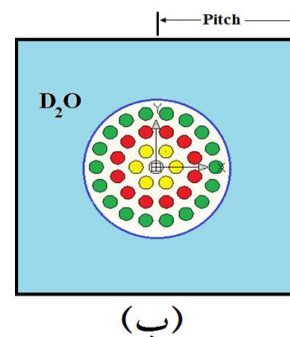
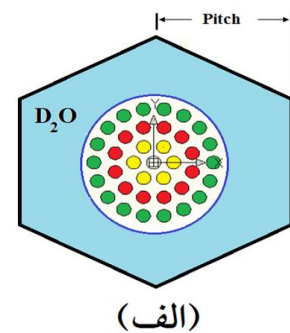
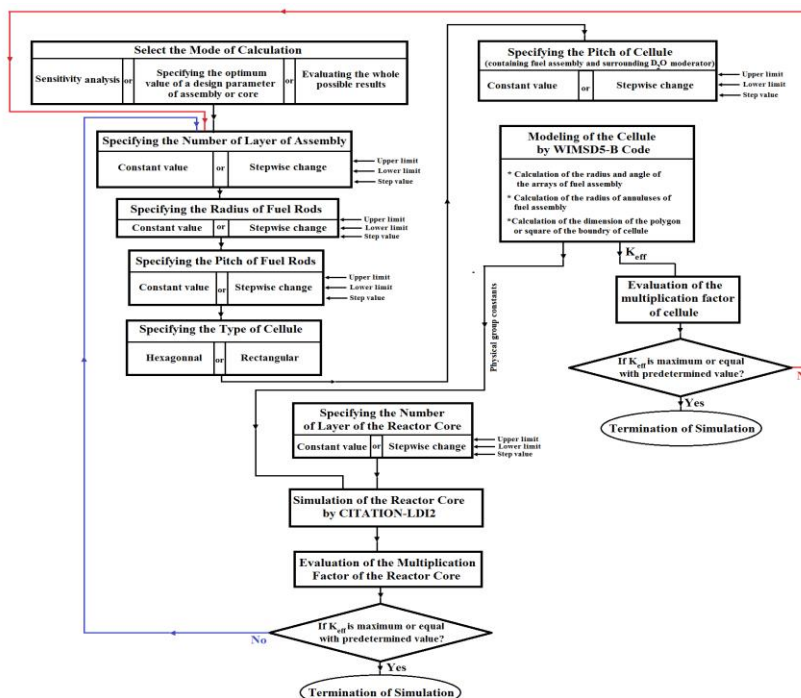


سوخت حلقوی [4,5] یا استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌یابی برن آپ باندهای سوختی راکتورهای آب سنگین تحت فشار اشاره داشت [6].

روش کار:

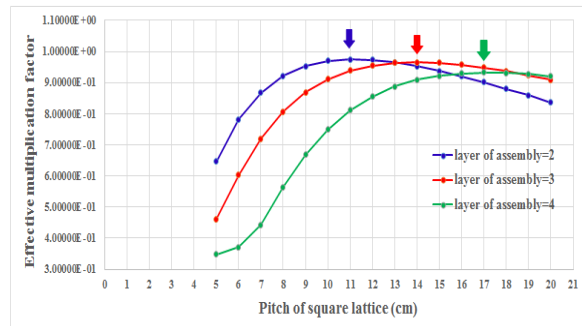
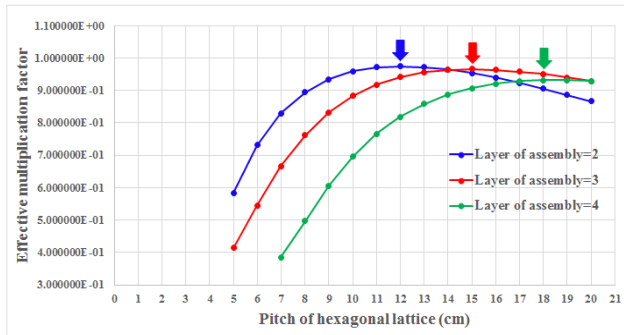
در این تحقیق، بمنظور دستیابی به یک ساختار محاسباتی مناسب در راستای برآورد تاثیرات ناشی از تغییرات پارامترهای طراحی مجتمعهای سوختی و قلب راکتور، به برنامه نویسی با محوریت بهره‌گیری از کد WIMSD5-B در مدلسازی نوترونیک مجتمع پرداخته شد [8]. همچنین در بخش طراحی قلب راکتور نیز از کوپلینگ کدهای نوترونیک WIMSD5-B و CITATION-LDI2 بهره‌برده شد. از آنجا که در راستای محاسبات طراحی مجتمعهای سوختی و آنالیزهای حساسیت تابعه، ناگزیر به انجام مدلسازی‌های بسیار زیاد توسط کد WIMSD5-B بودیم لذا تنظیم دستی فایل‌های ورودی این کد امری محال و بسیار زمانبر بود. بدین منظور به فرمولیزاسیون و تابع محور نمودن ساختار چینش میله‌های سوختی درون مجتمع سوختی پرداخته شد تا فرآیند تنظیم فایل‌های ورودی (در شرایط ابعادی و پارامتریک مختلف) بصورت اتوماتیک انجام گیرد. جهت طراحی نوترونیک حالات مختلف مجتمع سوختی و قلب راکتور آب سنگین بحرانی به طراحی برنامه‌ای محاسباتی پرداخته شد که به صورت همزمان به برآورد مقدار مطلوب شعاع و گام میله‌های سوختی، گام سلول مجتمع، تعداد لایه‌های چینشی مجتمعهای سوختی و همچنین لایه‌های چینشی قلب راکتور بپردازد. در شکل ۱ به تشریح شماتیکی فرآیند محاسباتی در نظر گرفته شده بمنظور طراحی حالات مختلف مجتمع سوختی دایروی و قلب راکتور آب سنگین بحرانی (در دو حالت شش ضلعی و مربعی) پرداخته شده است. از آنجا که در این تحقیق مقرر شده که طراحی قلب راکتور آب سنگین در دو حالت شبکه‌های مربعی و شش ضلعی انجام گیرد، لذا بمنظور محاسبه گام بهینه مجتمع‌های سوختی در قلب، فضای کالاندریا به سلولهای شش ضلعی و مربعی تقسیم می‌گردد و در هر یک این سلولها به محاسبه ضخامت مطلوب کند کننده آب سنگین اطراف تیوب حاوی مجتمع سوختی پرداخته می‌شود. بمنظور درک بهتر نحوه سلول بندی فضای قلب راکتور، در شکل ۲ به نمایش این سلولهای شش ضلعی و مربعی پرداخته شده است. البته لازم به تاکید است که گام بین مجتمعها برابر با دو برابر مقدار گام یک سلول می‌باشد. در پروسه محاسباتی در نظر گرفته شده در این بخش، در مجتمعهای سوختی با لایه‌های چینشی مختلف به اعمال ضخامتهای متفاوت کند کننده آب سنگین پیرامون این مجتمعها (در شبکه‌های مربعی و شش ضلعی) پرداخته و متعاقبا ضریب تکثیر موثر سلول در هر یک از این حالات محاسبه می‌گردد. بدین ترتیب در هر یک از این حالات مختلف از طراحی مجتمعهای سوختی، گام شبکه‌ای مطلوب خواهد بود که ضریب تکثیر موثر مجتمع سوختی در آن اندازه از گام ماکزیمم باشد. در شکل‌های ۳ و ۴ بترتیب

به تشریح تغییرات ضریب تکثیر موثر مجتمع سوختی بر حسب تغییرات گام سلولهای مربعی و شش ضلعی پرداخته شده است. شایان ذکر است که در خلال انجام محاسبات فوق الذکر، غنای میله های سوختی طبیعی بوده و مجتمعهای با لایه های چینی ۲، ۳ یا چهارگانه مورد بررسی قرار گرفتند که البته تعداد میله های سوخت در هر یک از این حالات طراحی به ترتیب ۱۹، ۳۷ و ۶۱ بود. علاوه بر این در شکل ۵ به ترتیب به تشریح تغییرات ضریب تکثیر مجتمع سوختی دایروی بر حسب تغییرات شعاع میله سوختی با استفاده از کند کننده آب سنگین پرداخته شده است. پس از مشخص شدن پارامترهای طراحی مجتمع سوختی و برآورد گام مطلوب بین آنها در راکتور آب سنگین، به انجام محاسبات در راستای بررسی تاثیرات ناشی از افزایش لایه های چینی قلب راکتور بر ضریب تکثیر موثر آن پرداخته شد. با بهره گیری از نتایج این شبیه سازی می توان به برآورد حداقل تعداد مجتمعهای سوختی لازم استفاده در قلب (بمنظور تامین بحرانیات آن) دست یافت. در شکل های ۶ و ۷ به ترتیب به تشریح تغییرات ضریب تکثیر موثر راکتور آب سنگین با شبکه های شش ضلعی و مربعی (در گامهای متفاوت) بر حسب لایه های چینی قلب پرداخته شده است.



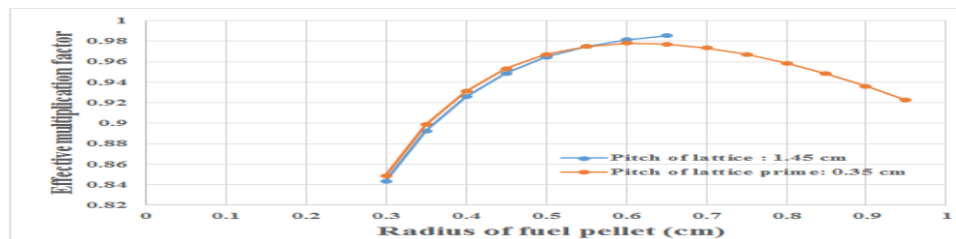
شکل (۱) فلوجارت شماتیکی فرآیند محاسباتی در نظر گرفته شده بمنظور طراحی حالات مختلف مجتمع سوختی دایروی و قلب یک راکتور آب سنگین بحرانی (در دو حالت شش ضلعی و مربعی)

شکل (۲) نحوه سلول بندی قلب راکتور آب سنگین با شبکه های الف) شش ضلعی و ب) مربعی

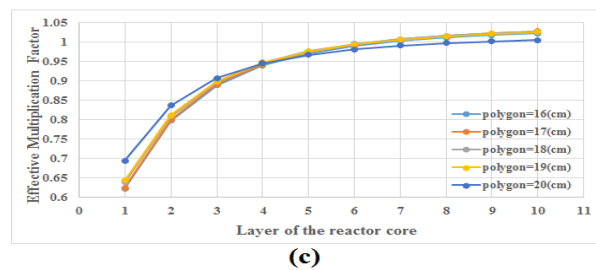
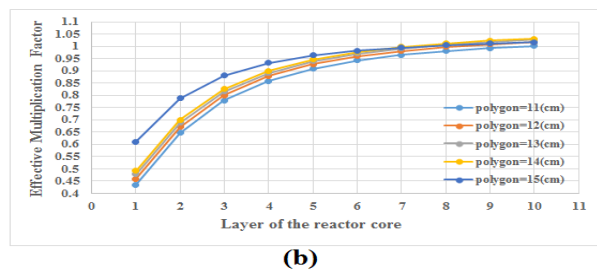
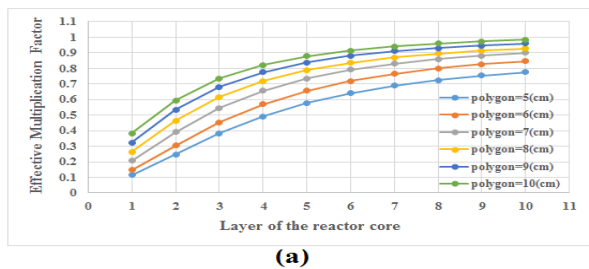


شکل (۳) تغییرات ضریب تکثیر سلول شش ضلعی حاوی مجتمع سوختی با لایه های ۲،۳ و چهارگانه بر حسب گام سلول

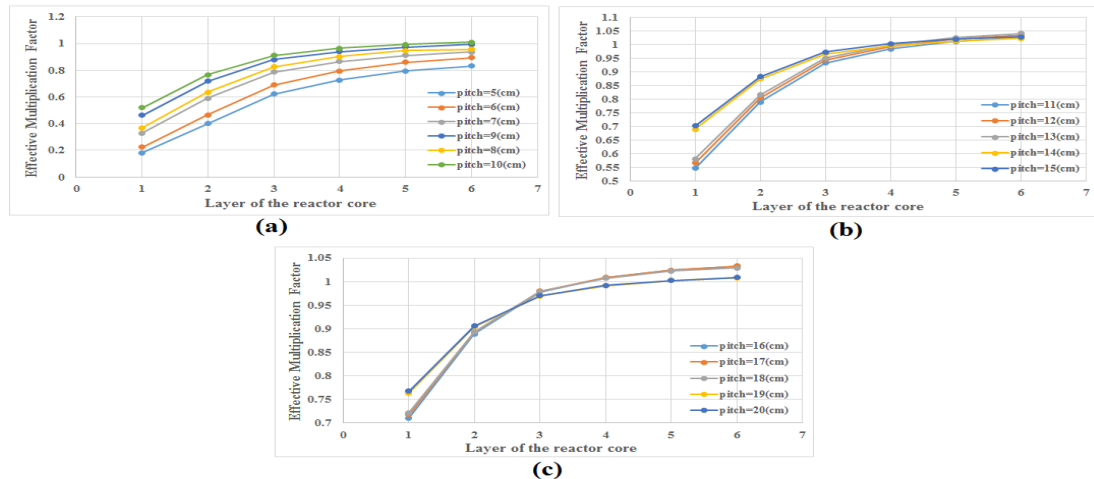
شکل (۴) تغییرات ضریب تکثیر سلول مربعی حاوی مجتمع سوختی با لایه های ۲،۳ و چهارگانه بر حسب گام سلول



شکل (۵) تغییرات ضریب تکثیر موثر سلول شش ضلعی با مجتمع سوختی دایروی بر حسب تغییرات شعاع



شکل (۶) تغییرات ضریب تکثیر یک قلب راکتور آب سنگین با شبکه شش ضلعی بر حسب لایه های چینشی و گامهای متفاوت



شکل (۷) تغییرات ضریب تکثیر یک قلب راکتور آب سنگین با شبکه شش ضلعی بر حسب لایه های چینشی و گامهای متفاوت

بمنظور اطمینان از صحت نتایج برآمده از فرآیند محاسباتی طراحی شده در این تحقیق، به انجام مقایسه دو پارامتر گام سلول سوختی و شعاع میله سوخت یک قلب راکتور آب سنگین با شبکه مربعی و مجتمع سوختی دایروی (با سه لایه - ۳۷ میله سوخت) پرداخته شد. در این حالت از طراحی میزان گام سلول بهینه ۱۴ سانتی متر بود، در حالیکه برای یک راکتور مرجع (راکتورهای نوع CANDU-600 و CANDU-900) این پارامتر برابر با ۱۴.۳ cm است و بدین ترتیب میزان خطا کمتر از ۲.۱٪ می باشد. البته لازم به یادآوری است که گام شبکه بین مجتمعها برابر با دو برابر مقدار گام یک سلول مربعی می باشد. همچنین میزان شعاع بهینه برآورد شد در حدود ۰.۶ cm بود که دقیقاً منطبق با شعاع سوختی اعلام شده در گزارش مرجع بود [9].

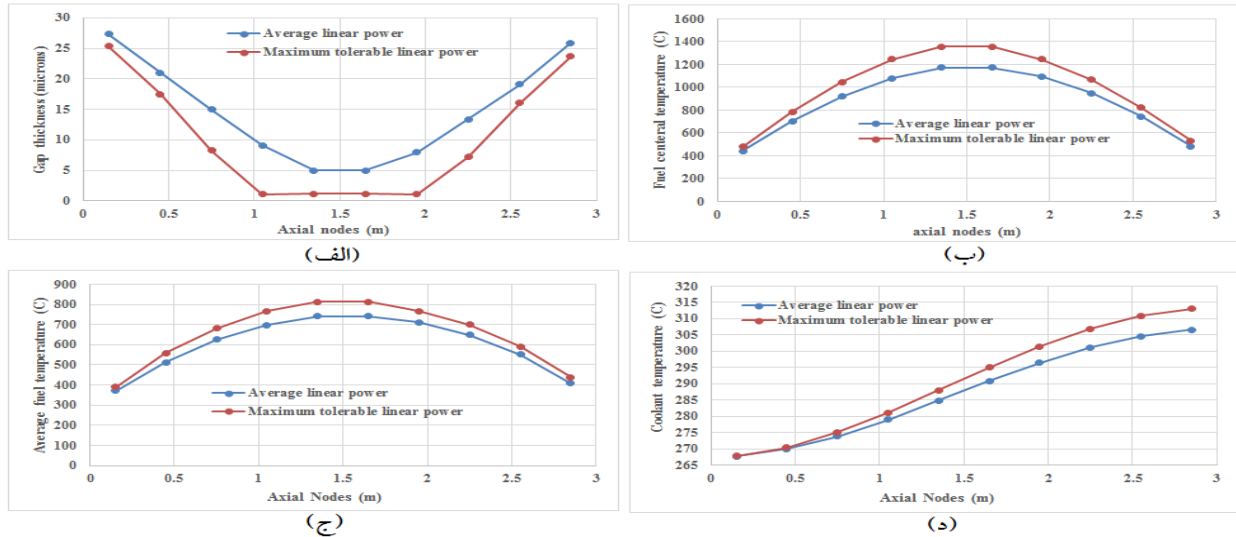
طراحی قلب راکتور آب سنگین در دو حالت شش ضلعی و مربعی و ابعاد و سطوح مختلف توانی ۴۰۶، ۱۰۹۲، ۲۸۸ و ۷۰۰ مگاوات

پس از انجام آنالیزهای حساسیت و محاسبات طراحی سلول سوختی و قلب بحرانی راکتور آب سنگین، به استخراج ۴ حالت بهینه پرداخته شد که از راکتیویته مازاد مطلوبی برخوردار بودند. شایان ذکر است که چگونگی انتخاب این ۴ حالت متفاوت طراحی بر اساس نتایج ارائه شده در شکل‌های ۶ و ۷ می باشد. شایان ذکر است که در طراحی های صورت گرفته کندکننده و خنک کننده آب سنگین می باشد.

این حالت‌های طراحی عبارتند از :



۱. قلب راکتور بحرانی مربعی ۵ لایه ای (دارای ۳۰۵ مجتمع) با مجتمع سوختی ۲ لایه ای (مشمول بر ۱۹ میله سوخت) و گام سلول ۱۳ سانتیمتری که از ضریب تکثیر موثر ۱,۰۲۷۳۸ برخوردار است. البته شایان ذکر است که در حالت ۶ لایه ای قلب، میزان ضریب تکثیر موثر به مقدار قابل توجه ۱,۰۴۱۵۸ افزایش می یابد.
 ۲. قلب راکتور بحرانی مربعی ۶ لایه ای (دارای ۴۲۱ مجتمع) با مجتمع سوختی ۳ لایه ای (مشمول بر ۳۷ میله سوخت) و گام سلول ۱۶ سانتیمتری که دارای ضریب تکثیر موثر ۱,۰۳۲۶۵ می باشد.
 ۳. قلب راکتور بحرانی شش ضلعی ۹ لایه ای (دارای ۲۱۶ مجتمع) با مجتمع سوختی ۲ لایه ای (مشمول بر ۱۹ میله سوخت) و گام سلول ۱۴ سانتیمتری که ضریب تکثیر موثری برابر با ۱,۰۲۳۱۳ دارد.
 ۴. قلب راکتور بحرانی شش ضلعی ۱۰ لایه ای (دارای ۲۷۰ مجتمع) با مجتمع سوختی ۳ لایه ای (مشمول بر ۳۷ میله سوخت) و گام سلول ۱۷ سانتیمتری که ضریب تکثیر موثر اش ۱,۰۲۷۷ می باشد.
- بمنظور تعیین سطوح توانی کاری راکتورهای طراحی شده، در ابتدا بایستی به برآورد ماکزیمم توان حرارتی خطی ایمن از نظر ترموهیدرولیکی پرداخته می شد. در این راستا با استفاده از کد FRAPCON 3.1 به شبیه سازی ترموهیدرولیکی مجتمع سوختی بر حسب مقادیر مختلف توانهای حرارتی خطی پرداخته شد و از این طریق آستانه توان حرارتی خطی در حدود ۲۹,۲۱۷ کیلو وات بر متر شناسایی شد. بدین ترتیب از آنجا که ماکزیمم ضریب بیشینه قدرت محوری راکتور تقریباً در حدود ۱,۴۹ بود لذا ماکزیمم توان حرارتی تولیدی ایمن هر مجتمع سوختی در حالت‌های دو و سه لایه ای به ترتیب ۱,۶۶۵ و ۳,۲۴۳ مگاوات محاسبه شد. با توجه بارگذاری کل قلب با غنای ثابت و در حد طبیعی بودن غنای سوخت در راکتورهای آب سنگین، مرسوم بر این است که توان خطی حرارتی متوسط کل قلب را در حدود ۲۰٪ پایین تر از "ماکزیمم توان حرارتی خطی ایمن برآورد شده" در نظر گرفت، بدین ترتیب سطح توان حرارتی تولیدی تعیین شده برای این ۴ حالت طراحی به ترتیب برابر با ۴,۰۶، ۱۰,۹۲، ۲۸,۸ و ۷۰,۰ مگاوات در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که در هر ۴ حالت طراحی طول اکتیو قلب در حدود ۳ متر در نظر گرفته شد و در هر کانال از ۱۰ باندل سوختی استفاده شد. در شکل ۸ به تشریح تغییرات ضخامت گپ، دمای مرکزی و متوسط میله سوختی و همچنین خنک کننده در راستای محوری قلب و در دو توان خطی متوسط و آستانه ایمن پرداخته شده است. مجتمع‌های مرکزی قلب راکتور دارای ضریب بیشینه قدرت شعاعی بالای ۲ می باشند. طبق روال مرسوم برای تسطیح توزیع شعاعی توان حرارتی تولیدی قلب راکتورهای آب سنگین، یا باید از میله های تنظیم کننده عمودی (که موقعیت تعبیه مواد جاذب درونشان منطبق با مجتمع‌های مرکزی می باشد) استفاده شود و یا به بارگذاری مجتمع های سوختی تابش دیده در نواحی مرکزی قلب پرداخته شود.



شکل (۸) بررسی تغییرات الف) ضخامت گپ، ب) دمای مرکزی و ج) دمای متوسط میله سوختی و همچنین د) دمای خنک کننده در راستای محوری قلب و در دو توان خطی متوسط و آستانه ایمن

بحث و نتیجه گیری:

در راستای طراحی مجتمعها و قلب راکتور آب سنگین، برای سه حالت مختلف از مجتمعهای سوختی (۲،۳) و چهار لایه ای) به برآورد گام شبکه مطلوب پرداخته شد. در این راستا همانگونه که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می شود، با افزایش لایه چینی مجتمع سوختی دایروی (آب سنگین) بر میزان گام شبکه افزوده می شود که البته دلیل ساده آنرا می توان در این دانست که با افزایش ضخامت لایه چینی اضافه شده به مجتمع، بالطبع به همان اندازه نیز بایست بر ضخامت بهینه کند کننده ی سلول (گام شبکه) افزوده شود. اگرچه با افزایش لایه های چینی به مجتمع سوختی آب سنگین، علیرغم بهره مندی از "گام شبکه متناسب مطلوب" از مقدار ضریب تکثیر سلول به مقدار بسیار اندکی کاسته می شود، اما افزایش تعداد میله های سوختی و مجتمعها به راکتور هسته ای آب سنگین این توانایی را می دهد که ضمن حفظ توان خطی در آستانه ایمن، به افزایش توان حرارتی تولیدی بپردازد. در این راستا، بررسی نمودارهای ۶ و ۷ نشان می دهد که همچون پدیده رخ داده در مجتمعهای سوختی، علیرغم اینکه با افزایش لایه های چینی قلب بر مقدار ضریب تکثیر راکتور افزوده می شود، اما روند افزایشی رفته به رفته شیب ملایمتری به خود می گیرد. بدین ترتیب، همانگونه که پیشتر گفته شد، افزایش لایه های چینی قلب با هدف افزایش ضریب تکثیر راکتور فقط تا مرحله ای منطقی به نظر می رسد و پس از



آن تنها دلیل افزایش تعداد مجتمع‌های سوختی و متعاقباً رشد لایه‌های چینی قلب را فقط و فقط می‌توان در راستای ارتقاء توان حرارتی تولیدی راکتور دانست.

مراجع:

- [1] Dugal, C., Colton, A.V., Golesorkhi, S., Bromley, B.P., (2018), Modeling and mitigation of bundle end power peaking in pressure tube heavy water reactor advanced fuels using thorium dioxide, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 120, pp 625-629.
- [2] YanCliff, Huiping., Dugal, Ashlea. , Colton, A.V., Blair, V., Bromley, P., Golesorkhi, S., (2018), Comparisons between RFSP and MCNP for modeling pressure tube heavy water reactor cores with thorium-based fuels, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 120, pp 642-655.
- [3] Dugal, Ashlea., Colton, A.V., Blair, V., Bromley, P., (2018), Lattice physics evaluation of 35-element mixed oxide thorium-based fuels for use in pressure tube heavy water reactors, Volume 117, pp 259-276.
- [4] Deokule, A.P., Vishnoi, A.K., Umasankari, K., Chandraker, D.K., Vijayan, P.K., (2015), Reactor Physics and Thermal Hydraulic Analysis of Annular Fuel Rod Cluster for Advanced Heavy Water Reactor, *Energy Procedia*, Volume 71, pp 52-61.
- [5] Bromley, B.P., Groves, K., Colton, A.V., Golesorkhi, S., (2019), Physics characteristics of internally cooled annular fuel for potential application in pressure tube heavy water reactors, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 124, pp 399-406.
- [6] Jayalal, M.L., Ramachandran, Suja., Rathakrishnan, S., Saty Murty, S.A.V., Sai Baba, M., (2015) Application of Genetic Algorithm methodologies in fuel bundle burnup optimization of Pressurized Heavy Water Reactor, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 281, 2015, pp 58-71.
- [7] Berna, G.A., Beyer, C.E., Davis, K.L., Lanning, D.D., (1997), FRAPCON-3: A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Pacific Northwest National Laboratory Richland, Washington
- [8] Roth, M.J., Macdougall, J.D., Kemshell, P.B., (1997), Winfrith Improved Multigroup Scheme Code System (WIMSD5-B Manual, NEA-1507). Winfrith, Dorchester.
- [9] Fowler, T.B., Vondy, D.R., Cunningham, G.W., (1999), CITATION-LDI2: Nuclear Reactor Core Analysis Code System (CCC-643ORN). Oak Ridge National Laboratory, Oakridge
- [10] Garland, Wm. J., (2014), *The Essential CANDU (A textbook on the CANDU Nuclear Power Plant Technology)*. McMaster University, Hamilton, Ontario.