

محاسبه نوترونیک بسته سوخت راکتور VVER-۱۰۰۰ بوشهر با سوخت های حلقوی به کمک کد MCNP

تهمینه عبدلی مسینان^۱

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران. Tahmine7054@yahoo.com

چکیده

نیاز به تولید سوخت های جدید به نوعی با ادامه حیات نیروگاه های هسته ای در هم تنیده شده است. در سطح بین المللی تلاش گسترده ای در زمینه یافتن سوختی جدید به منظور استفاده در راکتورهای هسته ای آغاز شده است. این امر را می توان از تعداد زیاد مقالات چاپ شده در این زمینه در سالهای اخیر استنباط نمود. هدف این مطالعات دستیابی به سوختی است که در یک مقدار مشخص از آن مقدار انرژی بیشتری در قیاس با سوخت های قبلی استحصال شود. در عین حال، سوخت های جدید باید معایب گونه های قبلی را برطرف سازند. در این مقاله به شبیه سازی سوخت حلقوی با توجه به ۶ نوع مجتمع سوخت قلب نیروگاه بوشهر پرداختیم. داده های شبیه سازی قلب راکتور اتمی بوشهر با سوخت معمول نشان از تطابق شار و... برای سوخت UO_2 می دهد. پارامترهای شار شعاعی، شار محوری، قدرت قلب، محاسبات بحرانی و برناب برای سوخت معمولی و سوخت حلقوی مقایسه گردیدند. نتایج نشان داد که استفاده از سوخت حلقوی سبب شار شعاعی و شار محوری بیشتر و در نتیجه افزایش قدرت قلب در طی سیکل ۳۰۰ روزه گردیده است. از آنجایی که ابعاد سوخت و به دنبال آن حجم متریال سوخت تغییرات عمده ای دارد باعث تفاوت در ساختار سوخت گردیده که این امر سبب شد تا نتوانیم برناب ها را با هم به طور مطمئنی مقایسه نماییم.

واژه های کلیدی

سوخت، سوخت حلقوی، PWR، VVER ۱۰۰۰، راکتور بوشهر

مقدمه

یکی از اقداماتی که برای بهبود کارایی راکتورهای PWR انجام گرفته است همانا تغییر هندسه سوخت در این نوع راکتورها می باشد. این تغییر هندسه به نحوی است که هیچ تغییری در ابعاد و تعداد مجتمع سوختها حاصل نمی شود در نتیجه ابعاد راکتور نیز به تبعیت از آن تغییری ندارد و تنها موردی که تغییر می کند تعداد میله های سوخت می باشد.

همچنین به منظور پایین تر آوردن ماکزیمم دمای سوخت در راکتورهای تحت فشار تکنولوژی ساخت سوخت های حلقوی مورد توجه قرار گرفته است. در طراحی سوخت های حلقوی، به ۲ مدل طراحی برخورد می کنیم [۱] که عبارتند از:

۱. سوخت های حلقوی Sintered

۲. سوخت های حلقوی VIPAC

کارایی خوب سوخت هسته ای تحت تابش و در دماهای بالا از لحاظ ایمنی و اقتصادی یکی از ملزومات مهم برای هر راکتور هسته ای می باشد. با افزایش کیفیت سوخت و غلاف، میزان نقصان ایجاد شده در سوخت کاهش یافته و دانسیته قدرت آن افزایش می یابد. همچنین کارایی سوخت در شرایط از دست دادن خنک کننده نیز بهبود می یابد. افزایش ایمنی در سوخت موجب می شود که در هنگام بروز تغییرات ناگهانی در میزان خنک کننده، سوخت زمان کافی برای عکس العمل مناسب را داشته باشد. تحقیقات و پیشرفت های صورت گرفته در این زمینه در دهه های اخیر منجر به یک طراحی خوب برای سوخت راکتورهای PWR شده است. با بررسی مزایا و معایب سوخت های حلقوی VIPAC نسبت به سوخت های حلقوی سینتر شده و با توجه به هدف این پروژه به بررسی رفتار راکتور PWR با سوخت حلقوی سینتر شده می پردازیم. در این پروژه به محاسبه نوترونیک بسته سوخت راکتور VVER-۱۰۰۰ بوشهر با سوخت های حلقوی به کمک کد MCNP خواهیم پرداخت.

پیشینه

با توجه به تجربیاتی که از سوخت توپر دی اکسید اورانیوم در دست بود، دانشمندان طرح سوخت حلقوی با دو جریان خنک کننده از داخل و خارج را پیشنهاد کردند. عملکرد قرص های سوخت حلقوی ابتدا در راکتورهای VVER روسی و سپس در راکتورهای تحت فشار [۲ و ۳] مورد بررسی قرار گرفت.

سوخت های حلقوی به فرم سوخت های پیشرفته پلوتونیومی APA نیز در کشور فرانسه تست شد [۴] و سپس سوخت حلقوی CERCER به فرم [PUO _ CEO] به صورت حلقه های هم مرکز با غلاف ساخته شد.

سوخت سینتر شده دی اکسید اورانیوم با جریان داخلی و خارجی خنک کننده به عنوان پروژه ای در دانشگاه (MIT) تعریف شد تا بتوانند از این سوخت در راکتورهای تحت فشار فعلی و با افزایش چگالی قدرت در آنها، استفاده نمایند.

مطالعات و تحقیقات پیشین توسط دانشمندان مختلف مانند: Xu et al. , Hejzlar et al. , Feng et al. انجام گرفت و نشان داده شد که با خنک کاری همزمان ناحیه داخلی و خارجی میله سوخت می توان به حدود ۵۰ درصد افزایش تولید انرژی در راکتورهای PWR دست یافت. این توانایی ناشی از افزایش میزان سطح به حجم برای هر قرص سوخت می باشد. همچنین مشاهده شد در رسیدن از توان صفر کاری به توان کاری صد در صد، میزان کاهش راکتیویته برای سوخت های حلقوی کمتر می باشد که این امر ناشی از پایین تر بودن دمای کاری در این سوخت است. در این نوع سوخت دو ناحیه مشخص

حاشیه ای وجود دارد که میزان پلوتونیوم تولیدی در آنجا بیشتر از مقدار میانگین است که این دو ناحیه، نواحی هستند که در آن سطوح داخلی و خارجی سوخت دارای تبادل حرارتی با خنک کننده می باشند.

شبه سازی قلب راکتور در این تحقیقات نشان داد که در قلب با سوخت حلقوی و دانسیته قدرت ۱۵۰ درصد، دمای کاری سوخت پایین تر بوده ولی دمای خنک کننده نسبت به قبل تغییری نمی یابد که این امر به علت ثابت بودن نسبت توان تولیدی به دبی جریان خنک کننده می باشد. به هر حال اگر بخواهیم از اورانیوم بصورت UO_2 در این نوع سوخت ها استفاده کنیم برای داشتن طول سیکلی برابر قبل، نیاز به استفاده از غنای بالاتر و تا حدود ۸ در صد وزنی U_{235} (بالاتر از محدوده مجاز ۵ درصد کنونی) می باشد. این افزایش غنا به این علت است که می خواهیم از سوختی با حجم کمتر میزان انرژی بیشتری بگیرییم. افزایش غنا باعث ایجاد تغییر و تاثیرات عمده در پارامترهای قلب می شود که از این میان می توان به کاهش طیف سخت نوترون و نتیجتاً کاهش راکتیویته منفی ایجاد شده توسط سموم نوترونی اشاره کرد. بنابراین در این نوع سوخت نیاز به استفاده از سموم نوترونی بیشتری است.

استفاده از سموم نوترونی بیشتر در سوخت، عملاً کارایی سوخت را پایین می آورد لذا تئوری استفاده از سوخت با غنای کمتر از ۵ درصد ارائه، و مشاهده شد که استفاده از اورانیوم با این غنا در سوخت های حلقوی، کارایی لازم را ندارد. برای جلوگیری از استفاده از سوخت های UO_2 با غنای زیر ۵ درصد تحقیق هایی توسط الیس^۱ [۵] انجام و در آن استفاده از سوخت های UN (اورانیوم نیترات) با چگالی بالاتر از UO_2 مورد بررسی قرار گرفت. دارای چندین ویژگی مفید نسبت به UO_2 می باشد. دانسیته تئوری و اتمی بالاتر در UN این اجازه را به طراح می دهد که به میزان ۴۰ درصد اورانیوم بیشتری را در حجم ثابتی نسبت به سوخت های UO_2 جا دهد. تلفیق این نوع سوخت به همراه طراحی آن به صورت حلقوی باعث کارایی بسیار بالایی از این سوخت می شود.

مظفری و فقیهی سال ۲۰۱۳ [۶] در مقاله ای به طراحی یک سوخت حلقوی برای قلب راکتور VVER-1000 و بررسی نوترونیک، بهینه سازی گام و محاسبات گرم ترین میله سوخت (MDNBR) پرداختند.

انصاری فر و ابراهیمی [۷] در مقاله ای در سال ۲۰۱۶ به طراحی و تحقیق کاربرد نانو سیال در راکتور VVER-1000 با سوخت حلقوی که دارای دو خنک کننده بود، پرداختند.

روش شناسی

کد MCNP یکی از قوی ترین کدهای محاسباتی هسته ای است که براساس روش مونت کارلو کار می کند. این کد در طراحی نوترونی راکتورهای هسته ای و بررسی ایمنی آن ها، محاسبات مصرف سوخت، طراحی حفاظ، طراحی آشکارساز، چاه پیمایی هسته ای، طراحی هدف

در شتاب دهنده ها، پرتوپزشکی و ... کاربردهای بسیاری دارد. [۸] برای استفاده از این کد یک فایل ورودی شامل اطلاعات مسئله (هندسه، مواد، چشمه، نوع خروجی و غیره) تهیه گردد. که با در نظر گرفتن اطلاعات فایل ورودی و استفاده از کتابخانه سطح مقطع ها، مسئله را حل و نتایج را در فایل خروجی تولید کردیم. در این تحقیق محاسبات در شرایط پایا (Steady state) انجام پذیرفت. خواص سیال ثابت در نظر گرفته شد و هندسه و ابعاد طبق جدول زیر تعریف و مشخص شد. لازم به ذکر است سوخت مورد بررسی سینتر شده است و تعداد و آرایش میله های سوخت، کانال های هدایت کننده، ابعاد و هندسه میله های سوخت تغییر یافته است. همچنین راکتور Under Moderate می باشد.

جدول ۱: مشخصات هندسی قلب راکتور با سوخت معمولی و حلقوی

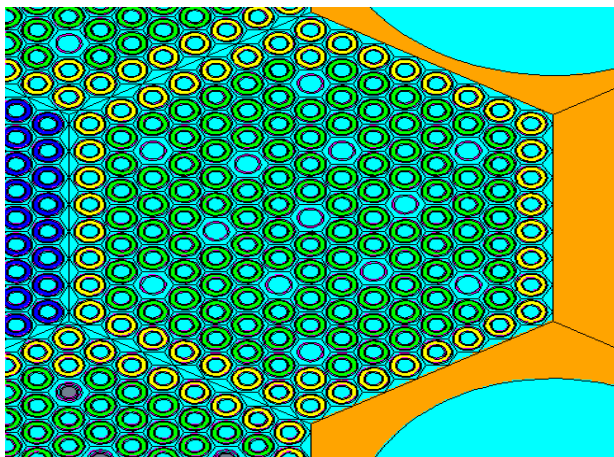
نوع سوخت	سوخت معمولی	سوخت حلقوی
مشخصه هندسی	مقدار	
قلب رآکتور		
قطر رآکتور	۳۴۰ cm	۳۴۰ cm
ارتفاع رآکتور	۴۰۰ cm	۴۰۰ cm
مجتمع سوخت		
شکل مجتمع سوخت	شش ضلعی	شش ضلعی
تعداد مجتمع های سوخت درون قلب	۱۶۳	۱۶۳
گام بین مجتمع های سوخت	۲۳/۶ cm	۲۳/۶ cm
تعداد میله های سوخت درون مجتمع سوخت	۳۱۱	۱۱۹
میله سوخت		
قطر بیرونی قرص سوخت	۷/۵۷ mm	۱۱/۸۲ mm
قطر خارجی غلاف	۹/۱ mm	۱۵/۳ mm
جنس غلاف	آلیاژ Zr + 1% Nb	آلیاژ Zr + 1% Nb
گام میله های سوخت	۱۲/۷۵ mm	۱/۹۴ cm

مشخصات انواع مجتمع سوخت به کار رفته در راکتور VVER-1000 به طور خلاصه در جدول ۲ آورده شده است. استفاده از این مجتمع های سوخت در چرخه های مختلف، متفاوت می باشد. به عنوان مثال در چرخه اول تنها مجتمع های نوع ۱۶، ۲۴ و ۳۶ درون راکتور قرار می گیرند.

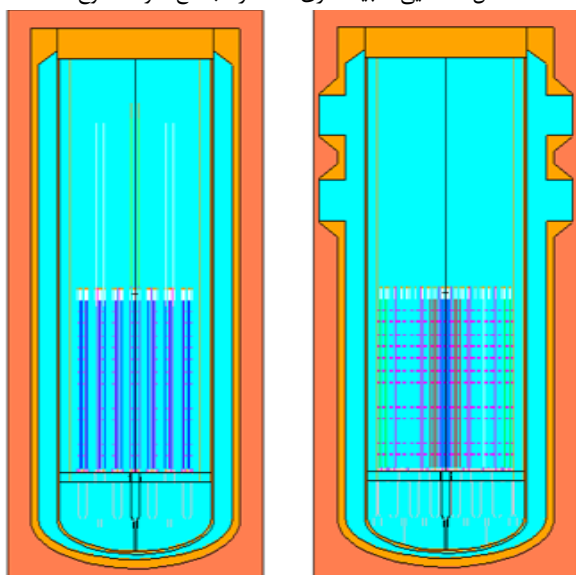
جدول ۲: انواع مجتمع های سوخت راکتور بوشهر

غنای سوخت (درصد وزنی)			نوع مجتمع سوخت
نوع ۱ غنا (تعداد)	نوع ۲ غنا (تعداد)	میانگین غنا (درصد وزنی)	
1.6 (311)	-	1.6	16

^۱ Ellis

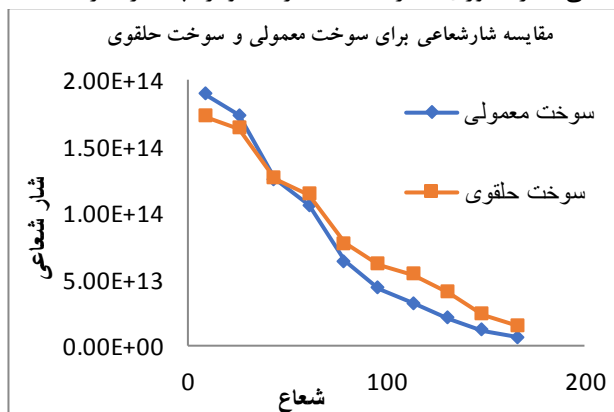


شکل ۳: نمایی شبیه سازی شده از مجتمع سوخت نوع ۳۶



شکل ۴: نمایی از شبیه سازی راکتور در محور XZ و YZ

به عنوان چند نتیجه مهم از سوخت حلقوی، می توان به مقایسه شار شعاعی، شار محوری، قدرت قلب، بحرانیّت و برناب اشاره کرد.



شکل ۵: مقایسه شار شعاعی برای سوخت معمولی و سوخت حلقوی

همانطور که دیده می شود شار شعاعی در سوخت حلقوی، بالاتر از سوخت معمولی است به نحوی که میانگین شار شعاعی در سوخت حلقوی $10^{13} \times 8/45$ و میانگین شار شعاعی در سوخت معمولی $10^{13} \times 7/68$ است.

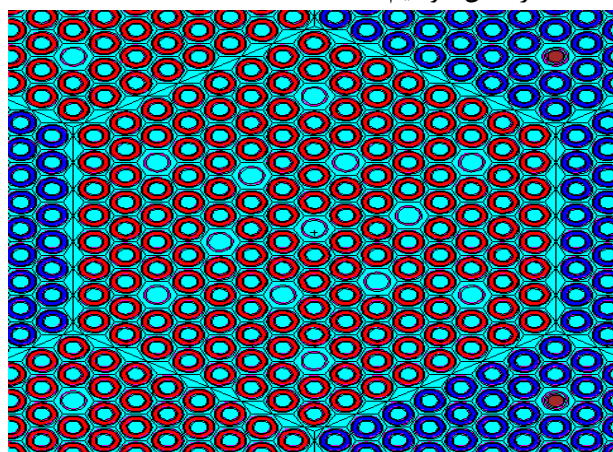
مقایسه شار محوری برای سوخت معمولی و سوخت حلقوی نیز در ادامه آورده شده است.

2.4	-	2.4 (311)	24
3.62	3.3 (66)	3.7 (245)	36
4.02	3.7 (66)	4.1 (245)	40
2.4	-	2.4 (311)	24B20
2.4	-	2.4 (311)	24B36
3.62	3.3 (66)	3.7 (245)	36B20
3.62	3.3 (66)	3.7 (245)	36B36
4.02	3.7 (66)	4.1 (245)	40B20
4.02	3.7 (66)	4.1 (245)	40B36
4.02	3.7 (66)	4.1 (245)	40B50

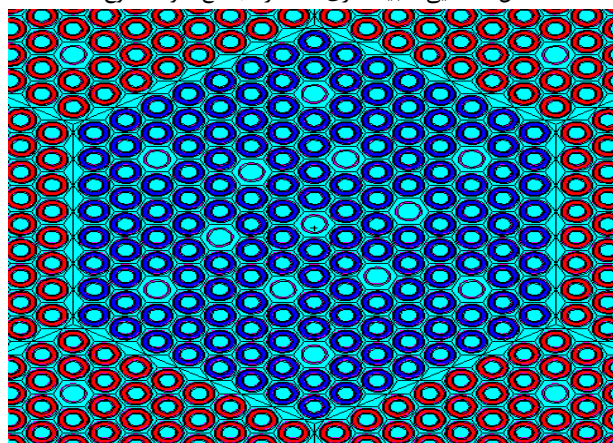
جمع آوری و مطالعه مقالات مرتبط با موضوع و استخراج مباحث و معادلات مورد نیاز صورت پذیرفت و کدنویسی با استفاده از اطلاعات موجود و معادلات استخراج شده و استفاده از قابلیت های کد MCNP انجام پذیرفت. نهایتاً مقایسه نتایج بدست آمده از کد نوشته شده با اطلاعات موجود به منظور صحت سنجی انجام گرفت.

نتایج

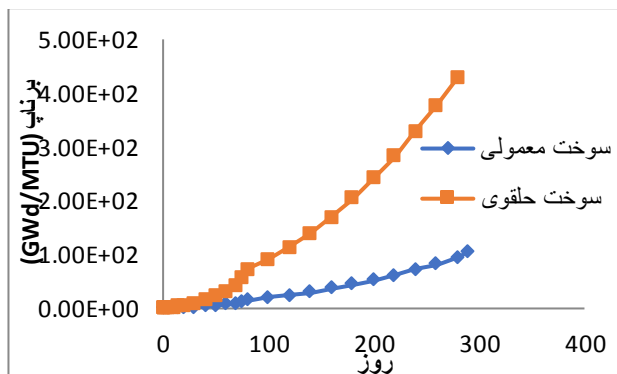
در ابتدا نمایی از انواع مجتمع سوخت که توسط کد MCNP مدل شده است را نشان خواهیم داد.



شکل ۱: نمایی شبیه سازی شده از مجتمع سوخت نوع ۱۶



شکل ۲: نمایی شبیه سازی شده از مجتمع سوخت نوع ۲۴



شکل ۹: مقایسه برناب برای سوخت معمولی و سوخت حلقوی

نتیجه گیری و جمع بندی

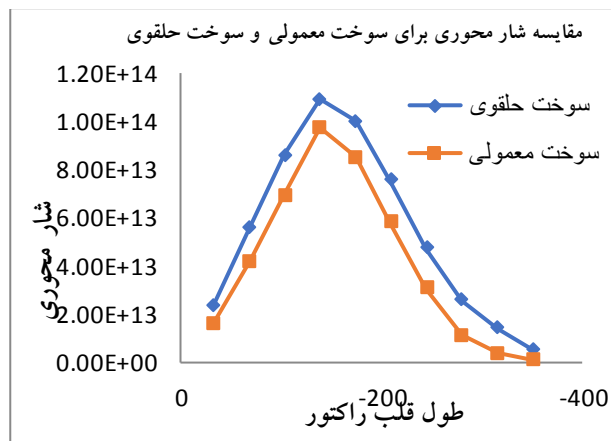
در این مقاله به شبیه سازی سوخت حلقوی با توجه به ۶ نوع مجتمع سوخت قلب نیروگاه بو شهر پرداختیم. پیش از آن شبیه سازی قلب راکتور اتمی بو شهر با سوخت معمول نیز صورت پذیرفته بود که داده ها نشان از تطابق شار و... برای سوخت UO_2 می دهد. نهایتاً شار شعاعی، شار محوری، قدرت قلب، محاسبات بحرانی و برناب برای سوخت معمولی و سوخت حلقوی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که استفاده از سوخت حلقوی سبب شار شعاعی و شار محوری بیشتر و در نتیجه افزایش قدرت قلب در طی سیکل ۳۰۰ روزه نموده است.

از آنجایی که ابعاد سوخت و به دنبال آن حجم متریال سوخت تغییرات عمده ای دارد باعث تفاوت در ساختار سوخت گردیده که این امر سبب شد تا نتوانیم برناب ها را با هم به طور مطمئنی مقایسه نماییم.

مراجع و منابع

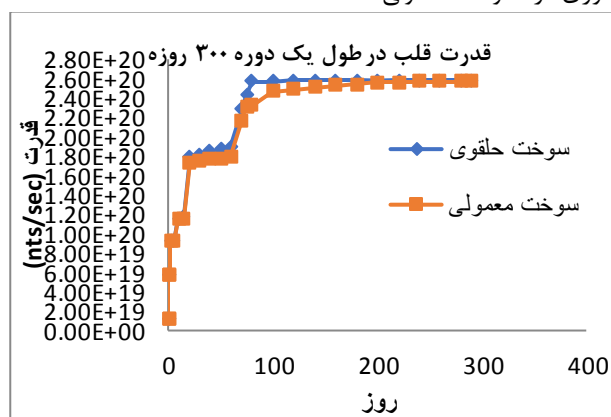
- [1] Yi Yuan B.S., Harbin Engineering University, Harbin, The Design of High Power Density Annular Fuel for LWRs Submitted to the Department of Nuclear Engineering at the Massachusetts Institute of Technology September 2004.
- [2] Mildrum C.M., "Economics Evaluation of Annular Fuels for PWRs," Trans. Am. Nucl. Soc., Vol.35, p.78, 1980
- [3] Caner, M., & Dugan, E. T. (2000). ThO₂-UO₂ annular pins for high burnup fuels. Annals of nuclear energy, 27(9), 759-770.
- [4] Brochard J., Bourreau, S., Hourdequin, N.; Bentejac, F., Bergeron, J and Matheron, P " Specific Fuel Rod Thermalmechanical Studies for the Advanced Plutonium Fuel Assembly Concept", Progress in Nuclear Energy, vol 38, no3-4, 399-402, 2001
- [5] T. S. Ellist, M. S. Kazimi and P. Hejzlar 'Advanced Design Concepts for PWR and BWR High-Performance Annular Fuel Assemblies' Center for Advanced Nuclear Energy Systems MIT, June 2006.
- [6] Mozafari, M. A., & Faghihi, F. (2013). Design of annular fuels for a typical VVER-1000 core: neutronic investigation, pitch optimization and MDNBR calculation. Annals of Nuclear Energy, 60, 226-234.
- [7] Ansarifard, G. R., & Ebrahimian, M. (2016). Design and neutronic investigation of the Nano fluids application to VVER-1000 nuclear reactor with dual cooled annular fuel. Annals of Nuclear Energy, 87, 39-47.

[۸] ریاضی، یاشار؛ وفابخش، مهدی؛ پاکروح، بهزاد. راهنمای استفاده از کد شبیه سازی MCNP4C روش مونت کارلویی برای محاسبات هسته ای، تیر ۱۳۹۰.



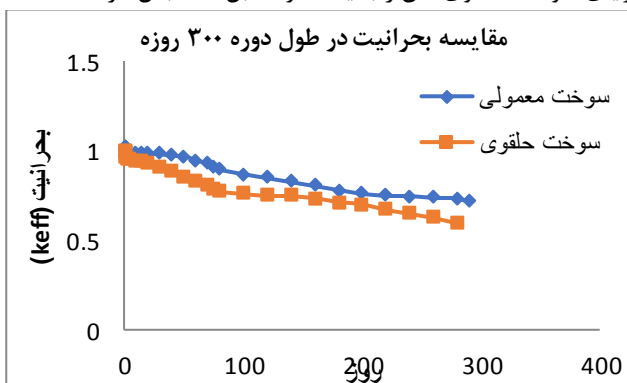
شکل ۱۰: مقایسه شار محوری برای سوخت معمولی و سوخت حلقوی

میانگین شار محوری در سوخت حلقوی $1.0^{13} \times 5/43$ و میانگین شار محوری در سوخت معمولی $1.0^{13} \times 4/15$ است.



شکل ۱۱: قدرت قلب در طول یک دوره ۳۰۰ روزه

بحرانی در سوخت معمولی بالاتر از سوخت حلقوی است اما همچنان مزایای سوخت حلقوی، آن را به یک نمونه قابل اعتنا بدل کرده است.



شکل ۱۲: مقایسه بحرانی برای سوخت معمولی و سوخت حلقوی در طول دوره ۳۰۰ روزه

در انتها نیز مقایسه برناب برای سوخت معمولی و سوخت حلقوی آمده است. از آنجایی که ابعاد سوخت و به دنبال آن حجم متریال سوخت تغییرات عمده ای دارد باعث تفاوت در ساختار سوخت گردید که این امر سبب می شود تا نتوانیم برناب ها را با هم به طور مطمئنی مقایسه نماییم.