شبیه سازی و محاسبات نوترونی و سنتیک قلب راکتور زیر بحرانی ALMR[1]باکد محاسباتی MCNPX 2.6

رهبری،کورش [(۱)]* – مستی،داریوش[(۱)]

[۱]گروه مهندسی هسته ای ، واحد بوشهر ، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر ، ایران

چکیده:

در حال حاضر یکی از جدیدترین نسل راکتورهای هسته ای موسوم به راکتورهای ADS به دلایل مختلفی مانند توانایی تولید انرژی و همچنین قابلیت سوزاندن زباله های هسته ای به طریقی تمیز تر و ایمن تر از آنچه در حال حاضر صورت میگیرد مورد توجه قرار گرفته اند. در این تحقیق پارامتر های نوترونی و سنتیکی قلب یک راکتور زیر بحرانی ALMR اصلاح شده واداشته شده با شتاب دهنده الکترونی که به عنوان یک راکتور ADS شناخته شده است با استفاده از کدMCNPX 2.6محاسبهو اثرات الگوهای بارگذاری برای بیشینه کردن بازدهی تبدیل TRU ها به همراه سوخت مورد بررسی و محاسبه قرار گرفته شده است.

کلمات کلیدی : پارامتر های نوترونی، کد MCNPX ،راکتور زیر بحرانی ALMR اصلاح شده، الگو های بارگذاری

مقدمه:

درحال حاضرموضوع راکتورهای زیر بحرانی واداشته با شتاب دهنده (ADSR)درکشورهای مختلف جهان بسیارمورد توجه قرار گرفته است وتلاش های بسیاری در راستای صنعتی نمودن این نوع راکتورها انجام شده است.راکتورهایADSبه دلایل مختلفی مانند توانایی تولید انرژی وهمچنین قابلیت به اصطلاح سوزاندن زباله های هسته ای به طریقی تمیزترواینمن تراز آنچه در حال حاضرصورت می گیرد ، مورد توجه قرارگرفته‌اند.راکتورهای زیربحرانی می توانند جایگزین قابل اطمینانی برای راکتورهای زاینده‌ی سریع وراکتورگداخت باشند.راکتورهای زیربحرانی با چشمه شتاب دهنده ای پس ازسرگذاشتن مراحل اولیه ارزیابی شان دریک دهه اخیربه عنوان یکی ازانواع راکتورهای قدرت نسل آینده که درکنار تولیدبرق ، دارای قابلیت استحاله مواد رادیواکتیوبانیمه عمربالا وبه حداقل رساندن آلودگی رادیواکتیوکه برای سوخت های

[۱]-Accelerator Driven Subcritical Reactor

مصرف شده سایرراکتورهای قدرت می باشند ، معرفی شده اند.مزیت های اصلی چنین راکتورهایی عبارت است ازچشمه شتاب دهنده ای آن ها وکاردروضیت زیربحرانی می باشدکه عامل ایجادبرخی خصوصیات ایمن برای این گونه راکتورها است به گونه ای که امکان استفاده ازعناصرفراورانیوم وآکتنیدها رابه عنوان سوخت در آن امکان پذیرمی سازدکه نتیجه آن افزایش آهنگ استحاله زباله های هسته ای وکاهش نیازبه پسمانداری ودفن این گونه زباله ها به روش های معمول می باشد. عناصرفوق اورانیوم ازجمله ایزوتوپ های پلوتونیم ومحصولات شکافت به همراه آکتنیدهای کم مقدارپسمان های هسته ای راتشکیل می دهند واین پسمان ها دارای اکتیویته بالا، سمیت خطرناک ونیمه عمربلندی می باشند. بنابراین استفاده از راکتورهایADSجهت سوزاندن این پسمآن های هسته ای امکان پذیراست.ازطرفی پیشرفت در تکنولوزی ساخت شتاب دهنده ها وامکان استفاده از آن ها برای تولیدانرژی واز بین بردن پسمان های هسته ای موجب شده است که مراکزتحقیقاتی هسته ای مختلفی روی مدل های ADSتحقیق وبررسی کنند.در این تحقیق به محاسبه پارامترهای نوترونی یک راکتور زیر بحرانی واداشته با شتاب دهنده الکترونی جهت تبدیل هسته ای محصولات شکافت بلند مدت مانند ایزوتوپ های اورانیوم و پلوتونیوم و آکتنیدهای کم مقدار پرداخته شده است. ضریب تکثیر قلب یک راکتور زیر بحرانی کوچکتر از واحد است که حاصل از یک چشمه نوترون فوتوهسته ای در یک راکتور زیر بحرانی واداشته با شتاب دهنده الکترونی می باشد. در این سیستم طیف نوترون های تولید شده حاصل از واکنش تبدیل هسته ای و شکافت هستند.در این تحقیق، پارامترهایی از قبیل ضریب تکثیر موثر، میزان مصرف سوخت، راکتیویته، توزیع مکانی و زمانی شار و توان وغیره با استفاده از کد MCNPX محاسبه شده است.

روش کار:

در این تحقیق، در مرحله اول یک راکتور سریع فلز مایه پیشرفته(ALMR[1]) ،در سطح صنعتی، که با انجام اصلاحاتی در سیستم راکتور تبدیل به یک راکتور زیر بحرانی واداشته با شتاب دهنده الکترونی شده است برای مدل سازی و محاسبه پارامترهای نوترونی انتخاب شده است. سپس مدل سازی این راکتور با استفاده از کد MCNPX انجام شده است. در مرحله

[1] Advanced Liquid Metal Reactor

بعد پارامترهای نوترونی راکتور زیر بحرانیALMR اصلاح شده با استفاده از کد MCNPX محاسبه شده است که عبارتند از : ضریب تکثیر موثر، میزان مصرف سوخت، راکتیویته، توزیع مکانی و زمانی شار و توان. در نهایت با تغییر بعضی از پارامترهای اصلی مانند توزیع و انرژی الکترون، جنس و ضخامت ماده هدف پارامترهای مهم نوترونی دوباره در این راکتور زیر بحرانی واداشته با شتاب دهنده الکترونی محاسبه شده است.در ادامه مشخصات عمومی قلب راکتور زیر بحرانی ALMR اصلاح شده شرح داده خواهد شد.

مشخصات عمومی قلب راکتور زیر بحرانی ALMR اصلاح شده

طراحی یک راکتور جدید برای استفاده در یک ADS الکترون در قلمرو این مطالعه نیست. بنابراین برای استفاده در ساختار طراحی ADSدر طراحی یک راکتور سریع ، تغییراتی داده شد. یک راکتور سریع که از سدیم به عنوان خنک کننده و گرافیت به عنوان بازتابنده استفاده می کند برای قسمت راکتور یک ADS نیاز باشد. یک طراحی راکتور فلز مایع پیشرفتهکه به وسیلهشرکت General Electric تغییر داده شده، برای استفاده در طراحی ADS انتخاب شده است. ALMR یک طراحی راکتور سریع با خنک کننده سدیم است که در طی برنامه راکتور IFR[1]در آمریکا به وسیله وسیلهشرکت General Electric تغییر داده شده است[۲].

بنابراین استفاده از یک راکتوری که قبلا طراحی شده است، این امکان را به ما می‌دهد که فرض کنیم هیدرولیک های گرمایی و مشخصه های ایمنی قسمت طراحی راکتورADS خیلی نزدیک به مقدار قابل قبول باشد.

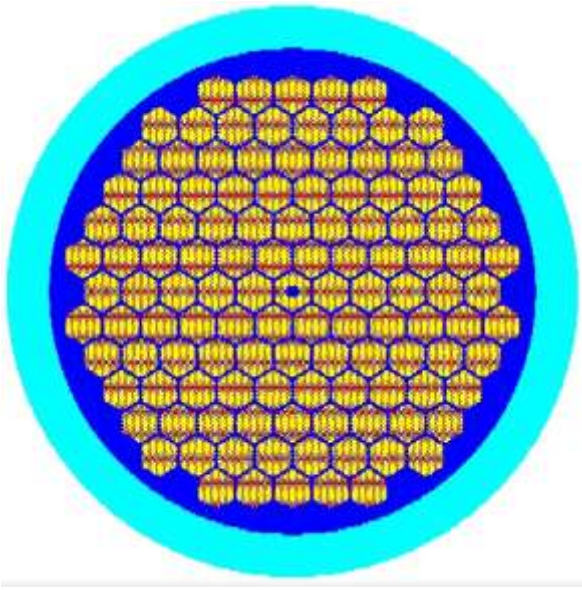
به عنوان یک نتیجه هیچ تضمینی وجود ندارد که ایمنی و توانایی های حرارتی طراحی اولیه دست نخورده بمانند و یک تحقیقات بیشتری نیاز است که قبل از این که کار را با طراحی راکتور پیشنهاد شده ادامه دهیم، از این بابت مطمن شویم. بنابراین تا حد امکان تغییرات کوچکی در طراحی ALMR داده شده است تا بتوان آن را در ADS بکاربرد[۲].برای استفاده از قلب راکتورALMR به همراه ADS ،اصلاح اولیه ای که نیاز است اضافه کردن ماده هدف به قلب راکتور است. طراحی ADS با این فرض است که ماده هدف برای همه آنالیزها در مرکز قلب راکتور قرار گرفته است.اما در طراحی قبلیALMR، یک میله کنترل در مرکز قلب قرار گرفته بود. از آنجایی که توانایی متوقف کردن تولید نوترون با ماده هدف به وسیله بستن شتاب دهنده به عنوان یک ویژگی ایمنی محسوب می‌شود حذف میله کنترل مرکزی و جا دادن ماده هدف در جای خالی بوجود آمده در این مطالعه مورد قبول فرض می‌شود.برای طراحی ALMRبا اضافه کردن ماده هدف درون مرکز قلب به صورت افقی و یک لوله پرتو از بالای قلب به سمت هدف به صورت عمودی، دراین تحقیق استفاده شده است.

[1] Integral Fast Reactor

در طراحی ALMR فاصله بین میله های سوخت به صورت مثلثی در نظر گرفته شده است. میله ها در مجتمع های سوخت شش ضلعی قرار گرفته اند، قلب راکتور شامل ۱۲۱ مجتمع سوخت است. مانند طراحی های دیگر راکتورهای سریع میله های سوخت در یک مجتمع سوخت در نزدیکی هم قرار گرفته‌اند. میله ها در یک مجتمع سوخت با یک پوشش سیمی به شکل مارپیچی بین میله های سوخت در کنار هم هستند. مشخصه های ابعادی برای طراحی ALMR، همان گونه که در این مطالعه استفاده شده، درجدول (۱)نشان داده شده است. یک آلیاژ TRU- Zrبا غلاف Zr به شکل سوخت، برای بکارگیری در طراحی ADS انتخاب شده است[۲].

جدول(۱)مشخصه های ابعادی راکتور[ALMR۳و۲]

ابعاد	مشخصات
107cm	ارتفاع سوخت در قلب
111.4cm	ارتفاع بیرونی مخزن قلب
103.10cm	شعاع بیرونی مخزن قلب
0.372cm	شعاع قرص سوخت
0.428cm	شعاع بیرونی غلاف سوخت
0.890568cm	فاصله بین میله های سوخت
61.14cm	فاصله بین مجتمع های سوخت
121.1 cm	شعاع بیرونی بازتابنده
103.1cm	شعاع داخلی بازتابنده



شکل ۱:LP1، زرد:Np-Pu-Am-Cm، شبیه سازی شده با استفاده از کد MCNPX

نتایج شبیه سازی و محاسبات سینتیکی قلب راکتور زیر بحرانی ADS الکترونی

مهمترین پارامترهای سینتیکی یک راکتور، کسر نوترون های تاخیری موثر (β_{eff}) و زمان متوسط تولید نوترون (Λ) می باشد. محاسبه دقیق پارامترهای سینتیکی قلب یک راکتور برای عملکرد ایمنی راکتورها بسیار مهم می باشد. بنابراین در این پژوهش سعی شده است این پارامترها برای حالت های مختلف راکتور زیر بحرانی ALMR اصلاح شده واداشته با شتاب دهنده محاسبه گردد. اصولا اندازه گیری (β_{eff}) و (Λ) به طور جداگانه بسیار مشکل است از این رو این پارامترها را از طریق محاسبات تعیین می کنند. با استفاده از روش مونت کارلو می توان به آسانی این پارامترها را محاسبه نمود.

محاسبه کسر نوترون‌های تاخیری موثر با استفاده از کد MCNPX

یکی از مواردی که در طراحی راکتورهای زیربحرانی واداشته با شتاب‌دهنده در نظر گرفته می‌شود، ترازهای مختلف زیربحرانی است. بنابراین در این مطالعه مقادیر کسر نوترون‌های تاخیری موثرو راکتیویته، برای دو حالت توزیع مکانی سهمی‌گون باریکه الکترونی و چشمه شکافت نوترونی در چهار الگوی بارگذاری سوخت درقلب راکتور زیربحرانی ALMR اصلاح شده واداشته با شتاب‌دهنده محاسبه شده است و نتایج در جدول (۲) درج شده است.

در ورودی برنامه برای محاسبه کسر نوترون‌های تاخیری موثرتعداد ۳۰۰۰ تاریخچه در نظر گرفته شده است. خطای محاسبات حاصل از کد کمتر از۵۰pcm بوده است.

جدول(۲) مقادیرکسرنوترون‌های تاخیری موثر و راکتیویته برای حالت های توزیع مکانی سهمی‌گون باریکه الکترونی وچشمه شکافت نوترونی درچهارالگوی بارگذاری مختلف قلب راکتورزیربحرانیALMR اصلاح شده

Loading pattern	Prompt neutron spectrom	k_{eff}	β_{eff}(pcm)	ρ(pcm)
LP1	Fission	0.9502±0.0003	168±	-5241±40
	(e,γ)&(γ,n)	0.9511±0.0003	294±	-5152±39
LP2	Fission	0.9317±0.0003	246±	-7333±43
	(e,γ)&(γ,n)	0.9325±0.0003	268±	-7238±43
LP3	Fission	0.9995±0.0003	260±	-50±7
	(e,γ)&(γ,n)	0.9999±0.0004	277±	-10±3
LP4	Fission	0.9304±0.0003	300±	-7480±45
	(e,γ)&(γ,n)	0.9305±0.0003	300±	-7469±41

همان‌طوری که در جدول (۲) مشاهده می‌شود با تغییر چیدمان سوخت در قلب مقدار کسر نوترون‌های تاخیری موثر حدودی تغییر می‌کند به دلیل اینکه چیدمان سوخت در قلب تغییر می‌کند.

محاسبه زمان متوسط تولید نوترون با استفاده از کد MCNPX

زمان متوسط تولید نوترون (Λ) به عنوان یک پارامتر سینتیکی مهم در تمام راکتورهای هسته‌ای نقش بسیار مهمی در تجزیه و تحلیل رفتار دینامیکی راکتورها دارد. بنابراین مقادیر ضریب‌تکثیر موثرو زمان متوسط تولید نوترون برای توزیع مکانی سهمی‌گون باریکه الکترونی و چشمه شکافت نوترونی درچهار الگوی بارگذاری سوخت در قلب راکتور زیربحرانی ALMR اصلاح شده واداشته با شتاب‌دهنده با استفاده از رابطه(۳-۶) محاسبه شده است که در جدول (۳) آورده شده است.

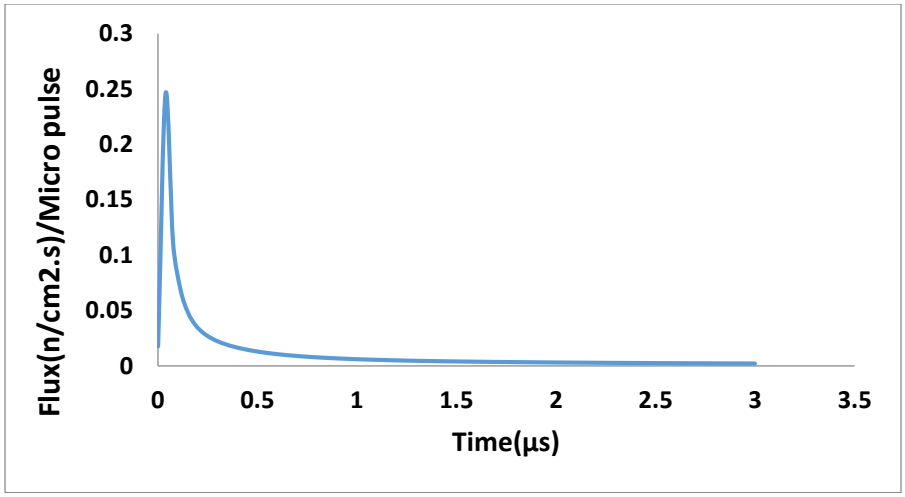
جدول(۳) مقادیرزمان متوسط تولیدنوترون برای توزیع مکانی سهمی‌گون باریکه الکترون برای چهار حالت بارگذاری مختلف قلب راکتور زیربحرانیALMR اصلاح شده

Loading pattern	Prompt neutron spectrom	k_{eff}	Λ(μs)
LP1	Fission	0.9502±0.0003	51.0±0.09
	(e,γ)&(γ,n)	0.9511±0.0003	51.1±0.08
LP2	Fission	0.9317±0.0003	57.5±0.10
	(e,γ)&(γ,n)	0.9325±0.0003	57.4±0.10
LP3	Fission	0.9995±0.0003	47.6±0.80
	(e,γ)&(γ,n)	0.9999±0.0004	47.8±0.80
LP4	Fission	0.9304±0.0003	57.2±0.96
	(e,γ)&(γ,n)	0.9305±0.0003	57.2±0.10

همان‌طوری که در **Error! Unknown switch argument.**مشاهده می‌شود با افزایش ضریب‌تکثیر موثر، مقدار زمان متوسط تولید نوترون با توجه به رابطه $\Lambda = \frac{l}{k}$ کاهش می‌یابد. بنابراین این پارامتر به مقدار ترازهای بحرانی وابسته خواهد بود.

۳-٤-٤ محاسبه شار بر حسب زمان

تغییرات شار بر حسب زمان در قلب راکتور زیر بحرانی ALMR اصلاح شده واداشته با شتاب‌دهنده برای حالت بارگذاری LP4 با استفاده از کد MCNPXو کارت های Fn و Tn (کارت بازه های زمانی به منوال کد مراجعه شود[۱]) محاسبه شده است که در شکل(۲)رسم شده است. همان طوری که شکل (۲) نشان می‌دهد آهنگ شار تقریبا پس از یک میکرو ثانیه به مقدار ثابت می‌رسد به دلیل اینکه معمولا نیمه عمر نوترون در راکتور های سریع در حد میکرو ثانیه می باشد.



شکل(۲) منحنی شار بر حسب زمان برای بارگذاری LP4 در قلب راکتور زیربحرانی ALMR اصلاح شده

نتایج:

در حال حا ضر یکی از جدیدترین نسل راکتورهای هسته ای مو سوم به راکتورهای ADS به دلایل مختلفی مانند توانایی تولید انرژی و همچنین قابلیت سوزاندن زباله های هسته ای به طریقی تمیز تر و ایمن تر از آنچه در حال حاضر صورت میگیرد مورد توجه قرار گرفته اند. در این تحقیق پارامتر های نوترونی و ســـنتیکی قلب یک راکتور زیر بحرانی ALMR ا صلاح شده وادا شته شده با شتاب دهنده الکترونی که به عنوان یک راکتور ADS شناخته شده ا ست با ا ستفاده از کدMCNPX 2.6محاســـبهو اثرات الگوهای بارگذاری برای بیشـــینه کردن بازدهی تبدیل TRU ها به همراه ســـوخت مورد بررسی و محاسبه قرار گرفته شده است. برای برآورد صحیح تر توصیه می شود محاسبات ترموهیدرولیکی جهت توزیع شارنوترونی انجام ونتایج با محاسبات انجام شده کوپل شود.

مراجع:

[1]-P. M. Swaney, Target and Core Optimization for an Electron AcceleratorDriven TransmutationFacility, A thesis of North Carolina University, 2007.

[2]- D. Ridikas, et al., Conceptual study of neutron irradiator Driven by Electron Accelerator,

CEA, France, 2002.
[3]- MCNPX- Monte Carlo N-Particle Transport Code System for Multiparticle and High Energy Applications, Version 2.4.0. Los Alamos National Laboratory,September 2002.
[4]-B. P. Denise, MCNPX User's Manual Version 2.6.0, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-07-1473, (2008).