فناوری و انرژی هسته ای

Journal home page: http://Nucte.sbu.ac.ir

فصلنامه فناوری و انرژی هسته ای، دوره اول، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ۳۲-۴۲

طراحی مفهومی و کنترل راکتیویته یک مجتمع سوخت بدون بور محلول با طول عمر بالا و غنای پایین

مجید حسینلو*[۱]

۱.دانشگاه شهید بهشتی،دانشکده مهندسی هسته ای،گروه راکتور

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۱۴

چکیده

راکتورهای SMR بدلیل کوچک و قابل حمل بودن و همچنین بعنوان پیشران هسته ای مورد توجه فراوان در چند سال اخیر قرار گرفته اند. دراین پژوهش مجتمع سوخت راکتور VVER-1000 به عنوان مبنا قرار داده شده و با روش‌ها و استدلال های خاصی فشرده و کوچک شده است. دراین تحقیق یک مجتمع سوخت بدون بور محلول و با تکیه بر جاذب های سوختنی مناسب جهت بکار گیری در قلب راکتور های SMR، طراحی و پیشنهاد شده است. ازچشم اندازها و اهداف این پژوهش به حذف اسیدبوریک از خنک کننده، تعیین تعداد میله های سوخت و ابعاد آنها کانال های راهنما درون مجتمع سوخت، تعیین چیدمان بهینه میله های سوخت و کانال های راهنما درون مجتمع سوخت، حفظ نسبت حجم سوخت به کندکننده و تعیین ابعاد مناسب مجتمع سوخت شش وجهی بدون بور برای به کارگیری در راکتورهای SMR اشاره کرد. از چالش های این طراحی حفظ نسبت حجم سوخت به کندکننده مجتمع سوخت مبنا برای مجتمع سوخت بدون بور طراحی شده به منظور حفظ گام میله های سوخت بود که با رعایت نکات نوترونیکی و ایمنی مرتفع گردید. طول سیکل مورد نظر برای مجتمع سوخت طراحی شده حدود ۴۰ ماه بوده است که به این منظور غنای سوخت ٪۶/۶ تعیین گردیده است. باتوجه به افزایش غنای سوخت در قلب راکتورهای SMR، راکتیویته در ابتدای سیکل بسیار بالاست، درنتیجه نیاز به جبران این راکتیویته می‌باشد. باتوجه به این نکات، یکی از مهمترین چالش ها در طراحی مجتمع سوخت، کنترل راکتیویته درابتدای سیکل، طول سیکل و یکنواختی توزیع توان، درغیاب اسیدبوریک بود که با طراحی مناسب جاذب سوختنی گادالینیا مرتفع گردید. مجتمع سوخت بدون بور طراحی شده دارای ۱۵۶ میله سوخت، ۱۲ کانال راهنما و ۱ کانال مرکزی می‌باشد. لازم به ذکر است که برای شبیه سازی مجتمع های سوخت و همچنین اطمینان از روند صحیح طراحی از کدهای MCNP و WIMS استفاده شده است.

واژه های کلیدی: راکتور-SMRمجتمع سوخت بدون بور محلول- مجتمع سوخت شش ضلعی - جاذب سوختنی

۱. مقدمه

* Corresponding Author E-mail: m.hosiinloo@mail.sbu.ac.ir

باتوجه به اهمیت راکتورهای SMR برای آینده ی انرژی هسته ای لازم است متناسب با شرایط جغرافیایی و امکانات صنعتی، این فناوری توسعه داده و اجرا شود. با مطالعه و شناسایی مزایا وچالش ها و کاربردهای مختلف این نوع راکتورها می‌توان نتیجه گرفت که مزایای راکتورهای SMR بیشتر از راکتورهای کنونی است و توسعه و راه اندازی این مدل از راکتورها برای پیشرفت انرژی، صنعت و دانش هسته ای لازم و ضروری است. SMR ها در مکان هایی که امکان ساخت نیروگاه های بزرگ قدرت وجود ندارد یک جایگزین مناسب و با دوام می‌باشند. به خاطر محدوده ی قدرت این راکتورها و انعطاف پذیری بیشتر، ساده سازی طراحی و شاخصه های ذاتی ایمنی غیرفعال آن‌ها، سرمایه گذاری و ریسک کمتر، برگشت سرمایه سریع تر، مدت زمان ساخت کوتاه تر وآسانتر بودن مدیریت آن‌ها به خاطر مونتاژ شدن درکارخانه می‌توانند فرصتی را فراهم کنند تا نیروگاه ها به مشتریان اصلی نزدیک‌تر باشند. (PENPP, 2016)

قلب راکتورهای) SMRراکتورهای کوچک زمینی و پیشران های هسته ای) اساساً با راکتورهای موجود درنیروگاه های قدرت که وظیفه تولید توان را برعهده دارند کاملاً متفاوت است. راکتورهای نیروگاه های قدرت هسته ای قادر به تولید توان تا ۱۶۰۰ مگاوات الکتریکی می‌باشند، این درحالی است که توان راکتورهای پیشران چند صد مگاوات الکتریکی می‌باشند. باتوجه به فضایی که SMRها اشغال می‌کنند و حجم بسیارکوچکی که نسبت به راکتورهای قدرت دارند، توان تولیدی آنها نسبت به فضایی که در برمی‌گیرند و حجمی که دارند بسیار بالاست، یعنی این راکتورها دارای چگالی توان بالایی می‌باشند. این نکته به این معنا می‌باشد که طراحی و تجهیزات این راکتورها دارای تنش های بیشتری نسبت به راکتورهای بزرگ قدرت هستند. در SMRها انواع برنامه های کاربردی انرژی از جمله نمک زدایی آب، فرآیندهای صنعتی، تولید هیدروژن، بازیابی نفت شل ،حرارت مرکزی ناحیه بندی شده که راکتورهای بزرگ قدرت معمول این شرایط را ندارند .(PENPP, 2016)

در زمینه راکتورهای آب تحت فشار که ایده اصلی آن از وستیگهاوس گرفته شد، ابتدا در ساخت محفظه تحت فشار این نوع راکتور به اشکال برخورد کرد زیرا تکنولوژی مواد و ساخت چنین دیگ هایی بافشار بیش از ۱۰۰ اتمسفر برخودار نبود، ولی به تدریج این تکنولوژی توسعه پیدا کرد. اولین تجارب از این راکتورها درساخت کشتی یخ شکن و زیردریایی به کار گرفته شد و بعد راکتورهایی به قدرت ۲۶۵ و ۳۳۸ مگاوات در Novo Voronezh مورد بهره برداری قرار گرفت و به نام VVER معروف شدند. ازسال ۱۹۷۰ طراحی نیروگاه های VVER با قدرت ۱۰۰۰ مگاوات شروع شد که برای استفاده بهینه از حجم قلب راکتور، مجتمع سوخت به صورت ۶ ضلعی منتظم ساخته می شود. شکل قلب راکتور در اطراف آن به صورت ۶ ضلعی باعث می‌شود که سیال خنک کننده به خوبی مخلوط شود و دیگر اینکه از امکان افت فشار زیاد در هنگام شرایط حادثه و اضطراری جلوگیری می‌کند. به طور کلی راکتورهای VVER با داشتن مجتمع های سوخت ۶ ضلعی دمای خروجی بیشتری دارند که این باعث می‌شود که راندمان حرارتی آن‌ها در مقایسه با راکتورهای PWR بیشتر باشد. همچنین حجم آب در گردش مدار اولیه و مولدهای بخار نیروگاه های VVER نسبت به نیروگاه های غربی باهمان قدرت، بیش از دو برابر می‌باشند و این ازمزایای مولدبخارVVER است. این اضافه حجم آب موجب می‌شود که در حالات اضطراری، زمان زیادتری برای اقدامات ضروری در دسترس باشد. با توجه به مزایای ذکر شده، اساس طراحی برای یک راکتورSMR در این تحقیق بر پایه مجتمع سوخت شش وجهی راکتور VVER-1000 می‌باشد.

امروزه یکی از مهمترین چالش های طراحی راکتورهای SMRحذف اسیدبوریک از مدار خنک کننده و حفظ بالانس نوترونی آنها می‌باشد. برای ساده سازی طراحی (حذف لوله ها، پمپ ها و سیستم تصفیه)، افزایش ایمنی راکتور و جلوگیری از خوردگی در طراحی راکتورهای) SMRبه خصوص راکتورهای مورد استفاده درپیشران های هسته ای) از اسیدبوریک برای کنترل راکتیویته استفاده نمی‌شود. بعلاوه، این نگرانی نیز وجود دارد که در راکتورهای دریایی که راکتیویته آن‌ها با اسیدبوریک کنترل می‌شود، رقیق شدن خنک کننده با آب دریا موجب ایجاد راکتیویته مثبت کندکننده شده و سبب ایجاد حادثه بحرانی

می‌شود. (D. K. Syed Bahauddin Alam et al.2019)

در سال های اخیر پژوهش هایی برروی راکتورهای SMR با سوخت اورانیوم غنای پایین و بدون اسیدبوریک انجام گرفته که به آن‌ها اشاره می‌شود. درسال ۲۰۱۴ Peakman [3]از دانشگاه منچستر و در سال ۲۰۱۸ Alam[2]از دانشگاه کمبریج اولین محققان راکتورهای بدون بور بودند. Peakman و همکارانش در تحقیق خود یک مجتمع سوخت بدون بور محلول با آرایه ی ۱۷×۱۷ با هندسه مربعی را طراحی کردند که با استفاده از جاذب های سوختنی منجر به کنترل راکتیویته شدند. Peakman و همکارانش در این طراحی با استفاده از جاذب های سوختنی سعی در تخت نمودن شار کرده اند که انتخاب مواد تشکیل دهنده جاذب های سوختنی یکی از چالش های این طراحی بوده است. آن‌ها با بررسی مواد رایج مورد استفاده در میله های جاذب سوختنی از جمله Er2O3، Gd2O3 و ZrB2 را مورد بررسی قرار دادند. Gd2O3 به دلیل سطح مقطع جذب بالای نوترون و همچنین مقاومت آن در برابر گاز هلیوم تولید شده در طول تابش را مناسب ترین ماده تشکیل دهنده جاذب های سوختنی دانستند، و در نتیجه Gd2O3 بعنوان جاذب سوختنی ترکیب شده (تا غلظت ۱۵٪ وزنی) با سوخت اورانیوم (U,Gd)O2 دراین طراحی انتخاب گردید.

درسال ۲۰۱۸ Alam رساله دکترا خود تحت عنوان " طراحی قلب راکتور هسته ای برای پیشران دریایی تجاری" را آغاز کرد. Alam در تحقیقات خود برای طراحی قلب راکتور پیشران، راکتور AP1000 که از نوع راکتور آبی تحت فشار است را مبنا قرارداد و با تدابیر و استدلال های خاصی منجر به کوچک شدن و فشرده شدن مجتمع های سوخت و قلب راکتور شد. Alam مجتمع سوخت ۱۷×۱۷ راکتور AP1000 را با برداشتن ۲ دور از میله ها به مجتمع سوختی با آرایه مربعی ۱۳×۱۳تبدیل کرد. از چالش های این طراحی می‌توان به حذف اسیدبوریک از خنک کننده، تعیین غنای سوخت، طول سیکل راکتور و انتخاب جاذب های سوختنی، اشاره کرد. از بررسی های انجام شده مشخص شد که جاذب یکپارچه از نظر کاهش راکتیویته اولیه، نوسانات راکتیویته و مقدار باقی مانده کمتر در انتهای سیکل موثرتر از گادالونیوم می‌باشد. از این رو از جاذب سوختنی گادالینیا بعنوان جاذب مخلوط شده درسوخت و از جاذب یکپارچه ZrB2 نیز بعنوان لایه ای از سوخت استفاده شده است. (S. B. Alam , 2018)

درسال ۲۰۱۹ ژوآن و همکارانش[۸] موفق به طراحی قلب راکتور SMRبدون بوربا برن آپ خیلی کم و طول سیکل پایین (حدود ۳۷ ماه) شدند. از ویژگی های این طراحی میتوان به غنای سوخت ۴/۹۵ درصد و چگالی توان پایین اشاره کرد. برای تخت کردن توان و کاهش ضریب حداکثر توان قلب به ۳ ناحیه با مجتمع های سوخت با غلظت های مختلف جاذب سوختنی گادالینیا تقسیم شده است.

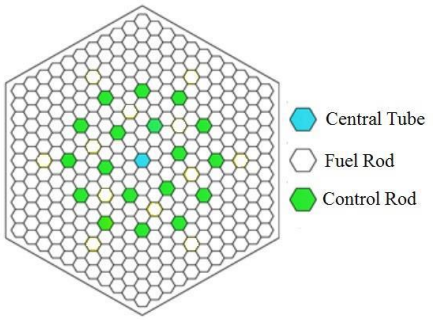
به طور کلی درسال های اخیر پژوهش هایی برروی طراحی راکتورهای SMR بدون بور صورت گرفته است که تمامی این طراحی ها برای راکتور های با مجتمع سوخت مربعی بوده است. دراین تحقیق سعی شده است تا برای اولین بار یک مجتمع شوخت شش وجهی بدون بور محلول جهت استفاده در راکتورهای SMR طراحی و پیشنهاد شود. (D. K. Syed Bahauddin Alam et al.2019)
در راکتورهای SMR بدون بور جبران راکتیویته اضافی به وسیله جاذب های سوختنی انجام می‌گیرد. در این تحقیق برای طراحی جاذب سوختنی برای مجتمع سوخت راکتور SMR، ۲ جاذب مورد بررسی قرار گرفته است: استفاده از ۱۲ میله جاذب سوختنی دی بورید کروم آلومینیوم ((CrB2+Alدرکانال های راهنما به صورت گسسته. استفاده از جاذب سوختنی گادالینیا با تعداد میله ها و غلظت های مختلف به صورت یکپارچه (مخلوط با سوخت اورانیوم).

۲. روش کار

دراین تحقیق برای مدل‌سازی مجتمع‌های سوخت از کدهای WIMS5B و MCNPX استفاده شده است. بعنوان تایید محاسبات قطعیتی (کد یقینی (WIMS5B از روش مونت کارلو (کد احتمالاتی (MCNPXاستفاده شده است. انتخاب این دو کد به این علت می‌باشد که سعی شده تا شبیه سازی ها و نتایج حاصل شده هم با یک کد یقینی و هم با یک کد احتمالاتی مطابقت داشته باشد تا صحت نتایج مشخص و راستی آزمایی انجام شود.

۱.۲. روند تعیین ابعاد مجتمع سوخت برای راکتور SMR پیشنهادی

مجتمع های سوخت راکتورVVER-1000 دارای۳۳۱ شش وجهی (شامل کانال مرکزی، کانال با میله های سوخت، کانال های راهنما و کانال آشکارسازی شار نوترون) می‌باشد که در ۱۰ آرایه مطابق شکل ۱ قرار می‌گیرند. (FSAR,2003)



شکل ۱. مجتمع سوخت راکتور VVER-1000

با محاسبه اطلاعات لازم و معرفی مجتمع سوخت راکتورVVER-1000، نحوه چیدمان میله های سوخت در مجتمع سوخت میتوان به روند کوچک کردن مجتمع سوخت برای راکتور SMR پرداخت. در این مرحله از طراحی و کوچک کردن مجتمع سوخت، چند دور از کانال های میله های سوخت از دور مجتمع های سوخت (با شرط حفظ نسبت سوخت به کندکننده) کم می‌شوند.

با توجه به داده های مجتمع سوخت راکتور-VVER 1000، مساحت یک کانال میله سوخت برابر با ۱/۴۰۷۸ سانتی‌متر می‌باشد.

$$S_{FR} = 1.4078\ [cm^2]$$

شعاع معادل برای یک مجتمع سوخت با ۳۳۱ کانال از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$331 \times S_{FR} = \pi r^2 \rightarrow r = \sqrt{\frac{331 \times S_{FR}}{\pi}} = 12.1789\ [cm]$$

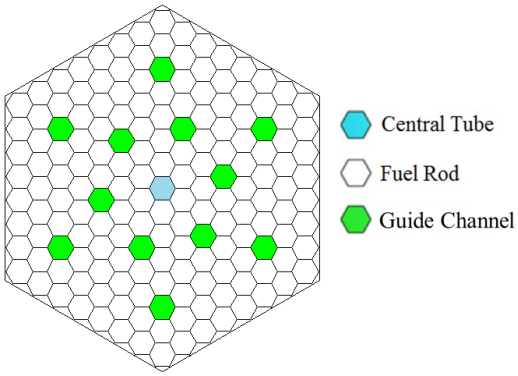
در طراحی مجتمع سوخت شش وجهی، سه دور از کانال های میله های سوخت از دور مجتمع سوخت برداشته می‌شوند، بنابراین تعداد کانال ها به ۱۶۹ کانال کاهش می‌یابد. شعاع معادل یک مجتمع سوخت با این تعداد کانال برابر است با

$$\boldsymbol{r} = \sqrt{\frac{169 \times \boldsymbol{S_{FA}}}{\boldsymbol{\pi}}} = 8.7023\ [cm]$$

مقدار کاهش شعاع معادل مجتمع سوخت به ازای برداشتن سه دور کانال میله سوخت برابر با مقدار زیر می‌باشد:

$$\boldsymbol{r} = 12.1789 - 8.7023 = 3.4766\ [cm]$$

همانطور که تشریح شد، مجتمع سوخت راکتور VVER-1000 با ۳۳۱ میله در ۱۰ آرایه با برداشتن ۳ دور از میله های سوخت از دور مجتمع سوخت، به مجتمع سوختی با ۱۶۹ میله و ۷ آرایه تبدیل گردید. شکل ۲ مجتمع سوخت راکتورSMR طراحی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مجتمع سوخت راکتورSMR طراحی شده

نسبت کاهش کانال های میله های سوخت ۵۰٪ در هر مجتمع سوخت و کاهش کل میله ها ۴۹٪ درهر مجتمع سوخت نسبت به مجتمع سوخت راکتور VVER-1000 می‌باشد. در مجتمع سوخت راکتورVVER-1000، 18 کانال راهنما و ۱ کانال مرکزی قرار دارد (حدود۶ درصد از کانال ها را دربرمی‌گیرد). در طراحی جدید راکتور SMR سعی شده است تا همین نسبت برای طراحی مجتمع سوخت جدید نیز رعایت شود، بنابراین ۱۲ کلنال راهنما برای قرارگیری میله های کنترل(حدود ۷درصد از میله ها) و ۱۵۶ میله سوخت در مجتمع سوخت قرار دارد. جدول۱ به مقایسه پارامترهای مجتمع سوخت راکتورVVER-1000 و مجتمع سوخت راکتور SMR طراحی شده پرداخته است.

جدول۱. مقایسه پارامترهای راکتورVVER-1000 و راکتور SMR طراحی شده

پارامتر	پارامتر اولیه (راکتور VVER-1000)	پارامتر های طراحی شده (راکتور SMR)	نسبت کاهش(٪)
مساحت مجتمع سوخت، cm^2	482.24	233.42	52
تعداد میله ها، pcs	331	169	49
تعداد میله های سوخت، pcs	312	156	50
ارتفاع مجتمع سوخت، m	3.53	1.75	50

۲.۲. حفظ نسبت سوخت به کندکننده درمجتمع سوخت شش وجهی طراحی شده

محاسبات ضریب تکثیر بینهایت برای مجتمع سوخت بدون بور محلول توسط دو کد WIMS و MCNP انجام می‌گردد. برای انجام شبیه سازی ها و تطبیق ضریب تکثیر بینهایت توسط کدهای WIMS و MCNP ، تمامی کمیت ها در ورودی هر دو کد یکسان وارد شده اند. این کمیت ها شامل هندسه، نسبت حجم سوخت به کندکننده، درصد وزنی عناصر مختلف، شناسه مواد مختلف، دما و چگالی یکسان می‌باشد. هدف از تطبیق نتایج کدهای WIMS و MCNP برای محاسبات ضریب تکثیر بینهایت سیستم به منظور تایید مدلسازی مجتمع سوخت بودن بور محلول میباشد که نتایج کدهای WIMS و MCNP نشان میدهد که روند انجام شبیه سازی مجتمع سوخت به درستی انجام شده است.

یکی از مهمترین پارامترهای نوترونی در فیزیک راکتور، ضریب تکثیر ذاتی (بینهایت) سیستم می‌باشد. (L. Hamilton,2011) این پارامتر مستقل از شکل و هندسه راکتور است و در برگیرنده مواد سوخت و کندکننده بدون در نظر گرفتن میزان نشت نوترون می‌باشد که در طراحی راکتورها بکار برده می‌شود:

$$K_\infty = f.p.\eta.\varepsilon \quad (۱)$$

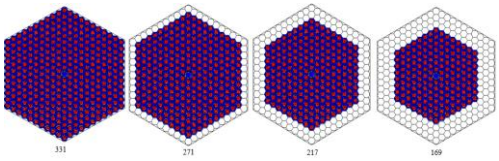
که در این رابطه K_∞ ضریب تکثیر بینهایت، f ضریب بهره وری حرارتی، η ضریب تکثیر حرارتی، p احتمال فرار از رزنانس و ε ضریب شکافت سریع می‌باشد.

لازم به ذکر است که با کاهش میله های سوخت از دور مجتمع های سوخت برای تعیین ابعاد جدید مجتمع سوخت پارامترهای p، η، ε برای محاسبه ضریب تکثیر بینهایت (در هر دو مجتمع سوخت) یکسان بوده و می بایست پارامتر ضریب بهره وری حرارتی که شامل نسبت حجم سوخت به حجم کند کننده می‌باشد، رعایت شود و در هر دو نوع مجتمع سوخت ثابت باشد تا ضریب تکثیر بینهایت سیستم نیز در تمام حالات ثابت باشد. ضریب بهره حرارتی نسبت نرخ جذب نوترون حرارتی در سوخت به نرخ کل جذب نوترون در همه مواد و پارامتری وابسته به میزان شار متوسط در کندکننده و سوخت (در حالتی که تنها کند کننده و سوخت را در نظر بگیریم) است همانطور گفته شد یکی ازفاکتورهای تعریف ضریب تکثیر می باشد:

$$f = \frac{\sum_a^F}{\sum_a^F + \sum_a^M \frac{V_M}{V_F}\frac{\overline{\varphi_M}}{\overline{\varphi_F}}} \quad (۲)$$

همانطور که توضیح داده شد، برای تعیین ابعاد مجتمع سوخت جدید، در مرحله ی اول یک دور از کانال های میله سوخت (۶۰ عدد) از دور مجتمع سوخت برداشته می‌شود و محاسبات ضریب تکثیر بینهایت برای مجتمع سوخت توسط دو کد WIMS و MCNP انجام می‌گردد. در مرحله دوم، ۲ دور از میله های سوخت از دور مجتمع سوخت کم می‌شود. درمرحله سوم، ۳ دور از میله های سوخت از دور مجتمع سوخت کم می‌شود. در این مرحله از طراحی برای یک مجتمع سوخت با غنای ۲/۴٪ ضریب تکثیر بینهایت سیستم محاسبه گردیده است. برای انجام شبیه سازی ها و تطبیق ضریب تکثیر بینهایت توسط کدهای WIMS و MCNP ، تمامی کمیت ها در ورودی هر دو کد یکسان وارد شده اند. این کمیت ها شامل

هندسه، نسبت حجم سوخت به کندکننده، درصد وزنی عناصر مختلف، شناسه مواد مختلف، دما و چگالی یکسان می‌باشد. شکل ۳ مجتمع های سوخت شبیه سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳. مدل‌سازی های مجتمع سوخت با ۳۳۱، ۲۷۱،۲۱۷ و ۱۶۹ میله

درجدول۲ نتایج برای مجتمع های سوخت که فقط شامل میله های سوخت می‌باشند و به ازای کتابخانه های مختلف کد WIMS آورده شده است. نتایج جدول۲ نشان می‌دهد که ضریب تکثیر بینهایت سیستم مستقل از هندسه و ابعاد راکتور می‌باشد و بیانگر این نکته می‌باشد که ضریب تکثیر بینهایت دراین مجتمع های سوخت تنها بستگی به مواد دارد.

جدول۲. نتایج ضریب تکثیر کد WIMS در مقایسه با کد MCNP

تعداد میله های سوخت	کتابخانه	نتایج WIMS	نتایج MCNP	اختلاف نتایج برحسب درصد($\Delta K/K$)
331	WIMS5B WLUP-69 WLUP-172	1.321323E+00 1.328606E+00 1.330623E+00	1.32462 E+00	**0.2489** **0.3009** **0.4531**
271	WIMS5B WLUP-69 WLUP-172	1.321194E+00 1.328471E+00 1.330525E+00	1.32487 E+00	**0.2774** **0.2718** **0.4268**
217	WIMS5B WLUP-69 WLUP-172	1.320977E+00 1.328248E+00 1.330222E+00	1.32479 E+00	**0.2878** **0.2610** **0.410**
169	WIMS5B WLUP-69 WLUP-172	1.320739E+00 1.328001E+00 1.330038E+00	1.32525 E+00	**0.3403** **0.2075** **0.3612**

از نتایج جدول۲ می‌توان نتیجه گرفت با برداشتن میله های سوخت از دور مجتمع سوخت، ضریب تکثیر بینهایت ثابت مانده است، به عبارت دیگر یعنی نسبت حجم سوخت به کندکننده حفظ شده است. باتوجه به ثابت نگه‌داشتن نسبت حجم سوخت به کندکننده گام میله های سوخت راکتورVVER-1000 را می‌توان برای راکتورSMR طراحی شده نیز استفاده کرد.

۳.۲. تعیین ارتفاع مجتمع سوخت

یکی از الزامات طراحی قلب در این تحقیق حفظ نسبت ارتفاع به قطر قلب راکتور VVER-1000، برای قلب راکتور SMR نیز می‌باشد. نسبت H/D برای راکتور VVER-1000 برابر با مقدار زیر می‌باشد.

(S. B. Alam,2018)

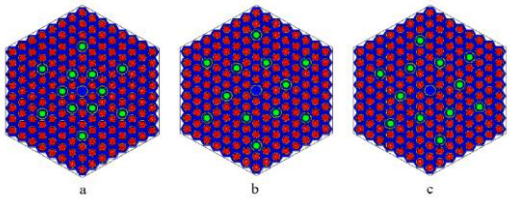
$$\frac{H}{D}=\frac{3.53}{3.16}=1.11$$

در نتیجه با ثابت نگه‌داشتن نسبتH/D و همچنین تخمین قطرقلب میتوان ارتفاع مجتمع سوخت راکتورSMR را طبق رابطه زیر تعیین نمود.

$$1.11=\frac{H}{1.58}\rightarrow H=1.75\ [\mathrm{m}]$$

۲.۴. جایابی کانال های راهنما

بعد از مشخص کردن تعداد کانال های راهنما، چالش دیگر محل قرارگیری کانال های راهنما در مجتمع سوخت می‌باشد. برای این کار ارزش محل قرارگیری کانال های راهنما در موقعیت های مختلف بررسی شده است. برای مشخص کردن محل قرارگیری ۱۲ کلنال راهنما (برای میله های کنترل) در کلنال های راهنما ماده جاذب B4C یا کربیدبور قرار داده شده است. ۶ کانال راهنما از دور آخر کانال های راهنما در مجتمع سوخت حذف شده است. حال ۱۲ کانال راهنما در دو لایه قرار دارند. برای تعیین موقعیت بهینه کلنال های راهنما ۱۲ کانال در ۲ لایه طبق شکل ۴ قرار گرفته اند. نتایج بیانگر این امر میباشد که که شکل ۴-b 4 بیشترین ارزش راکتیویته منفی را دارد. در نتیجه شکل ۴-b بعنوان محل قرارگیری میله های کنترل انتخاب می‌شود. (M. A. Rahman Gharari,2016)



شکل ۴. جایابی کانال های راهنما برای مجتمع سوخت سوخت شش وجهی طراحی شده

همچنین مشخصات مجتمع سوخت بدون بور

محلول طراحی شـده دراین تحقیق در جدول ۳ نشـان داده شده است.

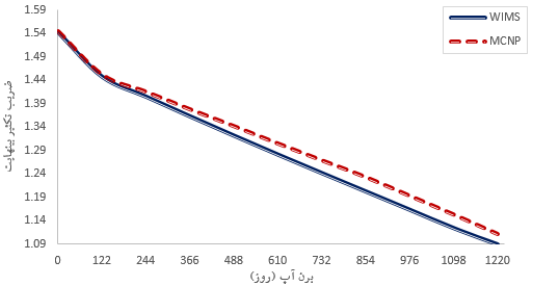
جدول ۳. مشخصات مجتمع سوخت بدون بور طراحی شده

پارامتر	کمیت
هندسه مجتمع سوخت	شش ضلعی
تعداد میله های سوخت درهرمجتمع، pcs	156
گام میله های سوخت، mm	12.75
جرم سوخت درمجتمع سوخت، Kg	121.80
تعداد کانال های راهنما، pcs	12
کانال مرکزی، pcs	1
جنس ماده قرص سوخت	UO_2
غنای سوخت	6.6%
جنس غلاف	آلیاژ Zr+1%Nb

۵.۲. محاسبات برن آپ برای مجتمع سوخت شش وجهی بدون بور طراحی شده

برای دسـتیابی به طول سـیکل ۴۰ ماه لازم اسـت تا محاسـبات مربوط به برن آپ با هردو کد مورد بررسـی قرار بگیرد، تا صحت نتایج

مشـخص شـود. نمودار رسـم شـده در شـکل ۵ به ترتیب مقایسه برن آپ در کدهای WIMS و MCNP را برای مجتمع سـوخت طراحی شـده با غنای ٪۶/۶ را نشان می‌دهد. (X. Ha,2019) و (IAEA,2016) و (IAEA,2018) و (L. v. d. Merwe,2018)



شـکل ۵. مقایسـه برن آپ برای غنای ٪۶/۶ با کدهای WIMS و MCNP

۶.۲. تعیین جاذب سـوختنی مناسـب برای مجتمع سوخت طراحی شده

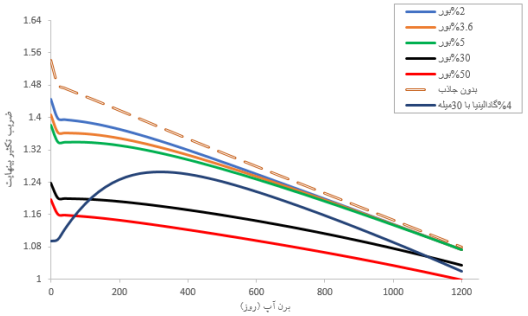
پس از اینکه مجتمع سـوخت شـش وجهی بدون بور محلول طراحی گردید، میبایسـت راکتیویته ابتدای سیکل و در طول سیکل آن مورد بررسی قرار گیرد، لذا در این تحقیق برای طراحی سـموم سـوختنی برای راکتور SMR، ۲ جاذب مورد بررسـی قرار گرفته اسـت: ۱- استفاده از ۱۲ میله جاذب سوختنی دی بورید کروم آلومینیوم ((CrB2+Alدرکانال های راهنما به صـورت گسـسـته. ۲- اسـتفاده از جاذب سـوختنی گادالینیا با تعداد میله ها و غلظت های مختلف به صـورت یکپارچه (مخلوط با سوخت اورانیوم). یکی از مهمترین چالش-ها در طراحی سـموم سـوختنی برای راکتورSMR تعیین ماده مورد اسـتفاده بعنوان جاذب سـوختنی می‌باشـد. با توجـه بـه اینکـه اسـاس طراحی راکتورSMR در این تحقیق بر پایه ی راکتور قدرت صورت گرفته است، ابتدا سـعی بر این شـده اسـت که امکان اسـتفاده از جاذب سـوختنی دی بورید کروم آلومینیوم ((CrB2+Alدر کانال های راهنما بررسی شود.

(الف) جاذب سوختنی بور((CrB2+Al

عنصـر بور بعنوان جاذب نوترون به شـکل های مختلفی مانند ZrB2، B4C، CrB2+Al و... قابل استفاده می‌باشد. در این قسمت بور به صورت دی بورید کروم آلومینیوم((CrB2+Alبه منظور کاهش راکتیویته اضـافی شـروع قلب و کاهش نوسـانات راکتیویته مورد استفاده قرار می‌گیرد. دراین ترکیب شیمیایی میتوان از مخلوط طبیعی بور اسـتفاده کرد که حاوی تقریباً ٪۱۹ بور-۱۰ و ٪۸۱ بور-۱۱ و همچنین مخلوط غنی شـده با ایزوتوپ) B10با میزان تا٪۷۵ از این ایزوتوپ) اسـت. سطح مقطع جذب ترکیبی بور طبیعی حدود ۷۵۰ بارن و برای مخلوط غنی شـده با ایزوتوپ B10 درحدود ۴۰۱۰ بارن می‌باشد.

در این قسمت از طراحی سموم سوختنی ۱۲ میله جاذب سـوختنی با جنس دی بورید کروم آلومینیوم به صورت گسسته و با غلظت های مختلف بور، درون کانال های راهنما قرار می‌گیرند. شـکل ۵ نشـان می‌دهد که حتی غلظت های بالای بور(٪۵۰) نیز قادر به تامین راکتیویته مورد نظر ابتدای سـیکل مجتمع سـوخت طراحی شده راکتور SMR نمی‌باشد. همچنین شکل ۵

نشـان می‌دهد اسـتفاده از جاذب سـوختنی گادالینیا با توجه به مزایای آن(کاهش راکتیویته اضـافی درابتدای سیکل، افزایش طول سیکل و همچنین کاهش نوسانات راکتیویته)، در این تحقیق برای راکتورSMR مناسب تر می‌باشد. در ادامه بررسی های صورت گرفته برای جاذب سوختنی گادالینیا به تفصیل بیان می‌شود.



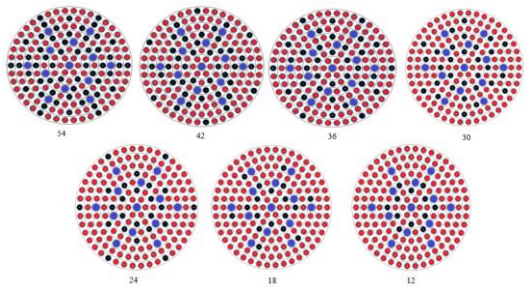
شـکل ۵. مقایسـه‌ی اسـتفاده از جاذب های سـوختنی حاوی بور وگادالینیا با غلظت ۴٪

با توجه به اینکه میله های حاوی بور(با غلظت ۵۰٪) قادر به جبران راکتیویته اضـافی در مجتمع سوخت با غنای ۶/۶ ٪ نبودند، در نتیجه این میله ها در مجتمع های سـوخت با غناهای بالاتر نیز نمی‌توانند مورد اسـتفاده قرار بگیرند. علی رغم اینکه محصـولات ثانویه تولیدی در اثر جذب نوترون در جاذب بور از سـطح مقطع پایینی برخوردار اسـت اما به علت پایین بودن سـطح مقطع جذب آن قادر به جبران راکتیویته اضافی نمی‌باشد.

(ب) جاذب سوختنی گادالینیوم(Gd2O3)

این نوع جاذب سـوختنی به صـورت ترکیب تری اکسـید گادالینیا با گادالینیا طبیعی تهیه می‌شـود که شش ایزوتوپ مختلف با جرم اتمی از ۱۵۲ تا ۱۶۰ دارد. مقدار متوسط سطح مقطع جذب نوترون حرارتی برای این عنصر درحدود ۴۶۶۰۰ بارن می‌باشد. در این تحقیق در طراحی مجتمع هـای سـوخت برای راکتورSMR جاذب های سـوختنی گادالینیا با تعداد و غلظت های مختلف مورد بررسـی قرار گرفته لند. در ابتدا چیدمان بهینه میله های جاذب سـوختنی حاوی گادالینیا (مخلوط با سـوخت) در مجتمع های سـوخت صـورت گرفته است. مدلسازی ها برای مجتمع های سوخت با تعداد ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۳۰، ۳۶، ۴۲ و۵۴ میله جاذب با غلظت های ۲٪-۲۵٪ انجام شده است.

برای چیدمان بهینه میله های جاذب درون مجتمع های سـوخت ۴ عامل مورد توجه قرار گرفته اسـت: ۱- قرارگیری میله های جاذب در مجتمع سـوخت دارای تقارن یک شـشـم باشـد.۲- میله های جاذب سـوختنی کمترین هم پوشـانی را با یکدیگر داشـته باشـند. ۳- میلـه-هـای جـاذب در موقعیتی قرار بگیرند کـه دارای بیشـترین ارزش راکتیویته باشـند و ۴- در زمان چینش در قلب راکتور قادر به کنترل پیک توان در راسـتای شـعاعی باشـند. با در نظر گرفتن این ۴ عامل، طراحی و چینش میله های جاذب برای مجتمع های سـوخت راکتور SMR انجام شده است. در تمامی شکل ها میله های سیاه حاوی جاذب سوختنی و سوخت و میله های قرمز فقط حاوی سـوخت می‌باشـند. شـکل ۵۵ چیدمان مجتمع های سوخت با تعداد ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۳۰، ۳۶، ۴۲ و۵۴ میله های جاذب سوختنی را نشان می‌دهد.

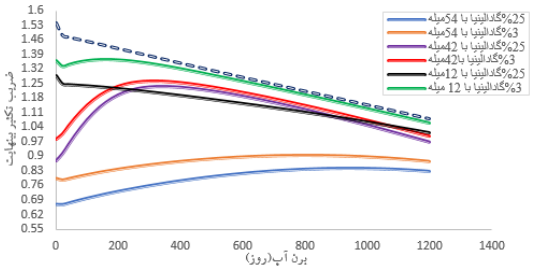


شـکل۶. چیدمان مجتمع های سـوخت با تعداد ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۳۰، ۳۶، ۴۲ و۵۴ میله های جاذب سوختنی

۷.۲. بررسـی درصد وزنی مناسب برای مجتمع های سوخت بدون بور محلول

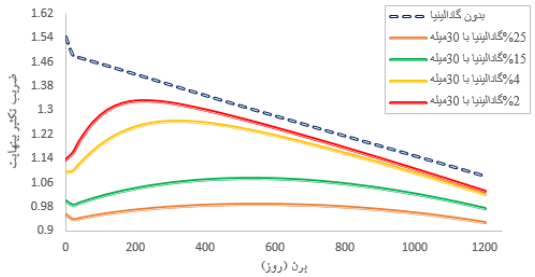
برای تعداد مختلف میله های جاذب، درصـدهای وزنی مختلف گادالینیا درحالت سرد توان صفر مجتمع سوخت بررسی شده است. با توجه به شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که مجتمع های سـوخت با ۵۴ و۴۲ میله جاذب حتی با ۳٪ وزنی گادالینیا و در حالت سـرد مجتمع نیز بحرانی نمی‌شوند و ضریب تکثیر بینهایت و در این دو حالت در ابتدای سـیکل به شـدت افت پیدا می‌کند که این حالت قابل قبول نمی‌باشـد (برای ۲۵٪ وزنی نیز بررسـی انجام شـده اسـت. به شـکل ۷ توجه کنید). با توجه به توضیحات داده شده استفاده از ۵۲ و ۴۲ میله جاذب سـوختنی ممکن نمی‌باشـد. همچنین برای ۱۲ میله جاذب سوختنی نیز بررسی ها انجام شده است. برخلاف مجتمع های سوخت با تعداد بالای میله

های جاذب سوختنی که راکتیویته شروع سیکل را به شدت با کاهش چشم گیری مواجه می‌کردند، مجتمع سوخت با ۱۲ میله جاذب سوختنی حتی با ۲۵٪ وزنی از گادالینیا نیز قادر به جبران راکتیویته اضافی ابتدای سیکل نمی‌باشد. در نتیجه استفاده از مجتمع سوخت با ۱۲ میله جاذب سوختنی نیز ممکن نیست.



شکل ۷. مقایسه نتایج ضریب تکثیر بینهایت برای ۵۴، ۴۲، ۱۲ وبدون میله جاذب سوختنی گادالینیا

بررسی ها برای مجتمع سوخت با ۳۰ میله جاذب سوختنی با درصد های وزنی مختلف نیز انجام گرفته است. با توجه به اینکه بررسی ها و نتایج مربوط به حالت سرد می‌باشند، در نتیجه ضریب تکثیر بینهایت مجتمع های سوخت بالا می‌باشد. برای استفاده از این مجتمع های سوخت درون قلب راکتورSMR می بایست تا شبیه سازی ها و نتایج درحالت گرم توان نامی مورد بررسی قرار بگیرد. درنتیجه مجتمع های سوخت برای غلبه بر کاستی دما و کاستی توان باید راکتیویته اضافی مورد نظر را نیز داشته باشند. با توجه به توضیحات ارائه شده مجتمع های سوخت با ۳۰، ۲۴ و ۱۸ میله جاذب انتخاب می‌شوند. و همچنین همانطور که در ابتدای این بخش نیز گفته شد برای ۳۰ میله جاذب سوختنی ها در شکل۸ نشان داده می‌شود.



شکل۸. مقایسه نتایج ضریب تکثیر بینهایت برای ۳۰میله جاذب گادالینیومی با غلظت های متفاوت وبدون میله جاذب

با توجه به شکل۸، نتایج نشان میدهد که استفاده از درصدهای وزنی بالا (۱۵٪ و ۲۵٪) برای مجتمع سوخت با ۳۰ میله جاذب سوختنی، باعث می‌شود تا مجتمع سوخت در ابتدای سیکل زیر بحرانی شود و همچنین در انتهای طول سیکل مورد نظر نیز زیر بحرانی باشد. همچنین در مقایسه ی بین درصد وزنی گادالینیا ۲٪ و ۴٪ نیز مجتمع سوخت با درصد وزنی ۲٪ گادالینیا راکتیویته اضافی بالایی می‌باشد که این حالت نیز قابل قبول نمی‌باشد. در نتیجه با توجه به نکات ذکر شده و همچنین شکل۸ مشخص می‌گردد که برای مجتمع سوخت طراحی شده درصد وزنی ۴٪ گادالینیا به دلیل تامین راکتیویته مورد نظر در ابتدای سیکل و همچنین بحرانی نگه داشتن مجتمع سوخت در طول سیکل انتخاب می‌شود.

۳. نتیجه گیری

دراین تحقیق مجتمع سوخت راکتورVVER-1000 با تدابیر واستدلال های خاصی برای تبدیل شدن به مجتمع سوخت جهت استفاده در راکتور SMR فشرده و کوچک شد. مجتمع سوخت راکتور VVER-1000 با ۳۳۱ میله در ۱۰ آرایه با برداشتن ۳ دور از میله های سوخت از دور مجتمع سوخت، به مجتمع سوختی با ۱۶۹ میله و ۷ آرایه تبدیل گردید. تعداد میله های سوخت از ۳۱۱ میله سوخت به ۱۵۶ میله سوخت کاهش یافت. در مجتمع سوخت راکتورVVER-1000، ۱۸ کانال راهنما و ۱ کانال مرکزی قرار دارد (حدود ۶ درصد از میله ها را دربرمیگیرد). در طراحی جدید مجتمع سوخت سعی شده است تا همین نسبت برای طراحی مجتمع سوخت جدید نیز رعایت شود، بنابراین ۱۲ کانال راهنما برای قرارگیری میله های کنترل (حدود ۷ درصد از میله ها) و ۱۵۶ میله سوخت در مجتمع سوخت قرار دارد. نسبت کاهش میله های سوخت در مجتمع سوخت ۵۰٪ و کاهش کل کانال ها ۴۹٪ در هر مجتمع سوخت نسبت به مجتمع سوخت راکتور VVER-1000 میباشد. همچنین دراین تحقیق باتوجه به شبیه سازی ها و محاسبات مشخص شد که مجتمع سوخت شش وجهی طراحی شده نسبت به حالت اولیه حدود ۵۰٪ کاهش کوچکتر شده است. طول سیکل مورد نظر برای مجتمع سوخت طراحی شده حدود ۴۰ ماه بوده، که برای این منظور غنای سوخت

در این پژوهش ٪۶/۶ تعیین گردید. پارامترهای مختلف نوترونیکی از جمله ضریب تکثیر بینهایت مجتمع سوخت، راکتیویته ابتدا و انتهای سیکل و محاسبات برن آپ انجام گردید که نتایج ذکر شده نشان دهنده ی صحت شبیه سازی مجتمع سوخت و نتایج میباشد. با توجه به بررسی های صورت گرفته مجتمع های سوخت حاوی میله های جاذب سوختنی با درنظر گرفتن ۴ عامل طراحی و بهینه سازی شدند. با توجه به نتایج مشخص گردید که جاذب سوختنی CrB2+Al با غلظت های بالای بور(٪۵۰) نیز قادر به تامین راکتیویته مورد نظر ابتدای سیکل مجتمع سوخت طراحی شده نمی باشد، اما جاذب سوختنی گادالینیا به دلایلی هم چون داشتن سطح مقطع جذب بالا، سطح مقطع جذب پایین عنصر تولیدی ثانویه و کنترل راکتیویته مناسب درطول سیکل بعنوان ماده جاذب سوختنی در این تحقیق تعیین شد. همچنین مشخص شد که برای مجتمع سوخت با غنای پایین از میله های جاذب با غلظت گادالینیا ۴٪ استفاده می‌شود.

مراجع

س. محجوب, "مزایا(انگیزه ها) و چالش های راکتورهای مدولار کوچک," PENPP, 2016.

D. K. Syed Bahauddin Alam, Bader Almutairi, Palash Kumar Bhowmik, and G. T. P. Cameron Goodwin, "Small modular reactor core design for civil marine propulsion using microheterogeneous duplex fuel. Part I: Assembly-level analysis" Elsevier, 2019.

H. O. Aiden Peakman, Tim Abram, "The core design of a Small Modular Pressurised Water Reactor for commercial marine propulsion," Elsevier, 2019.

A. E. O. O. IRAN, "FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT," 2003.

L. Hamilton, Nuclear reactor's analysis. 2011.

S. B. Alam, "The Design of Reactor Cores for Civil Nuclear Marine Propulsion," Doctor of Philosophy, Department of Engineering, University of Cambridge, 2018.

M. A. Rahman Gharari, "Implementation of Strength Pareto EvolutionaryAlgorithm II in the Multiobjective Burnable Poison Placement Optimization of KWU Pressurized Water Reactor," Elsevier, 2016.

X. Ha, "An advanced core design for a soluble-boron-free small modular reactor ATOM with centrally-shielded burnable absorber," Elsevier, 2019.

IAEA, "Advances in Small Modular Reactor Technology Developments," Austria2016.

IAEA, "Advances in Small Modular Reactor Technology Developments," Austria2018.

L. v. d. Merwe, "Reactivity balance for a soluble boron-free small modular reactor," Elsevier, 2018.

Nuclear Technology and Energy

Journal home page: http://Nucte.sbu.ac.ir

Nuclear Technology and Energy, Vol. 1, No. 1, Winter 2023, 43-53

Conceptual Design and reactivity control of long-life and LEU soluble boron free Hexagonal Fuel Assembly

M. Hosseinllu*[1]

[1]Faculty of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 9 - 8 - 2021
Accepted: 5 - 9 - 2022

Abstract

In recent years SMRs have received a lot of attention due to their small size and portability, as well as some nuclear propulsion. In this research, VVER-1000 fuel assembly has been used as a basis and has been compacted and reduced by special methods and arguments. In this paper, a hexagonal fuel assembly without soluble boron and rely on suitable burnable absorbers has been designed and proposed for use in the SMRs. The objectives of this research are elimination of boric acid from the coolant, determine the number of fuel rods and guide channels inside the fuel assembly, determine the optimal arrangement of fuel rods and guide channels inside the fuel assembly, keeping the fuel to moderator ratio and determine the appropriate dimensions Boron-free hexagonal fuel assembly for use in SMR reactors. Also, one of the challenges of this design was to keeping the ratio of fuel volume to moderator of the VVER-1000 reactor fuel assemblies for SMR reactor, which was solved with neutronics and safety considerations. Due to the maintenance of the fuel volume to moderator ratio, pitch of fuel rods of the VVER-1000 reactor is also intended for the boron-free fuel assembly. Also the desired cycle length for the designed fuel assembly is about 40 month, for which the fuel enrichment has been set at 6.6%. According to increase in fuel enrichment in the SMR cores, the reactivity at the beginning of the cycle is very high, therefore, this reactivity needs to be compensated. One of the most important challenges and concerns in this research is the control of reactivity at the beginning of the cycle, during the cycle and the reduction of the radial power distribution In the absence of boric acid, the burnable absorber of gadolinium was solved problem with proper design. The designed boron-free fuel assembly has 156 fuel rods, 12 guide channels and 1 central tube. It should be noted that MCNP and WIMS codes have been used to simulate fuel assembly and also to ensure the correct design process.

Keywords: Small Modular Reactor-soluble boron free fuel assembly-hexagonal fuel assembly-burnable absorber

*** Corresponding Author E-mail: m.hosiinloo@mail.sbu.ac.ir**