



بررسی افزایش ایمنی و قابلیت اطمینان راکتورهای ماژولار کوچک با استفاده از سوخت حلقوی خنک شونده از داخل و خارج

حسین زایر محمدی ریشه‌ری^۱، مجید زیدآبادی نژاد^{۱*}

^۱ دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

چکیده

استفاده از سوخت حلقوی خنک شونده از داخل و خارج یکی از روش‌های پیشنهاد شده جهت افزایش ایمنی راکتورهای هسته‌ای است. این نوع سوخت امکان عبور سیال خنک کننده از داخل را فراهم می‌کند و در نتیجه حرارت بیشتری از سطح سوخت برداشت می‌شود. بدین منظور در این پژوهش یک مجتمع سوخت حلقوی خنک شونده از داخل و خارج با آرایش ۱۱×۱۱ در یک راکتور ماژولار کوچک مورد بررسی نوترونیک و ترموهیدرولیک قرار گرفته است. در نتایج حاصل از محاسبات نوترونیک مجتمع‌های سوخت حلقوی طراحی شده و مقایسه آن با راکتور مرجع مشخص شد که این دو طراحی ویژگی‌های نوترونیک مشابهی با یکدیگر دارند. اما در نتایج ترموهیدرولیک تاثیر قابل ملاحظه استفاده از سوخت حلقوی با قابلیت خنک شوندگی از داخل و خارج مشاهده گردید به طوری که استفاده از این نوع سوخت موجب کاهش بیشینه دمای سوخت، کاهش افت فشار و افزایش فاکتور خروج از جوش هسته‌ای گردید.

واژه‌های کلیدی: سوخت حلقوی خنک شونده از داخل و خارج، راکتور ماژولار کوچک، فاکتور خروج از جوش هسته‌ای

۱- مقدمه

سطح سوخت برداشت می‌شود. این قابلیت باعث بهبود ویژگی‌های ترموهیدرولیکی می‌گردد [1-4]. بدین منظور در این پژوهش برای نخستین بار یک مجتمع سوخت حلقوی خنک شونده از داخل و خارج با آرایش ۱۱×۱۱ در یک راکتور ماژولار کوچک مورد بررسی نوترونیک و ترموهیدرولیک قرار گرفته است.

۲- روش انجام تحقیق

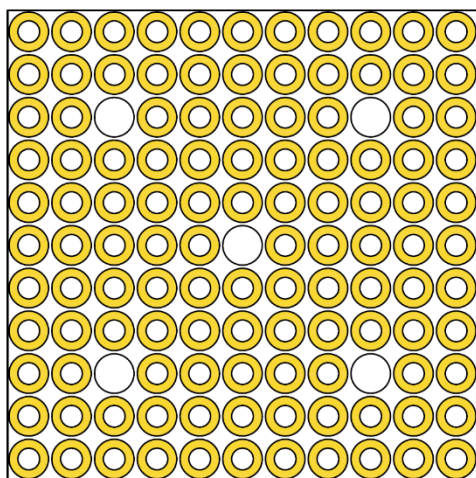
در این پژوهش، راکتور NuScale که از آن به عنوان یک راکتور هسته‌ای ماژولار کوچک نامبرده شده به

پس از حادثه هسته‌ای فوکوشیما دایچی افزایش ایمنی و کارایی میله‌های سوخت در راکتورهای هسته‌ای اهمیت زیادی پیدا کرد. چراکه میله سوخت را می‌توان اولین سد در مقابل حوادث دانست. از این رو راهکارهای زیادی توسط محققین ارائه گردیده که استفاده از سوخت حلقوی خنک شونده از داخل و خارج یکی از مهمترین روش‌های پیشنهاد شده است. این نوع سوخت که توسط موسسه MIT برای نخستین بار معرفی شده است برخلاف سوخت‌های رایج توپ‌ر امکان عبور سیال خنک کننده از داخل را می‌دهد و در نتیجه حرارت بیشتری از

* Corresponding Author E-mail: m.zeidabady@kgut.ac.ir

[6] NuScale

در ابتدا یک مجتمع سوخت حلقوی خنک شونده از داخل و خارج با آرایش ۱۱×۱۱ که در شکل ۲ نشان داده شده است بدون تغییر در اندازه قلب و تغییر در میزان غنای بکار رفته در راکتور مرجع، طراحی شد و پارامترهای مهم نوترونیکی و ترموهیدرولیکی آن استخراج گردید.



شکل ۲: مجتمع سوخت حلقوی خنک شونده از داخل و خارج طراحی شده با آرایش ۱۱×۱۱

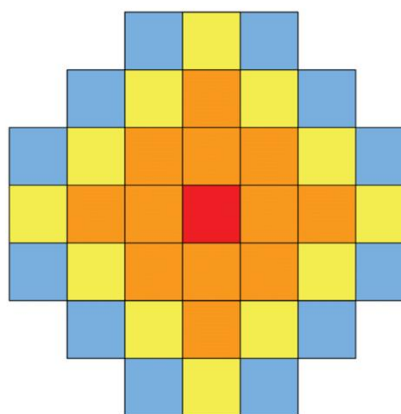
برای این مجتمع سوخت طراحی شده پارامترهای مهم نوترونیکی نظیر راکتیویته اضافی و فاکتور انحراف از قله قدرت با استفاده کدهای WIMS و CITATION در شرایط قلب پاک و سرد و تمام قدرت بدست آورده شده است. همچنین پس از تعیین کانال داغ براساس توان تولیدی در کد CITATION، این کانال که حاوی میله سوخت با قابلیت خنک شوندگی از داخل و خارج می باشد با استفاده از نرم افزار فلوئنت مورد تحلیل ترموهیدرولیک قرار گرفت. سپس پارامترهای مهم ترموهیدرولیکی نظیر دمای محوری سوخت و افت فشار محاسبه گردید همچنین با استفاده از روش جنز و لوتس فاکتور خروج از جوشش هسته‌ای نیز بدست آورده شد. همچنین در نهایت نتایج بدست آمده با راکتور مرجع که از سوخت توپر استفاده می کند مقایسه گردید.

عنوان راکتور مرجع در نظر گرفته شده است. مشخصات راکتور مرجع در جدول شماره ۱ ارائه شده است. همچنین الگوی بارگذاری مجتمع‌های سوخت با غناهای مختلف نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات راکتور NuScale [5].

پارامتر	مقدار	واحد
توان حرارتی	۱۶۰	MWt
توان خروجی الکتریکی	۵۰	MWe
فشار سیستم	۱۲.۷۵	MPa
دمای ورودی سیال به قلب	۲۵۸.۳۳	°c
تعداد مجتمع‌های سوخت	۳۷	
هندسه مجتمع سوخت	مربعی	
آرایش سوخت	۱۷×۱۷	
تعداد میله‌های سوخت	۲۶۴	
طول گام میله سوخت	۱.۲۶	cm
عرض سوخت	۲۱.۴۲	cm
ارتفاع فعال سوخت	۲۰۰	cm

- 4.33% Enriched fuel (²³⁵U)
- 4.32% Enriched fuel (²³⁵U) with 2% Gadolinia
- 4.30% Enriched fuel (²³⁵U) with 6% Gadolinia
- 4.29% Enriched fuel (²³⁵U) with 8% Gadolinia



شکل ۱: الگوی بارگذاری مجتمع‌های سوخت در قلب راکتور

در کد محاسبات سلولی در شرایط پاک و سرد و همچنین شرایط تمام قدرت که ویژگی این شرایط در جدول ۳ آورده شده است، شبیه سازی گردید.

جدول ۳: مشخصات شرایط تمام قدرت و شرایط سرد و پاک

پارامتر	واحد	تمام قدرت	پاک و سرد
دمای میانگین کند کننده	K	۵۵۸	۳۰۰
دمای میانگین سوخت	K	۶۸۰	۳۰۰
بوریک اسید	$\frac{g}{kgH_2O}$	۱.۲۲	-
سموم جاذب مصرفی	درصد	۸ تا ۲	-

سپس با استفاده از خروجی کد محاسبات سلولی، قلب راکتور طراحی شده در کد محاسبات قلب مدلسازی شد و ضریب تکثیر موثر در شرایط قلب پاک و همچنین شار کاری و فاکتور قله توان در شرایط تمام قدرت به دست آورده شد.

۲-۳- تحلیل ترموهیدرولیک

یکی دیگر از اهداف این پروژه تحلیل ترموهیدرولیکی میله سوخت جدید در کانال داغ مجتمع سوخت طراحی شده است. بدین منظور در ابتدا سلول معادل میله سوخت طراحی شده به دست آورده شد و سپس این سلول معادل با شبیه سازی CFD توسط نرم افزارهای FLUENT و Gambit تحلیل گردید. نرم افزار فلونت توانایی مدل سازی شار حرارتی کسینوسی را ندارد لذا بمنظور تولید شکل توان کسینوسی میله سوخت در نرم افزار فلونت از یک UDF به زبان C استفاده شد که قابلیت مدلسازی شار کسینوسی در این نرم افزار فراهم گردید.

شعاع سلول معادل نیز از رابطه زیر بدست آمده است.

۲-۱- طراحی سوخت

در این پروژه، به جای مجتمع‌های سوخت راکتور NuScale با هندسه مربعی و آرایش ۱۷×۱۷ که از سوخت‌های توپر بهره می‌برد، مجتمع‌های سوخت حلقوی به نحوی طراحی شد که ابعاد قلب راکتور، میزان جرم و غنای سوخت با راکتور مرجع یکسان باشد و همچنین فاصله مجاز بین میله های سوخت حلقوی خنک شونده از داخل و خارج (۱ میلی‌متر [7]) رعایت شود. مشخصات سوخت طراحی شده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات سوخت حلقوی طراحی شده

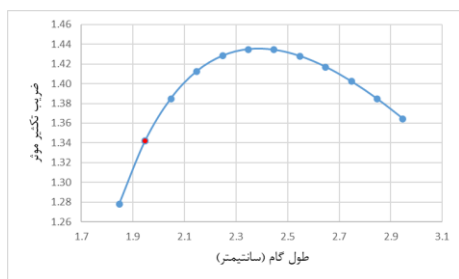
پارامتر	واحد	مقدار
طول گام	cm	۱.۹۴۷۲
شعاع داخلی	cm	۰.۴۹۳۳۶
غلاف داخلی	cm	۰.۵۵۳۳۶
شعاع خارجی	cm	۰.۵۵۳۳۶
غلاف داخلی	cm	۰.۵۶۱۳۶
شعاع داخلی سوخت	cm	۰.۵۶۱۳۶
شعاع خارجی سوخت	cm	۰.۸۳۰۶
شعاع داخلی	cm	۰.۸۳۸۶
غلاف خارجی	cm	۰.۸۳۸۶
شعاع خارجی	cm	۰.۸۹۸۶
غلاف خارجی	cm	۰.۸۹۸۶
فاصله بین دو میله سوخت	cm	۰.۱۵

۲-۲- تحلیل نوترونیک

پس از طراحی هندسی مجتمع سوخت مورد نظر، این مجتمع توسط کد محاسبات سلولی و قلب WIMS و CITATION به منظور بررسی نوترونیک شبیه سازی گردید. بدین منظور در ابتدا هر مجتمع بصورت جداگانه

۱-۱-۳- ضریب تکثیر موثر

از مهمترین پارامترهای نوترونیک در طراحی قلب یک راکتور هسته ای بررسی نسبت کندکننده به سوخت است. این موضوع به دو علت اهمیت دارد: الف) بازده راکتور؛ طول گام باید بنحوی انتخاب گردد که راکتیویته اضافی بتواند راکتیویته های منفی را در بازه کاری تعریف شده راکتور جبران سازد. ب) ایمنی؛ راکتور باید در شرایط تحت کندکنندگی کار کند که در مواقع حادثه و افزایش دمای راکتور به صورت ذاتی توان راکتور کاهش پیدا کند و مانع از افزایش توان گردد. برای به دست آوردن طول گام مناسب، سوخت جدید ۱۲ بار با طول گام های مختلف شبیه سازی شد و محاسبات نوترونیک آن انجام گردید که ضریب تکثیر موثر هر طول گام به دست آورده شد. با انجام محاسبات نوترونیک با استفاده از کد WIMS و CITATION برای طول گام های مختلف نمودار ضریب تکثیر موثر بر حسب طول گام میله های سوخت جدید رسم گردید که این نمودار در شکل ۳ آورده شده است. نقطه قرمز رنگ در نمودارهای شکل ۳ طول گام طراحی شده است. همچنین در جدول ۴ مقادیر ضریب تکثیر موثر و راکتیویته اضافی برای قلب راکتور با سوخت طراحی شده و سوخت اصلی آورده شده است. و همانطور که از جدول ۴ دیده می شود، ضریب تکثیر موثر بین سوخت اصلی و سوخت حلقوی تفاوت اندکی دارند که از نقطه نظر مدیریت سوخت حائز اهمیت است.



شکل ۳: تغییرات ضریب تکثیر موثر نسبت به طول گام برای مجتمع سوخت حلقوی فنک شونده از داخل و خارج با آرایش

۱۱×۱۱

$$R_{cell} = \sqrt{\left(\frac{\left(\frac{P^2}{N}\right)}{\pi}\right)} \quad (1)$$

که در آن P طول گام مجتمع سوخت و N تعداد میله های سوخت است.

۱-۳-۲- محاسبه فاکتور خروج از جوش هسته ای

برای محاسبه این پارامتر مهم از فرمول ۲ استفاده شده است [8]:

$$DNBR = \frac{q''_c}{q''_{act}} \quad (2)$$

که q''_{act} از طریق نرم افزار فلوئنت بدست آمده و q''_c از طریق رابطه جنز و لوتس (فرمول ۳) قابل محاسبه است [9].

$$q''_c = C \times 10^6 \left(\frac{G}{10^6}\right)^m \Delta T_{sub}^{0.22} \quad (3)$$

که در آن C و m پارامترهای وابسته به فشارند و به ترتیب ۰.۶۱۱ و ۰.۴۶۷ در نظر گرفته شده اند. G دبی خنک کننده و ΔT_{sub} تفاضل میان دمای بالک سیال و دمای موضعی سیال می باشد.

۳- نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از تحلیل انجام شده شامل دو بخش نوترونیک و ترموهیدرولیک می باشد که هر کدام از آن ها به صورت مجزا در ادامه آورده شده است.

۱-۳- نتایج نوترونیک

از مهمترین نتایج نوترونیکی این پژوهش می توان به محاسبه ضریب تکثیر موثر و فاکتور انحراف قله توان اشاره نمود که در ادامه هر کدام به تفصیل شرح داده شده است.

جدول ۴: ضریب تکثیر موثر و راکتیویته اضافی.

آرایش	طول مجموع سوخت گام	ضریب تکثیر موثر	راکتیویته اضافی
۱۷×۱۷	۱.۲۶	۱.۳۴۲۸	۰.۲۵۵۳
۱۱×۱۱	۱.۹۴۷۲	۱.۳۴۱۸	۰.۲۵۴۷

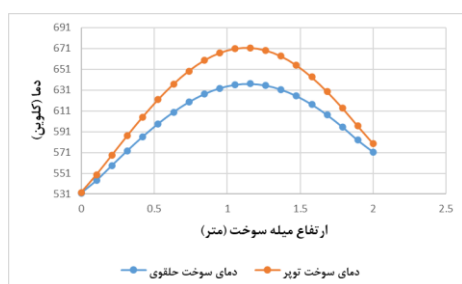
۳-۱-۲- فاکتور انحراف از قله توان

در این پروژه فاکتور انحراف از قله توان محوری (APPF) و فاکتور انحراف از قله توان شعاعی (RPPF) توسط کدهای نوترونیک و در شرایط تمام قدرت محاسبه شده اند. مقدار بدست آمده برای بیشینه فاکتور انحراف از قله توان شعاعی و محوری در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: مقدار بیشینه فاکتور انحراف از قله قدرت شعاعی و محوری.

آرایش	RPPF	APPF	TPPF
مجموع سوخت			
۱۷×۱۷	۱.۶۰۷۲	۱.۳۵۷۱	۲.۱۸۱۱
۱۱×۱۱	۱.۶۰۱۷	۱.۳۵۵۹	۲.۱۷۱۸

طراحی شده و مجتمع سوخت راکتور مرجع که با محاسبات نوترونیک کوپل شده است، دمای سوخت های طراحی شده و سوخت های راکتور مرجع در کانال داغ بدست آورده شدند. در شکل ۴ توزیع دمای محوری سوخت ها آورده شده و با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که دمای مرکز سوخت توپر بسیار بالاتر از سوخت های حلقوی خنک شونده از داخل و خارج است که این خود نشان دهنده مزیت استفاده از سوخت حلقوی با قابلیت خنک شوندگی از داخل و خارج می باشد.



شکل ۴: توزیع دمای محوری در سوخت.

۳-۲-۲- افت فشار

یکی دیگر از نتایج مهم شبیه سازی ترمو هیدرولیکی محاسبه افت فشار می باشد که به شدت بر بازده نیروگاه اثر می گذارد. افت فشار سوخت حلقوی طراحی شده و همچنین سوخت راکتور مرجع با استفاده از مدل سازی CFD بدست آورده شد و بر اساس نتایج بدست آمده و مقایسه بین آنها نشان داده شد که افت فشار کلی سیستم با افزایش تعداد میله های سوخت افزایش می یابد. از این رو، مجتمع سوخت حلقوی طراحی شده با آرایه ۱۱×۱۱ افت فشار کمتری نسبت به مجتمع سوخت اصلی دارد. نتایج افت فشار در جدول ۶ ارائه شده است.

بدلیل اینکه تغییر در چیدمان قلب پیشنهادی اعمال نشده قابل مشاهده است که مقادیر بیشینه فاکتور انحراف از قله قدرت شعاعی و محوری برای سوخت حلقوی طراحی شده و سوخت مرجع تقریباً مشابه است.

۳-۲-۲- نتایج ترموهیدرولیک

از مهمترین نتایج ترموهیدرولیکی این پژوهش می توان به محاسبه توزیع دمای سوخت، افت فشار و فاکتور خروج از جوشش اشاره نمود که در ادامه هر کدام به تفصیل شرح داده شده است.

۳-۲-۱- توزیع دما در سوخت

با استفاده از شبیه سازی CFD مجتمع سوخت

جدول ۶: افت فشار کلی سیستم.

افت فشار (پاسکال)	آرایش مجتمع سوخت
۱۷۷۵۰	۱۷×۱۷
۸۸۲۶	۱۱×۱۱

نتایج بدست آمده نشان داد که با وجود فاصله کمتر میله‌های سوخت حلقوی (۱.۵ میلیمتر) به یکدیگر نسبت به سوخت توپُر اصلی (۳ میلیمتر)، کمینه فاکتور خروج از جوشش هسته‌ای در کانال خارجی در سوخت افزایش یافته است که از نظر ایمنی بسیار حائز اهمیت است.

۴- نتیجه گیری

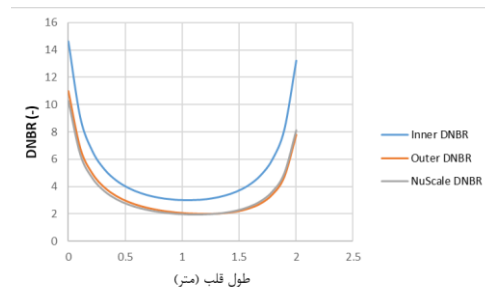
در نتایج حاصل از محاسبات نوترونیک مجتمع‌های سوخت حلقوی طراحی شده و مقایسه آن با راکتور مرجع می‌توان گفت ویژگی‌های نوترونیکی مشابه‌ای با یکدیگر دارند. زیرا جرم، غنا و ابعاد قلب و مجتمع‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین در نتایج نوترونیکی نشان داده شد که مجتمع سوخت طراحی شده با سوخت‌های حلقوی موجب می‌شود که اولاً با توجه به راکتویته اضافی محاسبه شده، دوره سوخت گذاری راکتور تغییر چندانی نسبت به راکتور مرجع نداشته باشد و ثانیاً با قرار داشتن نقطه کاری در ناحیه تحت کند کنندگی، ایمنی ذاتی راکتور در شرایط حادثه نیز فراهم گردد. اما نتایج ترموهیدرولیک نشان دهنده تاثیر بیشتر استفاده از سوخت حلقوی با قابلیت خنک شونده‌گی از داخل و خارج است. استفاده از این نوع سوخت به دلیل داشتن سطح انتقال حرارت بیشتر موجب کاهش بیشینه دمای سوخت و افزایش فاکتور خروج از جوشش هسته‌ای شد که در نمودارها به وضوح قابل مشاهده است و این موضوع خود گویای افزایش ایمنی راکتور در استفاده از سوخت حلقوی با قابلیت خنک شونده‌گی از داخل و خارج می‌باشد. همچنین در مجتمع سوخت طراحی شده به دلیل کاهش تعداد میله‌های سوخت کاهش افت فشار را نیز شاهد بودیم که این موضوع نیز گویای افزایش بازده و مقرون به صرفه تر شدن راکتوری است که از سوخت حلقوی استفاده می‌کند.

۵- مراجع

[1] Hejzlar, P., & Kazimi, M. S. (2007). Annular fuel for high-power-density pressurized

۲-۲-۳- فاکتور خروج از جوشش هسته‌ای (DNBR)

یکی از مهمترین فاکتورهای ایمنی راکتورهای هسته ای فاکتور خروج از جوشش هسته ای می‌باشد که با راهکار ارائه شده در بخش ۱-۳-۲ برای به دست آوردن توزیع DNBR در طول میله سوخت، نمودار DNBR در طول میله سوخت هم برای سوخت طراحی شده و هم سوخت مرجع محاسبه گردید. شکل ۵ تغییرات DNBR راکتور با سوخت مرجع و سوخت حلقوی طراحی شده را در طول میله سوخت نشان می‌دهد. همچنین مقدار کمینه فاکتور خروج از جوشش هسته‌ای (MDNBR) نیز در جدول ۷ آورده شده است.



شکل ۵: توزیع فاکتور خروج از جوشش هسته‌ای در طول میله سوخت.

جدول ۷: کمینه مقدار فاکتور خروج از جوشش برای سوخت طراحی شده و سوخت مرجع

آرایش مجتمع سوخت	کمینه مقدار فاکتور خروج از جوشش	
	کانال داخلی	کانال خارجی
۱۷×۱۷	-	۲.۰۳۳
۱۱×۱۱	۲.۹۹۵۲	۲.۱۹۴۹

water reactors: Motivation and overview.
Nuclear Technology, 160(1), 2-15.

[2] Zaidabadi, M., Ansarifar, G. R., & Esteki, M. H. (2017). Thermal hydraulic analysis of VVER-1000 nuclear reactor with dual-cooled annular fuel using $K-\omega$ SST Turbulence model. *Annals of Nuclear Energy*, 101, 118-127.

[3] Ansarifar, G. R., Esteki, M. H., & Zaidabadi, M. (2016). Investigation of the Dual-Cooled Annular Fuel Effect on the Thermal Power Uprate in a VVER-1000 Nuclear Reactor. *Nuclear Technology*, 195(1), 105-109.

[4] Feng, D., Kazimi, M. S., & Hejzlar, P. (2005). Innovative fuel designs for high power density pressurized water reactor. Massachusetts Institute of Technology. *Center for Advanced Nuclear Energy Systems*. Nuclear Fuel Cycle Program.

[5] NuScale Power LLC, (2016). NuScale Standard Plant Design Certification Application. *US Nuclear Regulatory Commission (NRC)*.

[6] Sadegh-Noedoost, A., Faghihi, F., Fakhraei, A., & Amin-Mozafari, M. (2020). Investigations of the fresh-core cycle-length and the average fuel depletion analysis of the NuScale core. *Annals of Nuclear Energy*, 136, 106995.

[7] Kazimi, M.S., (2006). High performance fuel design for next generation PWRs: Final Report. MIT-NFC-PR-082, *Center for Advanced Nuclear Energy Systems*, MIT.

[8] El-Wakil, M. M. (1971). NUCLEAR HEAT TRANSPORT.

[9] Jens, W. H., & Lottes, P. A. (1951). Analysis of heat transfer, burnout, pressure drop and density data for high-pressure water (No. ANL-4627). *Argonne National Lab*.



Investigation of Increasing Safety and Reliability of Small Modular Reactors Using Dual-cooled Annular Fuel Element

Hossein Zayermohammadi Rishehri^a, Majid Zaidabadi nejad^a

^aDepartment of Nuclear Engineering, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Haftbagh St, Postal Code: 7631818356, Kerman-Iran

Received: 08 - 05 - 2021

Accepted: 05 - 09 - 2021

Abstract

The use of dual-cooled annular fuel is one of the proposed methods to increase the safety of nuclear reactors. This type of fuel allows the cooling fluid to pass through the internal channel and as a result more heat is removed from the fuel surface. For this purpose, in this study, a dual-cooled annular fuel assembly with 11×11 array in a small modular reactor has been investigated by neutronic and thermal-hydraulic simulations. In the results of neutronic calculations, designed dual-cooled annular fuel assembly were compared with the reference reactor, it was found that these two designs have similar neutronic properties. But in the thermohydraulic results, a significant effect of the use of dual-cooled annular fuel was extracted. The use of this type of fuel reduced the maximum fuel temperature, the pressure drop and increased minimum departure from nucleate boiling ratio.

Keywords: dual-cooled annular fuel, Small modular reactor, Power Peaking Factor.