



ارائه یک مدل ریاضی به منظور بررسی رفتار دینامیکی قلب یک راکتور ماژولار کوچک با

جریان گردش طبیعی بوسیله جعبه ابزار Simulink نرم افزار Matlab

امیر صادق نوع دوست*^۱

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۱۹

مکیده

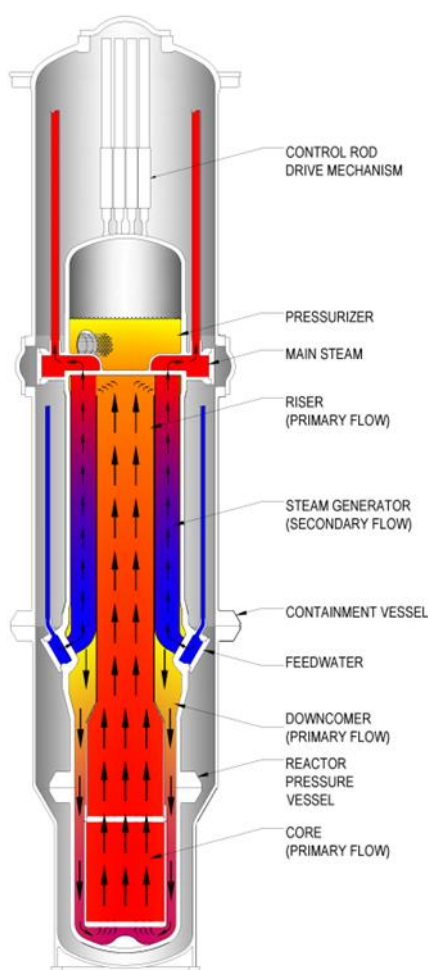
در این تحقیق یک مدل ریاضی به منظور بررسی رفتار دینامیکی قلب یک راکتور ماژولار کوچک با جریان گردش طبیعی بوسیله جعبه ابزار Simulink نرم افزار Matlab ارائه شده است. برای انجام این کار ابتدا معادلات سینتیک نقطه‌ای با در نظر گرفتن یک گروه نوترون‌های تاخیری در محیط Simulink به منظور بررسی رفتار نوترونیک وابسته به زمان قلب راکتور شبیه‌سازی شده که پارامترهای مهم این معادلات نظیر زمان تولید متوسط نوترون و کسر نوترون‌های تاخیری، ضرایب راکتیویته داپلر و کندکننده با استفاده از کد MCNPX محاسبه شده‌اند. همچنین به منظور بررسی فرآیند انتقال حرارت از سوخت به خنک کننده از مدل Mann's به همراه ضریب انتقال حرارت یک بعدی Dittus-Boelter استفاده شده و پس از کامل شدن مدل پیشنهادی پاسخ سیستم به اعمال یک راکتیویته پله مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که مدل ارائه شده توانایی پیش بینی رفتار دینامیکی قلب یک راکتور ماژولار کوچک با جریان گردش طبیعی را دارد.

واژه های کلیدی: راکتور ماژولار کوچک، Simulink، MCNPX، مدل Mann's، Dittus-Boelter

۱- مقدمه

حوادث همچون SBO را نام برد. (IAEA.2005) درک کامل دینامیک راکتور به منظور طراحی سیستم‌های کنترل مناسب بسیار دشوار بوده که به همین دلیل مدلسازی دینامیکی در صنعت هسته‌ای دارای جذابیت زیادی می‌باشد. از جمله پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان موارد زیر را نام برد. (Pilehvar et al. 2018) خود فشارندگی یک راکتور یکپارچه با گردش طبیعی را با استفاده از یک مدل دینامیکی جدید مورد بررسی قرار دادند. مدل ارائه شده بر اساس حل معادلات PDE بقای جرم، انرژی و حجم توسعه داده شده بود. نتایج به دست آمده نشان می‌دادند که متغیرهای اندازه‌گیری شده با داده‌های

بر اساس طبقه بندی IAEA راکتورهای ماژولار کوچک به راکتورهای اطلاق می‌شود که توان الکتریکی آنها کمتر از ۳۰۰ مگاوات باشد. واژه ماژولار برگرفته شده از این امر است که این راکتورها در محل کارخانه ساخته شده و برای نصب و راه اندازی به سایت انتخاب شده منتقل می‌شوند. (Kuznetsov. 2004) از جمله راکتورهای ماژولار کوچک خنک‌شونده با آب می‌توان راکتورهای IRIS، CAREM25 و Nuscale را نام برد. از میان راکتورهای نامبرده شده راکتور CAREM25 و Nuscale از روش گردش طبیعی برای خنک کردن قلب استفاده می‌کنند که از مزایای این روش می‌توان عدم نیاز به پمپ مدار اولیه و ایمنی بیشتر در برابر برخی



شکل ۱. نمای کلی از راکتور Nuscale و مسیر جریان گردش طبیعی (Nuscale Power, LLC, 2016)

طراحی دارای مطابقت خوبی می‌باشند و مدل ارائه شده قابلیت پیش بینی رفتار دینامیکی راکتور را در موقعیت‌های مختلف دارد. (Arda et al. 2016) یک مدل دینامیکی غیرخطی برای یک راکتور ماژولار کوچک با سیستم پسیو توسعه دادند. این مدل شامل: قلب راکتور، مولد بخار، فشارنده و... بوده که کل مدل ارائه شده در محیط Simulink نرم‌افزار Matlab توسعه داده شده بود. تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌داند که پارامترهای بدست آمده در قدرت کامل تحت شرایط پایا با مقادیر طراحی دارای اختلاف بسیار کمی می‌باشند. (Kapernick 2015) یک مدل دینامیکی برای راکتور ماژولار کوچک Mpower با استفاده از نرم افزار Matlab ارائه کرد. مدل یکپارچه ارائه شده به منظور تولید دیتاهای عملکرد حلت عادی بکار گرفته شده بود.

در این پژوهش ابتدا مشخصات کلی مورد مطالعاتی که راکتور Nuscale بوده به طور خلاصه تشریح می‌شود. سپس مدل‌های محاسباتی به کار گرفته شده به منظور شبیه سازی قلب راکتور با جزئیات آورده می‌شود. در قسمت نتایج، پارامترهای نوترونیکی و ترموهیدرولیک در حلت پایا و پاسخ راکتور به اعمال راکتیویته پله نشان داده شده و در نهایت قسمت پایانی این پژوهش به نتیجه‌گیری اختصاص پیدا می‌کند.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مشخصات راکتور Nuscale

راکتور ماژولار کوچک Nuscale یکی از شاخص‌ترین راکتورهای تحت فشار یکپارچه بوده که مراحل طراحی پایه آن به اتمام رسیده و اولین ماژول آن در سال ۲۰۲۲ راه اندازی می‌شود. توان حرارتی و الکتریکی این راکتور به ترتیب ۱۶۰ و ۴۵ مگاوات می‌باشد. قلب این راکتور از ۳۷ مجتمع سوخت مربعی که به صورت آرایه‌های ۱۷*۱۷ چیده شده‌اند، تشکیل شده است. هر ماژول دارای دو مولد بخار بوده که از نوع Ones-through می‌باشند. در شکل ۱ قسمت‌های مختلف این راکتور به وضوح دیده می‌شود. سایر مشخصات و پارامترهای این راکتور در جدول ۱ ذکر شده است. (Nuscale Power, LLC, 2016)

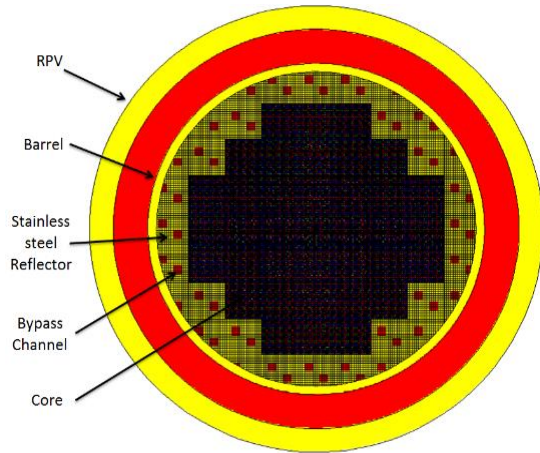


جدول ۱. ابعاد و پارامترهای راکتور Nuscale

(Nuscale Power, LLC.2016)

پارامتر	مقدار
توان حرارتی راکتور	۱۶۰ (Mw)
شعاع قلب	۱۵۰/۵ (cm)
تعداد مجتمع‌های سوخت	۳۷
هندسه مجتمع‌های سوخت	مربعی (۱۷*۱۷)
گام مجتمع‌های سوخت	۲۱/۵۰۳ (cm)
شعاع قرص سوخت	۰/۴۰۶ (cm)
ارتفاع موثر میله سوخت	۲۰۰ (cm)
ماده جاذب سوختنی	اکسید گادولینیوم
چگالی سوخت	۱۰/۵۳ (gr/cm ³)
ضخامت گپ	۰/۰۰۹ (cm)
ضخامت غلاف	۰/۰۶۰۹ (cm)
گام میله های سوخت	۱/۲۵۹ (cm)
ضخامت بازتابنده	۶/۳۵ تا ۳۰/۹۸۸ (cm)

- داشتن توزیع توان مسطح در راستای شعاعی و ضریب پیک توان کمتر از ۲



شکل ۲. چیدمان قلب ارائه شده

شکل ۳. نمای شعاعی از شبیه‌سازی راکتور Nuscale با کد MCNPX

۲.۲. محاسبات نوترونیک

هدف از انجام محاسبات نوترونیک به دست آوردن پارامترهایی نظیر کسر نوترون‌های تاخیری، زمان تولید متوسط نوترون و همچنین ضرایب راکتیویته سوخت و کندکننده می‌باشد. پارامترهای ذکر شده به صورت مستقیم در معادله سینتیک نقطه‌ای با یک گروه نوترون‌های تاخیری وارد می‌شوند. در شکل ۲ و ۳ قلب پیشنهاد شده و شبیه‌سازی آن با کد MCNPX نشان داده شده است. همچنین نمای میله‌های سوخت حاوی مواد جاذب سوختنی و بدون آن به همراه جایگاه آنها در یک مجتمع سوخت در شکل ۴ آورده شده است. از جمله اهداف چیدمان ارائه شده می‌توان موارد زیر را نام برد.

- درصد غنای سوخت کمتر از ۴/۹۵ دصد
- استفاده حداکثری از مواد جاذب سوختنی به منظور منفی تر شدن ضریب راکتیویته کند کننده و برداشتن راکتیویته اضافی

(۱)

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} P - \lambda c \quad (2)$$

که در این معادلات c غلظت مولدهای نوترون‌های تاخیری، $\rho(t)$ راکتیویته، β کسر نوترون‌های تاخیری، Λ زمان تولید متوسط نوترون و λ ثابت واپاشی مولدهای نوترون‌های تاخیری می‌باشد. ترم راکتیویته در معادله ۱ وابسته به زمان بوده و شامل ترم‌های زیر می‌شود.

$$\rho(t) = \delta\rho_{ex} + \alpha_F \Delta T_F + \alpha_c \Delta T_c \quad (3)$$

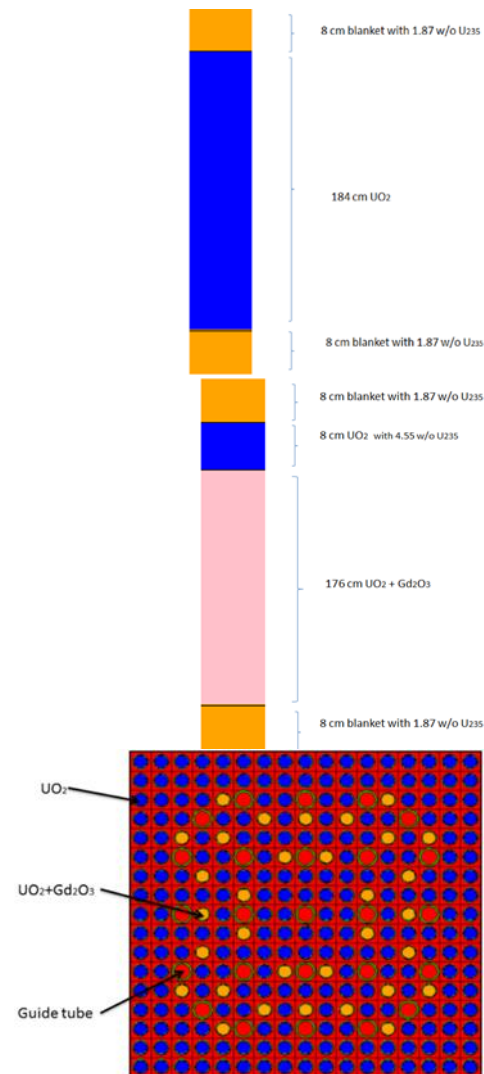
که ترم $\delta\rho_{ex}$ راکتیویته اعمال شده ناشی از عوامل خارجی، ΔT_F و ΔT_c به ترتیب تغییرات دمای سوخت و کندکننده، α_c و α_F به ترتیب ضرایب راکتیویته سوخت و کندکننده می‌باشند. در این پژوهش از تغییرات ضریب راکتیویته فشار صرف نظر شده است.

۲.۳.۲. مدل ترموهیدرولیک

مدل Mann's .

فرآیند انتقال حرارت در قلب با استفاده از مدل Mann's مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل هر نود سوخت به دو نود خنک کننده متصل می‌شود که این فرآیند در شکل ۵ به وضوح نشان داده شده است. در این مدل فرضیات زیر لحاظ شده است:

- مدل جریان سیال یک بعدی
- ثابت بودن ضریب انتقال حرارت سوخت به خنک کننده



شکل ۴. میله‌های سوخت حاوی مواد جاذب سوختنی و بدون آن و محل قرارگیری آنها در مجتمع سوخت

۳.۲. مدل‌های ریاضی استفاده شده برای شبیه

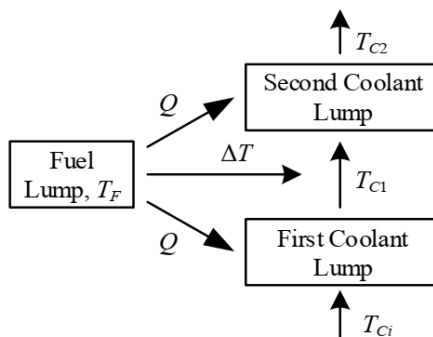
سازی قلب

۱.۳.۲. مدل نوترونیک

به منظور بررسی رفتار نوترونیک وابسته به زمان، معادلات سینتیک نقطه‌ای با یک گروه نوترون‌های تاخیری در نظر گرفته شده است. در این معادله به جای استفاده از دانسیته متوسط نوترون از توان حرارتی استفاده شده که فرمت معادلات ذکر شده به ترتیب در

زیر آورده شده است. (Arda et al. 2015)

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} P + \lambda c$$



شکل ۵. شماتیک مدل انتقال حرارت قلب راکتور. (Arda et al. 2016)

$$R = \frac{1}{n_f} \left(\frac{1}{4\pi HK_f} + \frac{1}{2\pi H r_f h_g} + \frac{1}{2\pi HK_c} \ln \left(\frac{r_f + t_g + t_c}{r_f + t_g} \right) + \frac{1}{\pi H d h_s} \right)$$

(۸)

که در این معادلات R_f ، R_g و R_c به ترتیب مقاومت‌های حرارتی سوخت، گپ و غلاف بوده و همچنین R_s مقاومت حرارتی بین سطح غلاف و خنک کننده می‌باشد. از طرفی نشانه‌های n_f ، H ، K_f ، h_g ، t_c ، t_g ، K_c ، d و h_s به ترتیب بیان کننده تعداد میله‌های سوخت، ارتفاع موثر قلب، هدایت حرارتی سوخت، شعاع قرص سوخت، ضریب انتقال حرارت گپ، هدایت حرارتی غلاف، ضخامت گپ، ضخامت غلاف، ضریب انتقال حرارت خنک کننده و قطر سوخت می‌باشند. مقدار ضریب انتقال حرارت خنک کننده از رابطه Dittus-Boelter محاسبه شده که این رابطه به پارامترهایی همچون نسبت گام به قطر سوخت، قطر هیدرولیکی، عدد پراتل و رینولدز وابسته است که در معادله ۹ به خوبی نشان داده شده است.

$$h_s = \left(0.042 \frac{p}{d} - 0.024 \right) \frac{k}{De} Re^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}}$$

(۹)

نهایتاً با جایگذاری مقاومت حرارتی بدست آمده در معادله $R = 1/(UA)_{FC}$ ضریب انتقال حرارت سوخت به خنک کننده محاسبه می‌شود.

۳. بحث و نتایج

در جدول ۲ مقادیر تمام پارامترهای معادلات ۱ تا ۹ آورده شده است. شکل ۶ مدل شبیه سازی شده و مقادیر حالت پایای راکتور در حالت عملکرد عادی نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۳ مقادیر بدست آمده با مقادیر منتشر شده از شرکت سازنده راکتور Nuscale مقایسه شده‌اند. همانطور که دیده می‌شود نتایج حاصله با اطلاعات منتشر شده دارای خطای نسبی قابل قبولی می‌باشند.

معادلات حاکم بر تغییرات دمای سوخت و خنک کننده که با اعمال قانون بقای انرژی به حجم سوخت و خنک کننده حاصل شده که در معادلات ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است.

$$\frac{d}{dt} (m_F c_{p,F} T_F) = f_d P - (UA)_{FC} (T_F - T_{C1})$$

(۴)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m_c}{2} \cdot c_{p,c} T_{C1} \right) = \frac{1 - f_d}{2} P - \left(\frac{UA}{2} \right)_{FC} (T_F - T_{C1}) - \dot{m}_c c_{p,c} (T_{C1} - T_{C2})$$

(۵)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m_c}{2} \cdot c_{p,c} T_{C2} \right) = \frac{1 - f_d}{2} P - \left(\frac{UA}{2} \right)_{FC} (T_F - T_{C1}) - \dot{m}_c c_{p,c} (T_{C2} - T_{C1})$$

(۶)

۴.۲. محاسبه مقاومت حرارتی

مقاومت حرارتی از به هم پیوستن سری مقاومت های حرارتی سوخت، گپ، غلاف و انتقال حرارت همرفت بین غلاف و خنک کننده حاصل می‌شود.

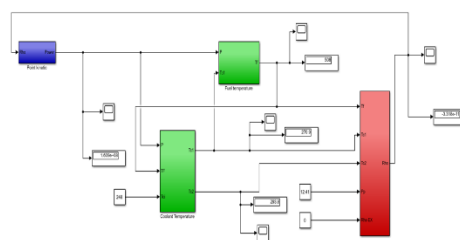
$$R = \frac{1}{n_f} (R_f + R_g + R_c + R_s)$$

(۷)

جدول ۲. مقادیر پارامترهای معادلات

پارامترها	مقادیر	وضعیت	پارامترها	مقادیر	وضعیت
β	۰/۰۰۷	MCNPX	\dot{m}_c	۷۰۶ kg/s	REF
Λ	۰/۰۰۰۰۱۵s	MCNPX	m_c	۱۴۰۹ kg	REF
λ	۰/۱s ⁻¹	REF	n_f	۹۷۶۸	REF
α_F	-۱/۹۸ pcm/°C	MCNPX	K_f	۴/۱۵ W/m·°C	REF
α_c	-۲/۸۲ pcm/°C	MCNPX	h_g	۵۶۷۸ W/m ² ·°C	REF
m_F	۱۰۸۱۱ Kg	CAL	K_c	۱۹/۰۴ W/m·°C	REF
$c_{P,F}$	۰/۴۶۷ kJ/kg·°C	REF	h_s	۱۳۷۳۰ W/m ² ·°C	CAL
f_d	۰/۹۷۵	REF	$c_{P,c}$	۴/۹۶ kJ/kg·°C	REF
A_{FC}	۵۸۳ m ²	CAL	U_{FC}	۱۱۳۵ W/m ² ·°C	CAL

شکل ۶. مدل دینامیکی قلب راکتور Nuscale



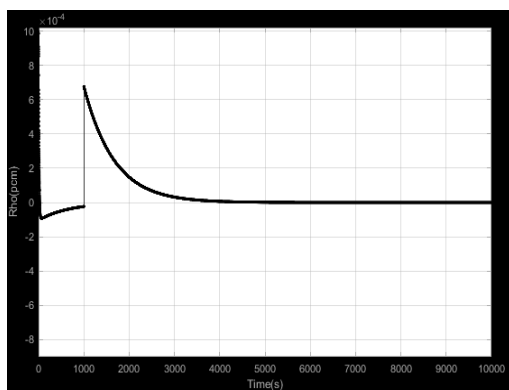
جدول ۳. مقایسه پارامترهای بدست آمده با دیتاهای منتشر شده

پارامترها	مقادیر بدست آمده	مقادیر منتشر شده	درصد خطای نسبی
توان	(Mw)۱۶۰/۹	(Mw)۱۶۰/۰	% ۰/۵
دمای متوسط سوخت	°C۵۰/۸	°C۵۰/۰	% ۱/۵
دمای متوسط نود ۱	°C۲۷۰/۹	°C۲۷۲/۱	% ۰/۴
دمای متوسط نود ۲	°C۲۹۳/۸	°C۲۹۸/۵	% ۱/۵

شده که در نتیجه گرمای بیشتری از سوخت به خنک کننده منتقل می‌شود. همانطور که از شکل‌های ۹ و ۱۰ و ۱۱ پیداست میزان افزایش دما برای سوخت 12 °C و برای نودهای ۱ و ۲ خنک کننده به ترتیب 1/1 °C و 3 °C می‌باشد.

۱.۳. پاسخ سیستم به اعمال راکتیویته پله

اعمال یک راکتیویته پله با دامنه 1/0 β بعد از ۱۰۰۰ ثانیه از عملکرد حالت پایا که می‌تواند ناشی از کاهش غلظت اسید بوریک یا بیرون کشیده شدن میله‌های کنترل باشد باعث افزایش نرخ شکافت و بالطبع آن افزایش سطح توان تا مقدار 5/168 Mw می‌گردد، که این موضوع در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. از طرف دیگر افزایش توان باعث افزایش دمای سوخت



شکل ۱۱. تغییرات دمایی نود ۲ خنک کننده بر حسب زمان به ازای اعمال راکتیویته پله

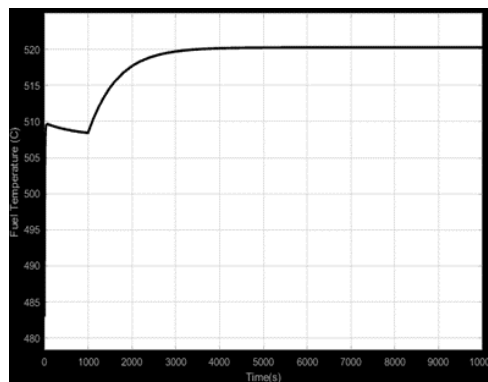
۴. نتیجه گیری

در این تحقیق یک مدل ریاضی به منظور بررسی رفتار دینامیکی قلب یک راکتور ماژولار کوچک با جریان گردش طبیعی ارائه شد. برای بررسی رفتار نوترونیک قلب از معادله سینتیک نقطه‌ای با یک گروه کسر نوترون‌های تاخیری استفاده شد که پارامترهای این معادله نظیر ضرایب راکتیویته داپلر، کندکننده، زمان تولید متوسط نوترون و همچنین کسر نوترون‌های تاخیری با استفاده از کد MCNPX محاسبه شده بودند. همچنین به منظور بررسی فرآیند انتقال حرارت از سوخت به خنک کننده از مدل Mann's استفاده شده و پس از کامل شدن مدل پیشنهادی، پاسخ سیستم به اعمال یک راکتیویته پله مورد ارزیابی قرار گرفته شد. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان می‌دهند که مدل ریاضی ارائه شده توانایی پیش بینی رفتار دینامیکی قلب یک راکتور ماژولار کوچک با جریان گردش طبیعی را دارد.

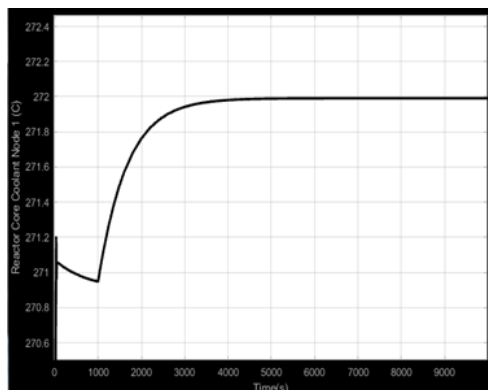
مراجع

Kuznetsov, V. (2004). Innovative small and medium sized reactors: Design features, safety approaches and R&D trend. Technical report, IAEA. International Atomic Energy Agency. (2005). Natural circulation in water cooled nuclear power plants. IAEA.

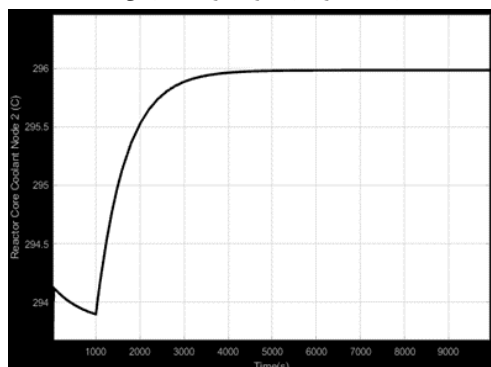
Pilehvar, A. F., Esteki, M. H., Hedayat, A., & Ansarifar, G. R. (2018). Self-



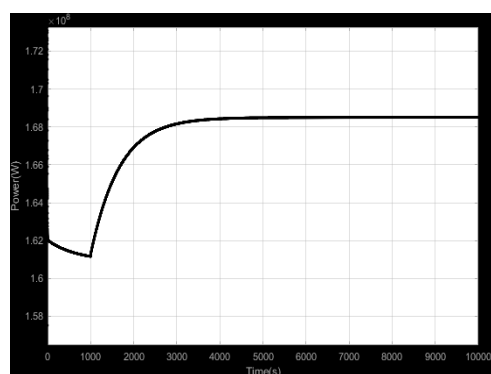
شکل ۷. تغییرات توان بر حسب زمان



شکل ۸. تغییرات راکتیویته بر حسب زمان



شکل ۹. تغییر دمای سوخت بر حسب زمان به ازای اعمال راکتیویته پله



شکل ۱۰. تغییرات دمایی نود ۱ خنک کننده بر حسب زمان به ازای اعمال راکتیویته پله

pressurization analysis of the natural circulation integral nuclear reactor using a new dynamic model. Nuclear Engineering and Technology, 50(5), 654-664.

Arda, S. E., & Holbert, K. E. (2016). Nonlinear dynamic modeling and simulation of a passively cooled small modular reactor. Progress in Nuclear Energy, 91, 116-131.

Kapernick, J. R. (2015). Dynamic modeling of a small modular reactor for control and monitoring. University of Tennessee.

Nuscale Power, LLC. (2016). Nuscale Standard Plant Design Certification Application. Chapter4.

Arda, S. E., & Holbert, K. E. (2015). A dynamic model of a passively cooled small modular reactor for controller design purposes. Nuclear Engineering and Design, 289, 218-230.

Briemeister, J.F., (2013). MCNPX a General Monte Carlo N-particle Transport Code, Version X.2.7. Los Alamos National Laboratory.

Proposed a mathematical model to investigate the dynamic behavior of a small modular reactor core with natural circulation flow by Simulink toolbox of Matlab software

A.Noedoost^{1*}

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

Received: 20 - 10 - 2021

Accepted: 10 - 11 - 2022

Abstract

In this research, a mathematical model for dynamic behavior of a small modular reactor core with natural circulation flow is presented by Simulink toolbox of Matlab software. First, point kinetic equation by considering one group delay neutron simulated in the Simulink environment to investigate the time dependent neutronics behavior that important parameters of this equation such as mean generation time, delay neutron, fuel and moderator reactivity coefficient are calculated using the MCNPX code. Mann's model with one-dimensional Dittus-Boelter heat transfer coefficient was also used to investigate the heat transfer process from fuel to coolant, and after completing the proposed model, the system's response to insert of a step reactivity was evaluated. The results of this research show that the proposed model has ability to predict the dynamic behavior of a small modular reactor core with natural circulation flow.

Keywords: Small Modular Reactor ,Simulink ,MCNPX ,Mann's model ,Dittus-Boelter
