مدل‌سازی قلب راکتور هسته‌ای بوشهر با استفاده از نرم‌افزار سیمولینک در حوزه زمان و بررسی اثرات سرعت حرکت میله‌های کنترل بر رفتار حالت گذرا

INC29-1102

مرتضی اکبری[۱*]، رقیه جمشیدی[۱]، فرخ خوش‌احوال[۲]

۱. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات ، گروه مهندسی هسته‌ای، تهران، ایران

۲. پژوهشکده‌ی رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران ـ ایران

چکیده:

با توجه به پیچیدگی‌های راکتورهای هسته‌ای، مسئله کنترل آن‌ها در مدهای مختلف کاری آن حائز اهمیت است. یکی از راه‌های کنترل واکنش زنجیره‌ای و اعمال راکتیویته در قلب راکتور، جابجایی میله‌های کنترل است. نرخ جابجایی میله‌ها بر رفتار حالت گذرای راکتور تأثیرگذار است و باید به‌گونه‌ای باشد که راکتور از ناحیه ایمن خارج نشود و منجر به خاموشی ناخواسته راکتور نگردد. در تحقیق حاضر قلب راکتور بوشهر در نرم‌افزار سیمولینک و توسط معادلات سینتیک نقطه‌ای و مدل ترموهیدرولیکی در حوزه زمان مدل‌سازی گردیده است. پس از راستی آزمایی و اطمینان از صحت عملکرد مدل، سرعت‌های مختلف میله‌های کنترل برای اینکه توان، راکتیویته و پریود راکتور در محدوده مجاز قرار گیرند و سیستم حفاظت راکتور وارد عمل نشود به مدل اعمال گردیدند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که حداکثر سرعت خروج میله کنترل به موقعیت اولیه میله بستگی دارد اما در حالتی که میله حداکثر ارزش را دارد، سرعت خروج به ۱٫۵ سانتی‌متر بر ثانیه محدود می‌شود. در مقایسه با نتایج محاسبات قبلی که با خطی سازی مدل حول توان نامی راکتور در حوزه فرکانس به‌دست‌آمده بودند، نشان می‌دهد، حداکثر سرعت مجاز خروج میله‌های کنترل از قلب راکتور در محدوده پایین‌تری قرار دارد.

کلیدواژه‌ها: مدل دینامیکی راکتور، راکتور بوشهر، سرعت میله‌های کنترل، مدل‌سازی سیمولینک

Modelling of Bushehr Nuclear Reactor Core Using Simulink Software in Time Domain and Analysis of the Control Rod Movement Speed Effect on the Transient Behavior

Morteza Akbari[1*], Roghaye Jamshidi[1], Farrokh Khoshahval[2]

1. Department of Nuclear Engineering, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran–Iran

Abstract:

In the current research the governing dynamic equations of Bushehr NPP core are studied and modeled using Simulink software. The model is validated against the rod drop experiment presented in BNPP PSAR. The model is based on state space and is in the time domain. In other similar researches the linearized Laplace form is used. The developed model is employed to study the maximum control rod movement in core. The study shows that if the rod is half inserted the worth is so high and the maximum rod speed for avoiding the reactor trip is about 1.5cm/s.

Keywords: Reactor Dynamic Model, BNPP, Maximum speed of control rod, Simulink Modelling.

۱. مقدمه

تحلیل رفتار دینامیکی راکتورهای هسته‌ای اهمیت زیادی در مراحل طراحی، راه‌اندازی و بررسی مسائل ایمنی دارد. بدون شناخت این رفتار امکان تجزیه و تحلیل حالت گذرا در کاربری عادی و حوادث وجود ندارد. ضریب تکثیر قلب راکتور تحت تأثیر عواملی ازجمله ترکیب قلب، درجه حرارت سوخت و چگالی خنک‌کننده درون قلب است که این‌ها خود تابعی از قدرت راکتور و یا شار نوترونی هستند. مطالعه رفتار زمانی این پدیده‌ها که تعیین‌کننده ضریب تکثیر قلب هستند تحت عنوان "دینامیک راکتور" مطرح می‌شوند. لذا با توجه به ضرورت مدل‌سازی رفتار دینامیکی راکتورهای هسته‌ای، توسعه ابزارهای مناسب برای آن نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در تحلیل این رفتار در گذاره‌های سریع عوامل مختلفی همچون نوترون‌های آنی، نوترون‌های تأخیری، فیدبک‌های دمایی سوخت و خنک‌کننده تأثیرگذارند. در گذاره های میان‌مدت، تغییر غلظت سموم نوترون و در گذاره‌های بلندمدت و تغییرات ایزوتوپی قلب در اثر مصرف سوخت تأثیرگذار هستند.

در تحقیق یورک و چرچس [۱] الگوریتمی غیرخطی در فضا- زمان برای کنترل راکتور ارائه شده است. در این مقاله مدل ریاضی برای دینامیک غیرخطی و فضا-زمان راکتور PWR و الگوریتم کنترلی مناسب برای آن به دست آمده است. برای شرایط کاری شبیه‌سازی‌شده در آن نیز الگوریتم ارائه‌شده مشخصه‌ی پاسخ بسیار خوبی فراهم آورده است. در تحقیق جینگ- فینگ پینگ [۲] برای کنترل توان راکتور کنترل‌کننده‌ی PID فازی طراحی و بهینه شده است. در این مقاله استراتژی کنترل فازی PID معرفی و کاربرد آن در سیستم کنترل توان راکتور ارائه شده است. در این استراتژی از منطق فازی برای ایجاد گروه‌های محدود از ترکیب‌های محتمل بهره‌های PID در ناحیه‌ی پایدار استفاده شده است. برای بهبود و افزایش دقت نیز از الگوریتم ژنتیک از طریق بهینه‌سازی درجه دوم تابع عضویت کنترل‌کننده‌ی منطق فازی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی در این مقاله نیز عملکرد بهتر سیستم با کنترل‌کننده‌ی جدید را نشان می‌دهد.

در تحقیق چونگ، یونگ [۳] تئوری کنترل بهینه برای طراحی سیستم کنترل توان به کار رفته است. مطابق با تئوری شرح داده شده، تابع هدف ضریب عملکرد درجه دوم با فاکتورهای وزنی پیشنهاد شده است. سپس از این تابع هدف، تابع انتقال بهینه به دست آمده است. سیستم با تابع انتقال بهینه، عملکرد بهینه نیز دارد. نتایج شبیه‌سازی در این مورد نیز بهبود چشمگیر مشخصه‌ی دینامیکی سیستم و عملکرد آن را در مقایسه با کنترل‌کننده‌ی معمولی نشان می‌دهد. در تحقیق شیرازی ، آقا نجفی ، و شریف لو [۴] در مورد طراحی ، ساخت و شبیه‌سازی سیستم چندمنظوره برای کنترل دقیق حرکت میله‌های کنترل در راکتور است. در این مقاله طراحی و اجرای سیستم میکروپروسسوری برای حرکت اتوماتیک میله‌های کنترل در راکتورهای تحقیقاتی یا قدرت ارائه شده است. این سیستم به یک کامپیوتر شخصی متصل شده ، هم می‌تواند به‌صورت اتوماتیک و هم‌دستی کنترل شود. مهم‌ترین ویژگی این سیستم طراحی‌شده، Scram اتوماتیک میله‌های کنترل، فعال کردن زنگ خطر در مواقع ضروری و تنظیم حرکت میله‌های کنترل هم به طرف پایین و هم به طرف بالا است. سپس با استفاده از شبیه‌سازی این سیستم در Simulink نرم‌افزار MATLAB بهترین محدوده‌ی سرعت و زمان تأخیر میله‌های کنترل به دست آمده است. عهدوی و خوش‌احوال [۵] در پژوهشی مدل دینامیکی قلب راکتور را حول توان نامی راکتور بوشهر خطی سازی و در فضای لاپلاس توابع تبدیل قلب، فیدبک‌های دما و میله‌های کنترل را به دست آورده و بر روی مدل حاصل‌شده تحلیل حداکثر سرعت جابجایی و پایداری قلب را انجام دادند. با توجه به اینکه خطی سازی معادلات حول نقطه‌ای کار (تعادل) منجر به حذف برخی از پارامترهای دینامیک سیستم می‌گردد استفاده از معادلات حوزه زمان پاسخ دقیق‌تری را خصوصاً در گذاره‌های با تغییر توان قابل‌توجه حاصل خواهد نمود.

۲. معادلات نوترونیکی و ترموهیدرولیک قلب راکتور

برای مدل‌سازی قلب راکتور نیاز به دو مدل نوترونیکی و ترموهیدرولیکی است. برای مدل نوترونیکی معمولاً بجای استفاده از معادلات پخش وابسته به زمان، از معادله سینتیک نقطه‌ای [۶] استفاده می‌شود. در این مدل فرض می‌شود که نوترون‌ها در یک گروه انرژی قرار دارند و وابستگی مکانی حذف و شکل فضایی شار مستقل از زمان است.

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(\rho - \beta)}{\Lambda} n + \sum_{i=1}^{6} \lambda_i C_i \qquad (۱)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} n - \lambda_i C_i \quad i = 1.2.3.4.5.6 \qquad (۲)$$

C_i : غلظت مولد نوترون‌های تأخیری گروه iام

λ_i : ثابت واپاشی نوترون‌های تأخیری گروه iام

β : کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری

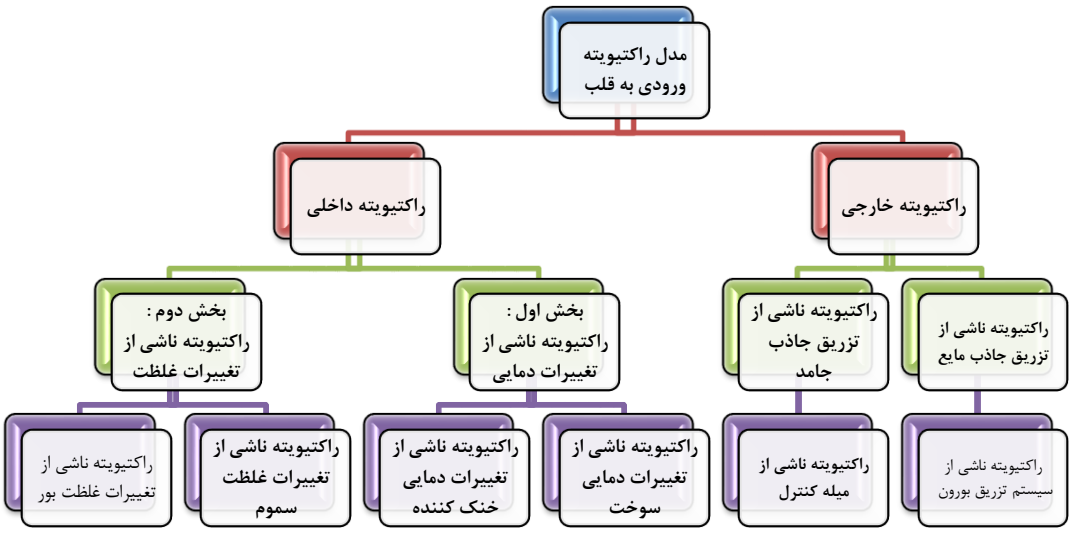
$\Lambda = \frac{l}{k_{eff}}$: متوسط زمان تولید نوترون

$\rho = \frac{k_{eff}-1}{k_{eff}}$: راکتیویته.

برای محاسبه پریود راکتور، می‌توان از رابطه تقریبی زیر استفاده نمود [۵]:

$$T = \frac{1}{\dot{\rho}} \qquad (۳)$$

با توجه به اینکه شرط تریپ کمتر شدن پریود از ۱۰ ثانیه است، این شرط حدوداً معادل بیشتر شدن شیب تغییرات راکتیویته از ۰٫۱ خواهد شد. علاوه بر مدل فوق، ضرایب راکتیویته جزو پارامترهای مهم دینامیکی و درعین‌حال ایمنی راکتورهای هسته‌ای است. جهت مدل سازی دینامیکی قلب راکتور لازم است تا راکتیویته‌های نمایش داده شده در شکل ۱ مدنظر قرار گیرند.



شکل ۱. راکتیویته‌های اعمالی به قلب راکتور

راکتیویته‌های داخلی شامل ضرایب راکتیویته دمای سوخت (پدیده داپلر) و خنک‌کننده و همچنین ضرایب راکتیویته تغییرات غلظت سوخت و جاذب‌های سوختنی است. ضرایب فیدبک دمای سوخت و خنک‌کننده توسط روابط زیر تعریف می‌شوند.

$$\alpha_T = \frac{1}{k}\frac{\partial k}{\partial T_F} + \frac{1}{k}\frac{\partial k}{\partial T_C} = \alpha_T^F + \alpha_T^C \qquad (۴)$$

$$\delta\rho_{fb} = \delta\rho_f + \delta\rho_c$$

$$\delta\rho_f = \alpha_f \delta T_f$$

$$\delta\rho_c = \alpha_c \delta T_c$$

که در آن :

α_f : ضریب راکتیویته فیدبک دمای سوخت (1/℃)

δT_f : تغییر دمای سوخت (℃)

α_c : ضریب راکتیویته فیدبک دمای خنک‌کننده (1/℃)

δT_c : تغییر دمای سوخت (℃)

همچنین راکتیویته‌های خارجی نیز شامل میله کنترل و جاذب‌های محلول در خنک‌کننده (اسید بوریک) است.

راکتیویته میله‌ی کنترل را می‌توان به صورت خطی و غیرخطی مدل کرد. در مدل خطی ارزش راکتیویته میله‌ی کنترل متناسب با میزان ورود آن به قلب راکتور است. [۷]

$$\rho_{ex} = G_r x \qquad (۵)$$

$$G_r = \frac{\rho_w}{H} \qquad (۶)$$

که در آن :

ρ_{ex} : ارزش راکتیویته میله‌ی کنترل ($)

Gr : ارزش راکتیویته میله‌ی کنترل بر واحد طول ($/cm)

x : میزان ورود میله‌ی کنترل به قلب (cm) (در x=0 میله‌ی کنترل کاملاً خارج از قلب و در x=H میله‌ی کنترل به‌طور کامل در داخل قلب است)

ρ_w : ارزش انتگرالی میله‌ی کنترل ($)

H : ارتفاع مؤثر قلب راکتور (cm)

بنابراین، تغییرات راکتیویته خارجی فقط به جابجایی میله‌ی کنترل وابسته است.

$$\delta\rho_{ex} = G_r \delta x \qquad (۷)$$

ورودی مدل سیستم راکتور سرعت میله‌ی کنترل است. بنابراین، با مشتق گرفتن از طرفین رابطه‌ی بالا رابطه را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{d\delta\rho_{ex}}{dt} = G_r \frac{d\delta x}{dt} = G_r v \qquad (۸)$$

که در آن v سرعت ورود میله‌ی کنترل به قلب برحسب (cm/s) است. موقعیت میله‌ی کنترل نیز از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

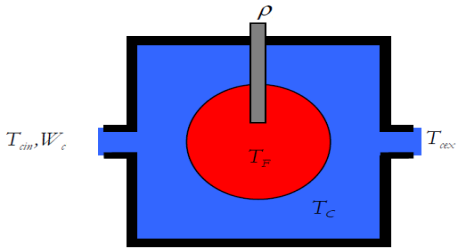
$$x = vt + x_0 \qquad (۹)$$

که در آن x_0 (cm) موقعیت اولیه‌ی میله‌ی کنترل است. در رابطه‌ی فوق اگر میله‌ی کنترل به‌طور کامل از قلب خارج شود، از لحظه‌ی خروج به بعد مقدار راکتیویته اعمالی مثبت، ثابت و برابر ρ_0 (ارزش راکتیویته میله‌ی کنترل در x_0 و برابر $G_r x_0$) و هم‌چنین پس از لحظه‌ی ورود کامل آن به قلب مقدار راکتیویته منفی،ثابت و برابر ρ_0-ρ_w خواهد بود.

در مدل غیرخطی میله‌ی کنترل رابطه‌ی استفاده می‌شود [۷].

$$\rho(x) = \rho_w\left(\frac{x}{H} - \frac{1}{2\pi}\sin\left(\frac{2\pi x}{H}\right)\right) \qquad (۱۰)$$

مدل ترموهیدرولیکی، براساس موازنه‌ی انرژی دو ناحیه سوخت و خنک‌کننده (مدل Lump) است.[۶]



شکل۲. مدل ترموهیدرولیک قلب

معادله تعادل انرژی برای سوخت و خنک‌کننده به‌صورت زیر است.

$$m_f C_f \frac{dT_f}{dt} = P - \frac{1}{R}(T_f - T_c) \quad (۱۱)$$

$$m_c C_{pc} \frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{R}(T_f - T_c) - 2WC_{pc}(T_c - T_{cin}) \quad (۱۲)$$

P: توان راکتور $(MWth)$

m_f : جرم کل سوخت درون قلب (Kg)

T_f : دمای سوخت $(°C)$

C_f : ظرفیت گرمایی ویژه سوخت $(MJ/Kg°C)$

m_c : جرم کل خنک‌کننده درون قلب (Kg)

C_{pc} : ظرفیت گرمایی خنک‌کننده در فشار ثابت $(MJ/Kg°C)$

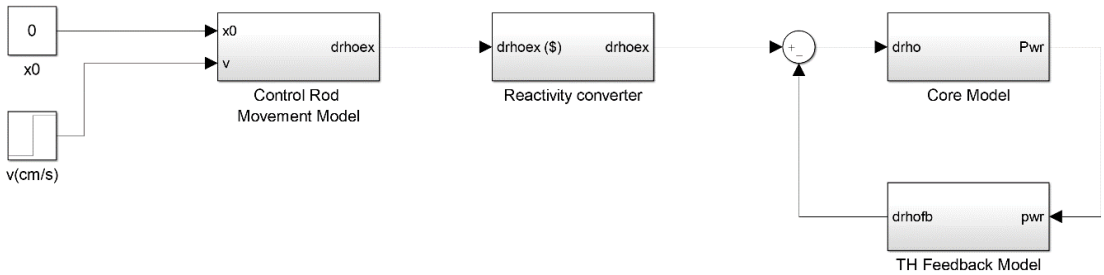
T_c : دمای خنک‌کننده $(°C)$

W : دبی جرمی خنک‌کننده (Kg/sec)

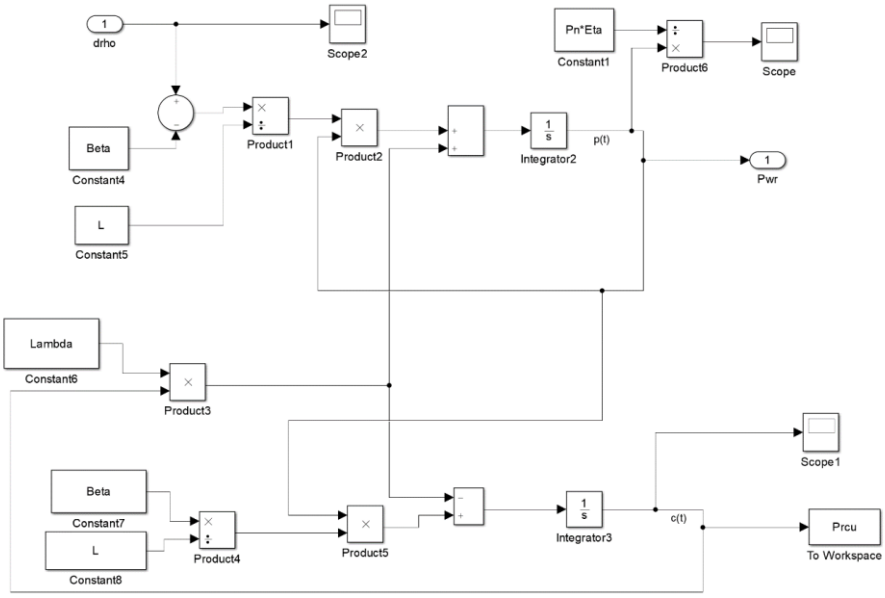
T_{cin} : دمای خنک‌کننده ورودی به قلب $(°C)$

۳. مدل سیمولینک

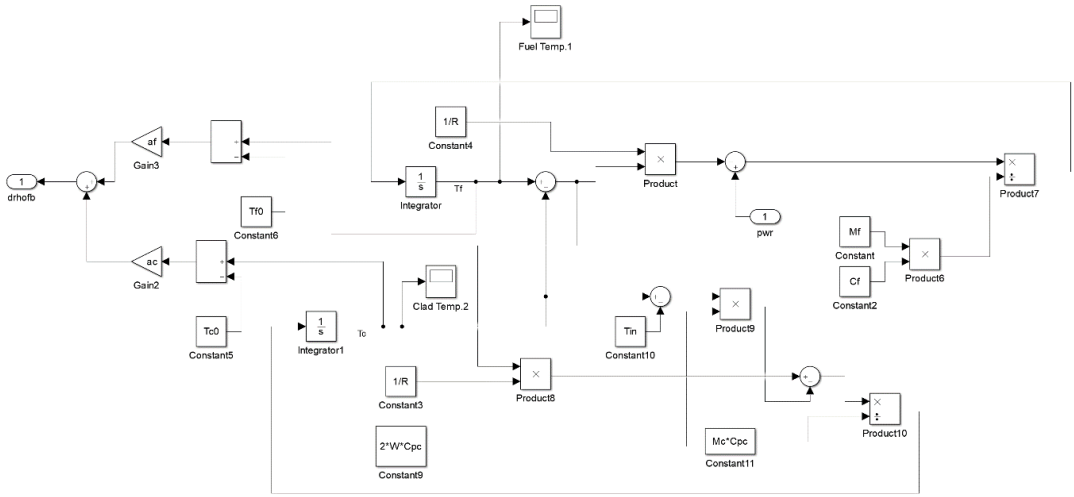
ثوابت نوترونی و ترموهیدرولیکی معادلات فوق مربوط به راکتور بوشهر از مرجع [۵] استخراج گردیده و در مدل سیمولینک استفاده شده است. این مدل در شکل‌های ۳-۷ نشان داده شده است.



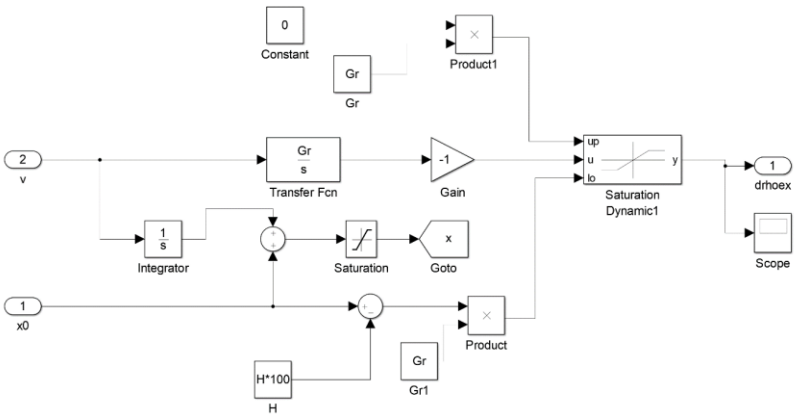
شکل۳. مدل نوترونیکی و ترموهیدرولیکی قلب راکتور بوشهر در سیمولینک



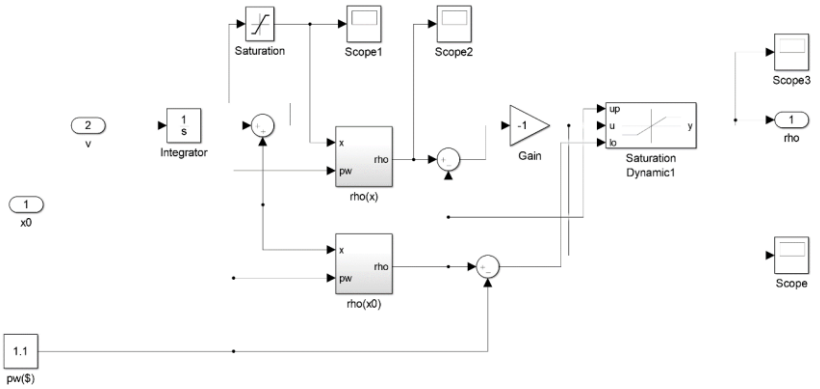
شکل۴. مدل‌سازی معادله سینتیک نقطه‌ای در حوزه زمان در سیمولینک



شکل۵. مدل ترموهیدرولیکی معادلات دمایی فیدبک سوخت و خنک‌کننده در سیمولینک



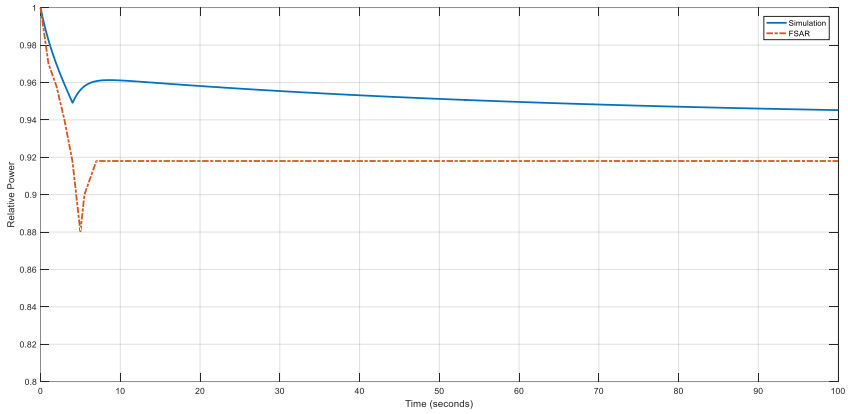
شکل۶. مدل خطی میله کنترل در سیمولینک



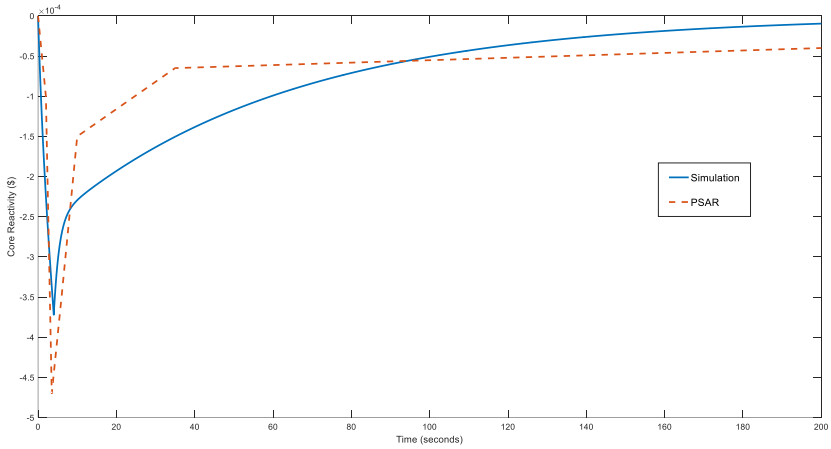
شکل۷. مدل غیرخطی میله کنترل در سیمولینک

۴. راستی آزمایی مدل دینامیکی قلب راکتور

برای راستی آزمایی مدل‌های شبیه‌سازی‌شده راکتور بوشهر از حادثه‌ی سقوط میله کنترل در این راکتور استفاده شده است. در این حادثه یک میله کنترل به ارزش 62pcm در مدت ۴ ثانیه به درون قلب سقوط می‌کند که نتایج به‌دست‌آمده با گزارش نهایی ایمنی راکتور بوشهر [۸] مقایسه شده است.



شکل۸. منحنی تغییر قدرت نسبی در آزمایش Rod Drop



شکل۹. منحنی تغییر قدرت نسبی در آزمایش Rod Drop

نتایج فوق برای مدل راکتیویته خطی میله کنترل حا صل شده ا ست. همان‌گونه که م شاهده می شود نتایج حا صل از شبیه‌سازی سیمولینک با نتایج PSAR مطابقت دارد و خطای آن‌ها کمتر از ۱۰٪ است. با توجه به تقریب‌های

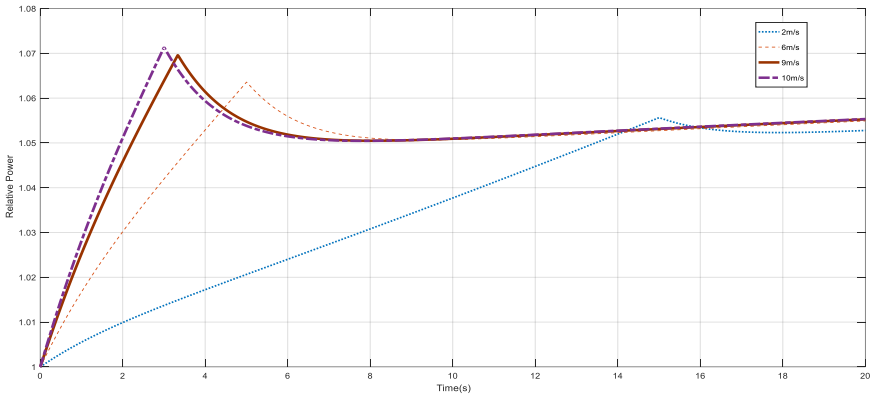
به‌کارگرفته شده و به‌کارگیری مدل سینتیک نقطه‌ای این مقدار خطا جهت مطالعه حداکثر سرعت حرکت میله کنترل قابل‌قبول است.

۵. ارزیابی حداکثر سرعت جابجایی میله کنترل

ورود میله‌های کنترل باعث اعمال راکتیویته مثبت به قلب راکتور می‌گردد. سیستم حفاظت راکتور بوشهر درصورتی‌که پریود کمتر از ۱۰ ثانیه شود یا مقدار توان به ۱۰۷ در صد توان نامی بر سد یا مقدار راکتیویته اعمالی بیش از ۰,۱ دلار شود، راکتور را تریپ خواهد داد. بنابراین برای تعیین حداکثر سرعت جابجایی میله‌های کنترل باید آستانه سرعتی که منجر به تریپ راکتور می‌شود را در مدل‌های خطی و غیرخطی به دست آورد.

۵. ۱. آزمایش ۱: نتایج مدل خطی میله کنترل

در این آزمایش موقعیت اولیه میله ۳۰۰ سانتی‌متر در داخل قلب است و به‌اندازه ۳۰ سانتی‌متر بیرون کشیده می‌شود.لازم به ذکر است که در x=0 میله کاملاً از قلب خارج و به ازای x=H میله کاملاً در قلب است. ارزش میله معادل ۱,۱۱ دلار برابر ارزش میله‌های کنترل گروه ۱۰ است. در مدل خطی میله کنترل با توجه به اینکه ارزش میله در تمامی طول آن یکسان فرض می‌شود، موقعیت اولیه میله تأثیری درنتیجه نخواهد داشت.

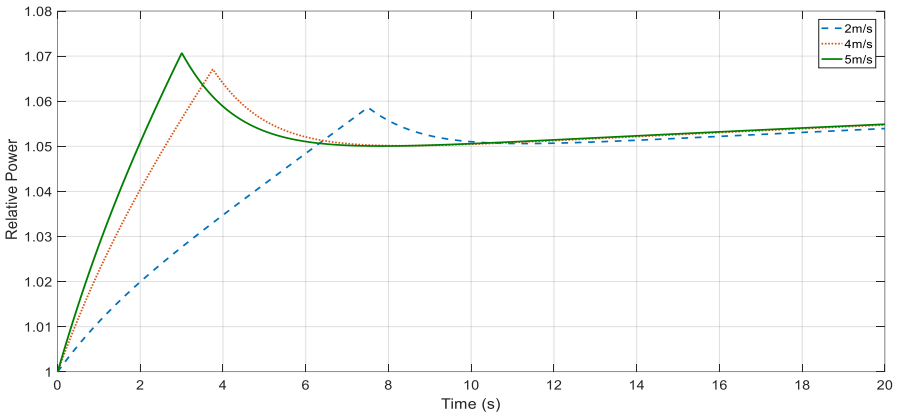


شکل۱۰. منحنی تغییر قدرت نسبی در آزمایش ۱

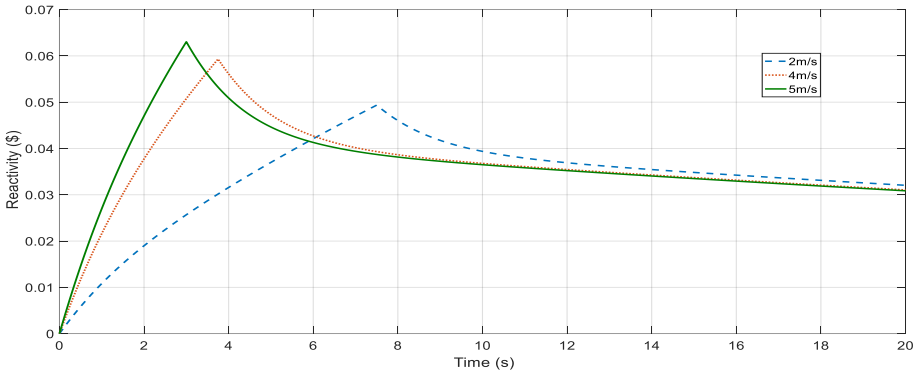
شرط پریود راکتور در طی این گذار همواره در محدوده ایمن و بالاتر از ۱۰ ثانیه قرار دارد و شرط محدودکننده مقدار توان نامی است که همان‌طور که در شکل‌های بالا دیده می شود، حداکثر سرعت برابر ۹ سانتی‌متر بر ثانیه است. در پژوهش پیشین [۵] که با استفاده از خطی سازی لاپلاس انجام‌گرفته بود این مقدار ۱۲ متر بر ثانیه تخمین زده شده بود.

۵. ۲. آزمایش ۲: نتایج مدل غیرخطی میله کنترل

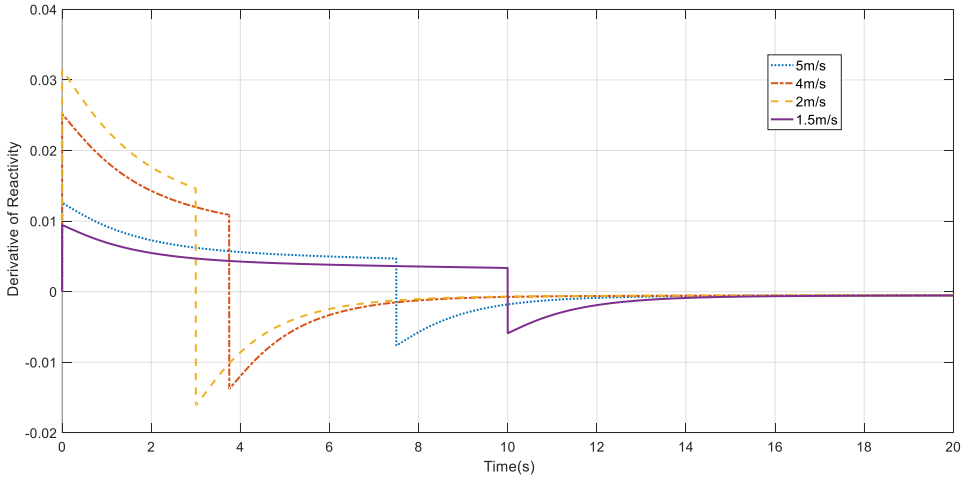
در این آزمایش میله کنترل در وسط قلب x0=175cm در نظر گرفته می‌شود و به‌اندازه ۱۵ سانتی‌متر بالا کشیده می‌شود. با توجه به ارزش راکتیویته این میله که در وسط قلب قرار دارد قاعدتاً محدوده مجاز سرعت بسیار کمتر از حالت‌های قبل خواهد شد.



شکل۱۱. منحنی تغییر قدرت نسبی در آزمایش ۲



شکل۱۲. منحنی تغییر راکتیویته در آزمایش ۲



شکل۱۳. منحنی مشتق راکتیویته در آزمایش ۲

همان‌گونه که در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود این بار محدوده مجاز سرعت توسط پریود محدود می‌شود و حداکثر سرعت ۱٫۵ سانتی‌متر بر ثانیه خواهد بود. در غیر این صورت پریود راکتور به زیر ۱۰ ثانیه خواهد رسید (معادل ۰٫۱ شیب تغییرات راکتیویته).

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش معادلات حاکم بر دینامیک قلب راکتور بوشهر در نرم‌افزار سیمولینک و در حوزه زمان و بدون استفاده از تقریب خطی سازی در توان نامی مدل‌سازی گردید. مدل حاصل‌شده با مقایسه نتایج آن برای آزمایش Rod Drop نیروگاه بوشهر راستی آزمایی گردید. با استفاده از این مدل رفتار دینامیکی قلب راکتور در گذارهایی که با حرکت میله کنترل ایجاد می‌شد، موردبررسی قرار گرفت. با توجه به معیارهای تریپ راکتور حداکثر سرعت جابجایی میله‌های کنترل مورد ارزیابی قرار گرفت. دو مدل خطی و غیرخطی برای ارزش راکتیویته میله کنترل مدنظر قرار گرفت که البته در واقعیت ارزش میله‌ها به‌صورت غیرخطی تغییر می‌نمایند. با توجه به این موضوع حداکثر سرعت جابجایی میله‌ها تابعی از موقعیت اولیه میله است. زمانی که میله تا نصف در راکتور باشد، تغییر سریع آن پریود راکتور را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این موارد حداکثر سرعت جابجایی به حدود ۱٫۵ سانتی‌متر بر ثانیه محدود می‌شود.

۶. مراجع

1- Yorke, G. L., Cherchas, D. B., “An Algorithm for Non-Linear Space-Time Nuclear Reactor Control,” Automatica. Vol. 17, No. 3, pp. 471-482. 1981.
2- Cheng Liu, Jim-Feng Peng, Fu-Yu Zhao, Chong Li, “Design and Optimization of Fuzzy-PID Controller for the Nuclear Reactor,” Nuclear Engineering and Design 239, pp. 2311–2316, 2009.
3- Zhao, F., Cheung, K. C., Yeung, R. M. K., “Optimal Power Control System of a Research Nuclear Reactor,” Nuclear Engineering and Design 219, pp. 247_252, 2002
4- Basu, S., Zemdegs, R., “Method of Reliability Analysis of Control Systems for Nuclear Power Plants,” Microelectronics Reliability 17, PP. 105–116, 1978.
۵- عهدوی قوجق، عبدالعزیز، ۱۳۹۱، تعیین بهترین محدوده‌ی سرعت میله های کنترل در راکتور WWER-1000 بوشهر، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی تهران (In Persian)
6- Henry, A.F., Nuclear-Reactor Analysis (HENRY), The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England.
7- Weaver, Lynn E., Reactor Dynamics and Control, American Elsevier Publishing Company, 1968.
8- Current Status of Probabilistic Safety Assessments for Soviet Designed Reactors, ENCONET Consulting, Final Report.