



بررسی اثر رآکتیویته بر رفتار دینامیکی قلب رآکتور VVER-1000

علی پذیرنده*^۱، دامون ثقتی^۲

۱- گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۷۷۵، تهران - ایران
۲- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۸۳۶، تهران - ایران

چکیده: در بررسی پایداری قلب رآکتور ۳۰۰۰ مگاواتی VVER-1000، با استفاده از متغیرهای حالت و معیار روث همراه با تعیین ضرائب دمایی رآکتیویته سوخت و کندکننده نشان داده‌ایم که قلب رآکتور در مقابل اعمال رآکتیویته یک دلار و زیر یک دلار پایدار است. ضرائب دمایی سوخت و کندکننده را برحسب غلظت اسید بوریک و دما حساب کرده‌ایم؛ نتایج حاصل نشان داد که هر چه غلظت اسید بوریک در کندکننده بیشتر باشد، به علت جابجایی طیف نوترون حرارتی، اثرهای متفاوتی بر ضریب دمایی رآکتیویته داشته و برای غلظت‌های بیش از ۱۸۰۰ppm اثر مثبتی بر ضریب دمایی رآکتیویته کندکننده دارد، در حالیکه تغییر غلظت اسید بوریک تأثیر زیادی بر ضریب دمایی رآکتیویته سوخت ندارد. محاسبات نشان داد که رفتار دینامیکی رآکتور برای طول عمر نوترون‌های آبی بین ۲ تا ۵۰ میکرو ثانیه، هرچه طول عمر نوترون‌های آبی کمتر باشد خیزش شار سریعتر و بیشتر است ولی روند افت شار کم و بیش یکسان است.

واژه‌های کلیدی: پایداری، دینامیک رآکتور، معیار روث، VVER-1000

Study of Reactivity Effect on Dynamic Behavior of VVER-1000 Reactor Core

A. Pazirandeh*¹, D. Seghati²

1- Nuclear Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, P.O.Box:14155-775, Tehran -Iran
2- Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran

Abstract: In the study of stability of VVER-1000 reactor core the state variables method and Routh criterion were used. By calculating temperature reactivity coefficients for fuel and moderator we have shown that the reactor core remains stable against 1\$ reactivity or less than 1\$. The coefficients were calculated for different concentration of boric acid as a function of temperature. The concentration above 1800ppm prevails itself as a positive effect. It should be noted that 1800ppm boric acid concentration had minimal effect on fuel temperature reactivity coefficient. The simulation calculation for 1\$ reactivity insertion showed that the prompt neutron life time between 2 to 50 μ s causes sharp rise in flux for shorter lifetime, while decays remain more or less the same for 2 to 50 μ s prompt neutron lifetime.

Keywords: Stability, Reactor Dynamics, Routh Criterion, VVER-1000

۱- مقدمه

در بررسی مسایل دینامیکی رآکتور عوامل و پارامترهای رآکتور قدرت، اغلب تابع زمان هستند و تغییرات آنها بر عملکرد کل رآکتور اثر می‌گذارد. در اکثر موارد زنجیره‌ای از متغیرهای حالت از جمله: دما، چگالی نوترون‌ها، چگالی محصولات شکافت، باعث می‌شوند تا شرایطی پیش آید که ممکن است منجر به تحولات دینامیکی در قلب رآکتور گردد که بعضی از پارامترها خود از نوع متغیرهای وابسته هستند. این تحولات ممکن است موجب نوسان یا اغتشاش در قدرت رآکتور و در نتیجه تغییر دمای نقاط مختلف قلب آن گردند. در این میان اثرهای فیدبک سوخت و کندکننده از عوامل مؤثر در پایداری سیستم رآکتورند ولی در بعضی از شرایط، قلب رآکتور دچار نوساناتی می‌شود که ممکن است منجر به ناپایداری آن گردد.

در بررسی مسأله پایداری سیستم، روش مناسب بکار بردن نظریه پایداری خطی برحسب توابع انتقال و نمودار بلوک^(۱) است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که یک نمودار بلوکی، فرایند جریان اطلاعات را به ما نشان می‌دهد. در مورد یک سیستم خطی، مقدار یک اختلال بخودی خود تأثیرگذار نهایی بر ناپایداری سیستم نیست زیرا اصل برهمنی عوامل، حاکم بر رفتار سیستم است. به محض حذف اختلال یا عامل اختلال، تمام جواب‌ها به صورت ترکیبی خطی از تابع زمان درمی‌آیند. این بدان معنی است که یک سیستم خطی پایدار، با اعمال رآکتیویته جزئی، توان رآکتور بطور خطی افزایش یافته و منجر به افزایش دمای سوخت و کندکننده می‌شود. بدیهی است در چنین شرایطی در اثر وجود فیدبک، سیستم به حالت تعادل برمی‌گردد. این تغییرات ممکن است غیرخطی باشند، در این صورت با استفاده از روش‌های «خطی‌سازی»^(۲) تابع تغییرات را به تابع خطی تبدیل می‌کنند. بنابر ضوابط کنترلی، شرط لازم و کافی برای پایداری یک سیستم این است که تمام قطب‌های تابع تبدیل سیستم دارای بخش‌های حقیقی منفی باشند.

در نظریه کنترل، چندین روش برای بررسی پایداری وجود دارد که می‌توان از معیار روث^(۳)، پاسخ فرکانسی شامل نمودار بد^(۴)، نمودار قطبی و نمودار لگاریتمی دامنه برحسب فاز، نمودار نیکولز^(۵)، نمودار مکان هندسی ریشه‌ها، ضابطه نایکوئیست^(۶)، ضابطه پایداری لیاپانف^(۷) و ماتریس (فیدبک) متغییر حالت نام

برد [۱، ۲ و ۳]. در این بررسی از معیار روث بهره‌گیری شده است و نشان داده‌ایم که سیستم در صورت اعمال رآکتیویته یک دلار پایدار است.

۲- مدل سینتیک نقطه‌ای تک گروهی

از معادلات سینتیک نقطه‌ای با دوشاخه فیدبک رآکتیویته در بررسی سیستم‌ها بسیار استفاده می‌شود [۱]. این نوع سیستم شاخه‌ای، بظاهر مستقل و مبنای مطالعه بسیاری از سیستم‌های بهم وابسته است. معادلات سینتیک نقطه‌ای را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l} n + \sum_{i=0}^{i=6} \lambda_i C_i \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta}{l} n - \lambda_i C_i \quad (2)$$

با استفاده از تبدیل لاپلاس، معادلات دیفرانسیلی سینتیک «۱» و «۲» رآکتور را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$G(s) = \frac{n_0(s + \lambda)}{\Lambda s(s + \lambda + \frac{\beta}{\lambda})} \quad (3)$$

معادلات حرارتی نرخ تغییر دمای سوخت «۱» و کندکننده «۲» را به صورت زیر می‌نویسیم [۱]:

$$\frac{dT_1'}{dt} = K_1(n - n_0) - \gamma_1 T_1' \quad (4)$$

$$\frac{dT_2'}{dt} = K_2(n - n_0) - \gamma_2 T_2' \quad (5)$$

$$\rho = \rho_0 - \alpha_1 T_1' - \alpha_2 T_2' \quad (6)$$

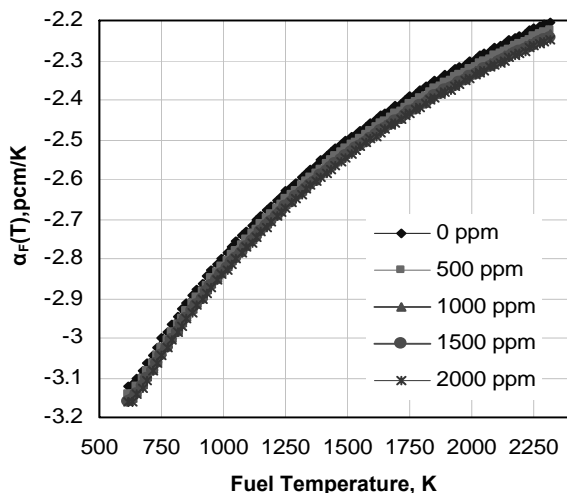
T_1 و T_2 دماهای سوخت و کندکننده، α_1 و α_2 به ترتیب ضریب دمایی رآکتیویته سوخت و کندکننده، n چگالی نوترون‌ها پس از اعمال رآکتیویته، ρ رآکتیویته در دمای T و ρ_0 رآکتیویته در دمای 293 درجه کلوین، K_1 و K_2 به ترتیب عکس گرماهای ویژه سوخت و کندکننده γ_1 و γ_2 به ترتیب ضرائب واهلش سوخت و کندکننده‌اند. تابع تبدیل فیدبک به این صورت نوشته می‌شود:

۲۲۵۰K را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقدار ضریب رآکتیویته در تمام غلظت‌های بین صفر تا ۲۰۰۰ppm منفی است. همانگونه که در شکل (۱-b) نشان داده شده است افزایش اسیدبوریک در هر دما اثر بسیار جزئی بر ضریب رآکتیویته سوخت دارد.

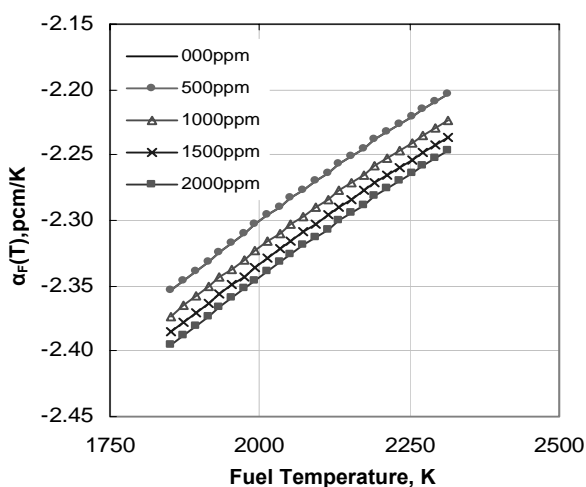
با افزایش غلظت اسیدبوریک ضریب دمایی غلاف نیز همواره منفی است و مقدار آن ناچیز (10^{-3} pcm/K) است به همین دلیل نقشی در پایداری رآکتور ندارد.

شکل ۲ تغییرات ضریب دمایی رآکتیویته ناشی از دمای سوخت را برای غلظت‌های مختلف اسیدبوریک در دماهای مختلف نشان می‌دهد.

بطوریکه در شکل ۳ نشان داده شده ضریب دمایی رآکتیویته ناشی از دمای کندکننده در غلظت‌های پایین اسیدبوریک در



شکل (۱-a)- ضرایب دمایی رآکتیویته سوخت در غلظت‌های مختلف اسیدبوریک.



شکل (۱-b)- ضرایب دمایی رآکتیویته سوخت برحسب دما در غلظت‌های مختلف اسیدبوریک.

$$H(s) = \frac{(A_1 + A_2)(s + \xi)}{(s + \gamma_1)(s + \gamma_2)} \quad \text{و} \quad \xi = \frac{A_1\gamma_2 + A_2\gamma_1}{A_1 + A_2} \quad (7)$$

$$A_1 = \alpha_1' K_1 \dots A_2 = \alpha_2' K_2 \quad (8)$$

تابع تبدیل فیدبک سیستم دارای یک صفر و دو قطب است و بسته به علامت ضریب دمایی رآکتیویته در هر ناحیه از قلب، بهره تابع تبدیل فیدبک ممکن است مثبت یا منفی باشد و صفر سیستم در سمت چپ و یا راست محور موهومی قرار گیرد.

۱-۲ ضرایب دمایی رآکتیویته قلب

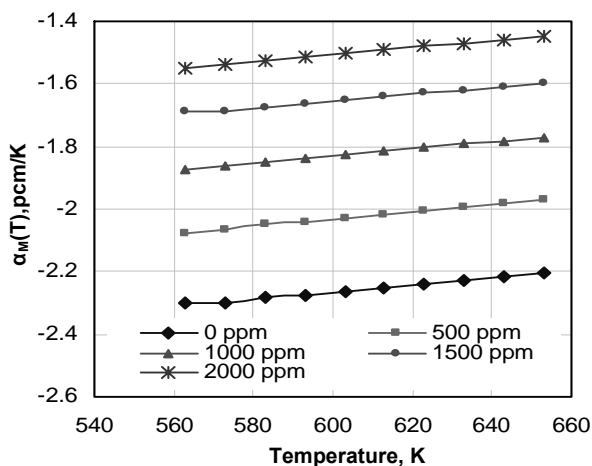
رآکتور هسته‌ای چندین مشخصه خود کنترل کننده دارد، یکی از آنها ضریب دمایی رآکتیویته است که به عنوان عامل اصلی پایداری سازی شناخته می‌شود. آنچه که این مشخصه‌ها را در رآکتور مهم و مؤثر جلوه می‌دهد اثر منفی آنها بر رآکتیویته است. از عوامل مهم دیگر می‌توان پهن شدگی دوپلری، کاهش چگالی کندکننده و کاهش یا افزایش غلظت اسیدبوریک را نام برد. دو مورد اول باعث کاهش رآکتیویته و دو مورد بعدی سبب افزایش یا کاهش رآکتیویته می‌گردند. در عمل برای آنکه رآکتور پایدار بماند لازم است ضرایب دمایی رآکتیویته قلب در همه شرایط منفی باشند.

۱-۱-۲ محاسبه ضرایب رآکتیویته دمایی با استفاده از کد WIMSD4

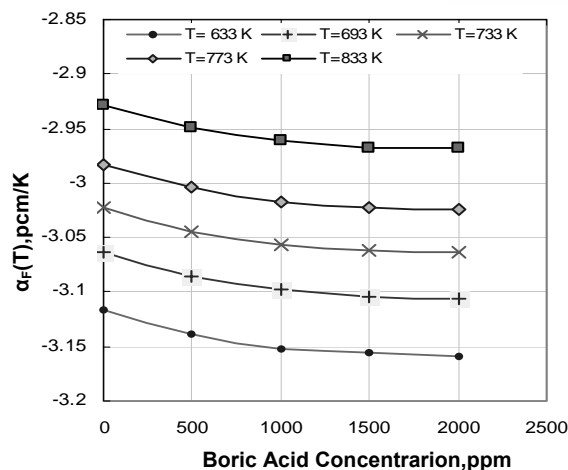
به علت اهمیت این ضرایب در کنترل رآکتور، اقدام به محاسبه ضرایب دمایی رآکتیویته با استفاده از رابطه زیر کرده‌ایم:

$$\alpha_r(T) = \frac{l}{k} \left(\frac{\Delta k}{\Delta T} \right) \quad (9)$$

که در این رابطه مقدار k را برحسب غلظت اسیدبوریک، به کمک کد WIMS حساب کرده سپس تغییرات آن را برحسب دمای محیط بدست آوردیم. برای محاسبه α_{Cl} و α_M ، α_F تغییرات ضریب تکثیر مؤثر مربوط را به ترتیب در نتیجه تغییر دمای سوخت، غلاف و کندکننده در نظر گرفتیم. ابتدا اثر رآکتیویته‌ای افزایش اسیدبوریک محلول در کندکننده را برای سوخت حساب کردیم. شکل (۱-a) ضریب دمایی رآکتیویته ناشی از دمای سوخت را برای غلظت‌های صفر، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ppm اسیدبوریک در بازه دمایی بین ۵۰۰ تا



شکل ۴- ضرایب دمایی رآکتیویته ناشی از دمای کندکننده بدون در نظر گرفتن تغییرات چگالی کندکننده در غلظت‌های مختلف اسیدبوریک.



شکل ۲- ضریب دمایی رآکتیویته سوخت برحسب غلظت‌های مختلف اسیدبوریک در دماهای مختلف سوخت.

که $G(s)$ و $H(s)$ به ترتیب توابع تبدیل سیستم و فیدبک هستند. در نتیجه تابع تبدیل حلقه باز (معادله ۱۱) و حلقه بسته (معادله ۱۲) سیستم را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$G(s)H(s) = K \frac{\beta(s+\lambda)(s+\xi)}{\Lambda s(s+\lambda+\frac{\beta}{\Lambda})(s+\gamma_1)(s+\gamma_2)} \quad (11)$$

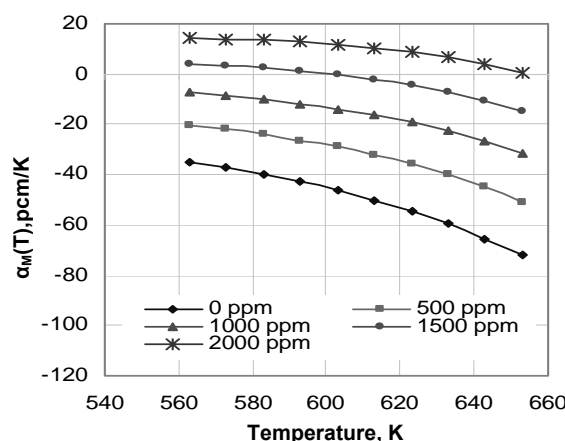
$$K = (A_1 + A_2) \times \frac{n_0}{\beta} 1 + G(s)H(s) = 1 + K \frac{\beta(s+\lambda)(s+\xi)}{\Lambda s(s+\lambda+\frac{\beta}{\Lambda})(s+\gamma_1)(s+\gamma_2)} \quad (12)$$

معادله مشخصه سیستم می‌شود:

$$D(s) = \Lambda s(s+\lambda+\frac{\beta}{\Lambda})(s+\gamma_1)(s+\gamma_2) + K\beta(s+\lambda)(s+\xi) = \Lambda s^4 + \Lambda(\gamma_1+\gamma_2+\lambda+\frac{\beta}{\Lambda})s^3 + \{\Lambda[\gamma_1\gamma_2+\lambda(\gamma_1+\gamma_2)+\frac{\beta}{\Lambda}(\gamma_1+\gamma_2)] + K\beta\}s^2 + [\Lambda(\lambda\gamma_1\gamma_2+\frac{\beta}{\Lambda}\gamma_1\gamma_2) + K\beta(\lambda+\xi)]s + K\beta\lambda\xi = 0 \quad (13)$$

۳- نتایج

بر اساس این مدل، محاسبات دینامیکی برای یک قلب رآکتور با دو مسیر فیدبک و با استفاده از کمیت‌های مندرج در جدول ۱ انجام گرفته است [۵]. نتایج تغییرات شار نوترون و تغییرات اختلاف دمای سوخت و کندکننده در شکل‌های ۵ تا ۸ برای رآکتیویته اعمالی ۱\$ نشان داده شده‌اند.



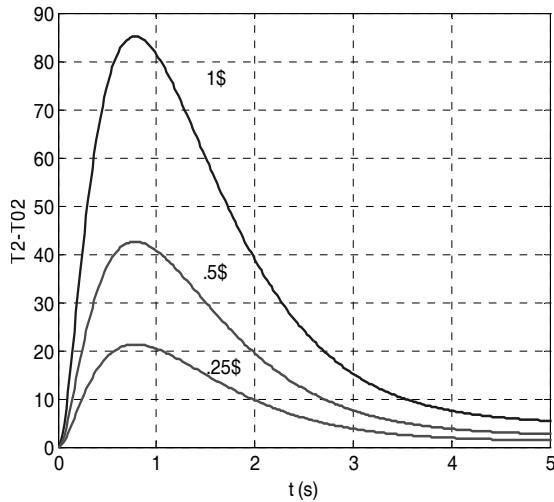
شکل ۳- ضرایب دمایی رآکتیویته ناشی از دمای کندکننده با در نظر گرفتن تغییرات چگالی کندکننده در غلظت‌های مختلف اسیدبوریک.

بازه‌های دمایی بین ۵۰۰ تا ۲۲۵۰ K منفی است، اما با افزایش غلظت اسیدبوریک به بیش از ۱۵۰۰ ppm ضریب دمایی رآکتیویته مثبت می‌گردد. این محاسبات نشان داد که مقدار اسیدبوریک موجود در کندکننده باید دارای حد مجازی باشد که از آن مقدار تجاوز نماید. در شرایط ثابت ماندن چگالی کندکننده همانگونه که شکل ۴ نشان می‌دهد برای کلیه غلظت‌های اسیدبوریک ضریب دمایی رآکتیویته ناشی از دمای سوخت منفی است.

۲-۲ فیدبک دو مسیره با یک گروه نوترون تأخیری

برای بررسی قلب رآکتور در نتیجه تغییر متغیرهای حالت، تابع تبدیل سیستم و تابع تبدیل فیدبک به صورت زیر هستند:

$$G(s) = \frac{n_0(s+\lambda)}{\Lambda s(s+\lambda+\frac{\beta}{\Lambda})} \text{ و } H(s) = \frac{(A_1 + A_2)(s+\xi)}{(s+\gamma_1)(s+\gamma_2)} \quad (10)$$



شکل ۸- تغییرات دمای کندکننده در فرایند گذرا.

نتیجه حاصل از معیار ورث بصورت آرایه زیر است [۱ و ۲]:

۴- بحث و نتیجه گیری

با بررسی های انجام شده بر اساس معیار روث برای رآکتیویته ورودی ۱\$ همانگونه که جدول ۲ نشان می دهد سیستم قلب رآکتور پایدار است زیرا بر اساس معیار روث تغییر علامتی در ستون اول جدول روث رخ نمی دهد. نتایج نشان می دهند که وجود نوترون های تأخیری نقش قابل ملاحظه ای در سوق دادن سیستم به سمت پایداری دارند. در تمام مدل های مورد بررسی دیده می شود که با استفاده از روش فیدبک متغیر حالت می توان پاسخ سیستم را به ورودی پله ای رآکتیویته، تا اندازه ای بهبود بخشید.

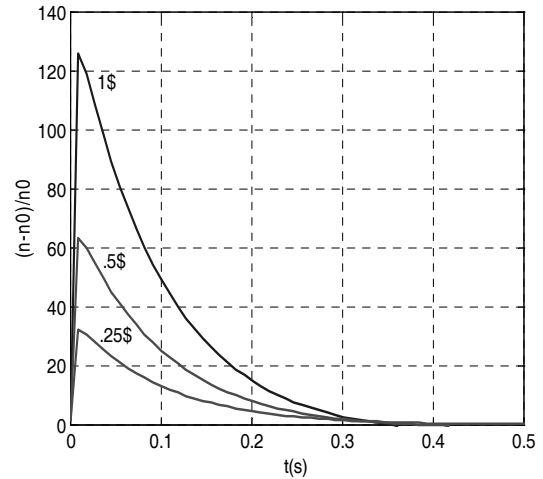
ضرایب دمایی رآکتیویته سوخت را برای حالت های مختلف که در هر حالت مقدار اسید بوریک در کندکننده ثابت بوده است حساب شد. نتایج محاسبات نشان داد که مقدار ضرایب دمایی رآکتیویته ناشی از دمای سوخت همواره منفی است و این دلیل بر پایداری رفتار قلب بوده است. در مورد کندکننده ضریب دمایی رآکتیویته ناشی از دمای کندکننده برای غلظت های مختلف اسیدبوریک (غلظت بور از صفر تا ۲۰۰۰ppm) ضمن افزایش غلظت اسیدبوریک جذب نوترون های حرارتی در کندکننده

جدول ۲- آرایه روث.

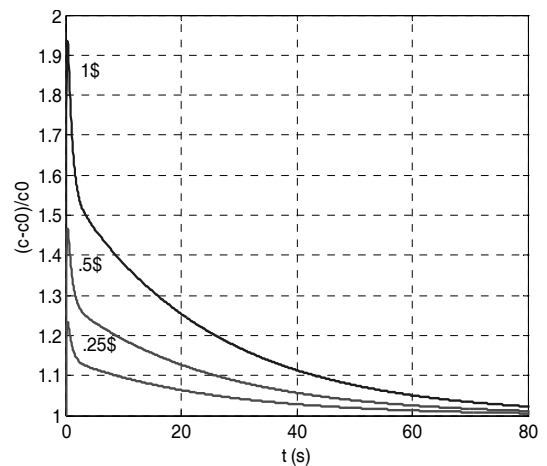
20E-6	67.70E-3	3/08E-3
7.37E-3	113E-3	0
67.39E-3	3.0E-3	0
113.46E-3	0	0
3.08E-3	0	0

جدول ۱- کمیت های مورد استفاده در محاسبات.

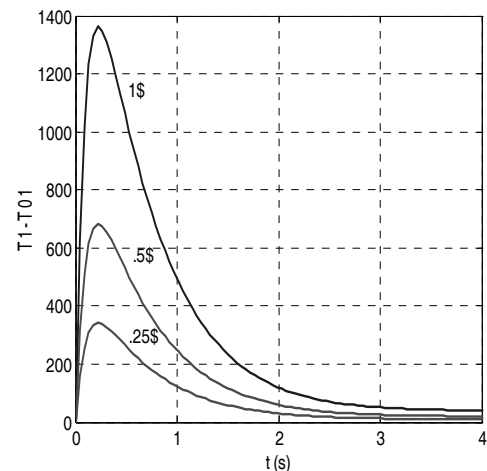
$T_{ci}=592K$	$C_F=302 \frac{J}{kgK}$	$T_{ce}=560K$	$M_F=75000kg$
$\alpha_M=-10 \times 10^{-5}K^{-1}$	$\alpha_F=-3.1 \times 10^{-5}K^{-1}$	$C_p=5610 \frac{J}{kgK}$	$m=13600 \frac{kg}{s}$
	$\lambda=0.080s^{-1}$	$\Lambda=2 \times 10^{-5}s$	$\beta=0.0072$



شکل ۵- تغییرات جمعیت نوترون آبی در فرایند گذرا.



شکل ۶- تغییرات جمعیت نوترون تأخیری در فرایند گذرا.



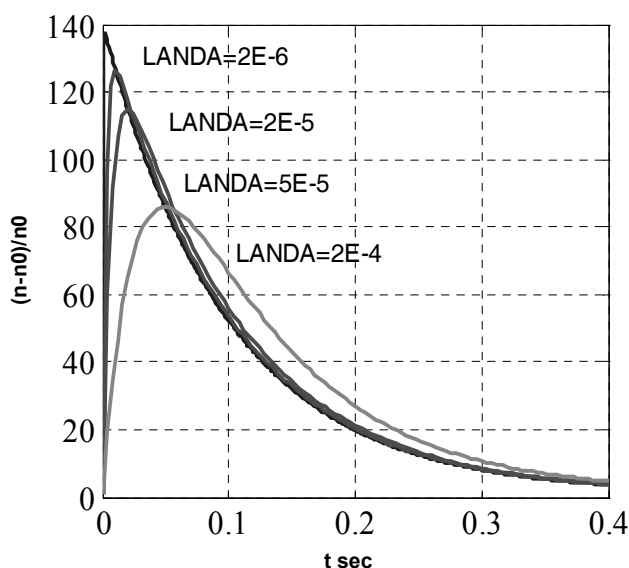
شکل ۷- تغییرات دمای سوخت در فرایند گذرا.

عمل می‌کند ولی نمی‌توان راجع به کل فرایند و افزایش فشار درون قلب رآکتور با جرأت بحث کرد.

تحولات اشاره شده در رفتار رآکتور برای رآکتیویته‌های ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ دلار مشابه هم هستند. به همین جهت جداگانه بحث نشده‌اند.

در مورد اثر چگالی بر رفتار قلب، بطوری که در بالا اشاره شد در محاسبه تغییرات چگالی کندکننده منظور شده است. در شکل‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود که تغییر چگالی کندکننده نقش مؤثری در مقدار ضریب دمایی رآکتیویته ناشی از کندکننده دارد. نکته حائز اهمیت در این دو شکل مربوط به میزان غلظت اسیدبوریک است که اگر چگالی کندکننده تغییر نکند و غلظت اسیدبوریک حتی اگر ۲۰۰۰ ppm باشد ضریب رآکتیویته کندکننده منفی است ولی با تغییر چگالی کندکننده برای ۲۰۰۰ ppm مثبت می‌شود.

شکل ۹ نشان می‌دهد در رآکتور وقتی عمر نوترون‌های آنی کاهش می‌یابد برای حالت‌های گذرا با اعمال رآکتیویته یک دلار قله منحنی توان گذرا شدیداً افزایش می‌یابد و برای $\Lambda=20\mu s$ افزایش قدرت در مدت ۰/۱۵ ثانیه به قله می‌رسد و به دلیل اثرهای فیدبک ذاتی در مدت ۰/۴ ثانیه به حالت اولیه (n_0) خود برمی‌گردد. می‌دانیم که از ابتدای کار رآکتور با تنظیم غلظت اسیدبوریک، رآکتور به صورت بحرانی کار می‌کند. با کارکرد رآکتور و تجمع محصولات شکافت به ویژه زینان و



شکل ۹- تغییرات جمعیت نوترون آنی در فرایند گذرا برای عمر نوترون‌های آنی مختلف.

افزایش می‌یابد در نتیجه جمعیت نوترون‌های حرارتی افت نسبی پیدا می‌کند به همین علت ضریب دمایی کندکننده به سمت مثبت شدن میل می‌کند در حالیکه ضریب دمایی سوخت بطور جزئی کاهش می‌یابد زیرا عامل اصلی تغییر ضریب رآکتیویته در سوخت پهن‌شدگی دوپلری است و افزایش اسیدبوریک اثر قابل ملاحظه‌ای بر شار نوترون‌های فوق حرارتی ندارد.

از طرف دیگر افزایش جذب نوترون‌های حرارتی باعث انتقال قله توزیع ماکسول به انرژی بالاتر می‌شود که اصطلاحاً معروف به افزایش دمایی نوترون (T_n) است. این باعث جذب کمتر نوترون‌های کند می‌گردد.

$$T_n = T_m \left(1 + C \frac{\sum_a}{\xi \sum_s} \right)$$

عامل دیگر، یعنی نسبت شار متوسط نوترون در کندکننده به شار متوسط نوترون در سوخت کاهش می‌یابد. این تغییر باعث افزایش ضریب بهره‌وری می‌گردد.

در مورد حالت گذرای توان، شکل ۵ نشان می‌دهد که در مدت کمتر از ۰/۱ ثانیه به حداکثر می‌رسد ولی به دلیل ضریب دمایی رآکتیویته منفی، توان شدیداً افت پیدا می‌کند و در مدت کمتر از ۰/۱ ثانیه به ۶۰ برابر می‌رسد که انرژی تولیدی کمتر از ۵ برابر توان در حالت t_0 (قبل از فرایند گذرا و اعمال رآکتیویته) است.

شکل ۶ نشان می‌دهد که در مدت ۰/۲ ثانیه دمایی سوخت ۱۳۰۰ افزایش می‌یابد یعنی به ۲۰۰۰ می‌رسد که احتمالاً سوخت پایدار است یعنی یکپارچگی آن حفظ می‌شود.

از شکل ۷ برمی‌آید که نوترون‌های تأخیری تأثیری بر روند افزایش و کاهش قدرت ندارند.

شکل ۸ تغییرات دمایی کندکننده را نشان می‌دهد و دیده می‌شود که در مدت زمان حدود ۰/۸ ثانیه گرمای سوخت به کندکننده انتقال یافته و دمایی آن به حداکثر می‌رسد یعنی ۹۰ درجه افزایش می‌یابد ولی در این لحظه قدرت رآکتور به مقدار اولیه افت پیدا می‌کند که از نظر افزایش کل انرژی قلب تغییر فاحشی نسبت به حالت ۰/۱ ثانیه ندارد و از شکل دیده می‌شود که در مدت ۴ ثانیه اختلاف دمایی کندکننده افت شدید پیدا کرده و به ۱۰ درجه می‌رسد که ۸۰ درجه زیر نقطه حداکثر بوده و نشان‌دهنده این است که سیستم خنک‌کننده بسیار مؤثر

References:

1. D.L. Hetrick, "Dynamics of nuclear reactors, lagrange park," American Nuclear Society (1993).
2. K. Ogata, "Modern control engineering," Publisher Prentice Hall (1997).
3. L.E. Weaver, "Reactor dynamics and control," Elsevier (1968).
4. A. Hainoun, I. Khamis, G. Saba, "Dynamic analysis of the closed-loop transfer function in the minature neutron source reactor," Nuclear Engineering and Design, **232**, 19-28 (2004).
5. B. Ivanov, k. Ivanov, P. Groudev, M. Pavlova, V. Hadjiev, VVER-1000 Coolant Transient Benchmark, US Department of Energy (2002).

ساماریم و تولید آکتیویدها به علت جذب نوترون‌ها در محصولات شکافت و انجام شکافت در بعضی از آکتیویدها در نهایت از غلظت اسیدبوریک باید کاسته شود تا حالت بحرانی رآکتور حفظ گردد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که سطح مقطع جذب بور ۱۰ در واکنش $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ تا حدود ۱ MeV انرژی تابعیت عکس سرعت دارد در حالی که بیشتر محصولات شکافت و آکتیویدهای با عدد جرمی زوج دارای رزونانس‌های جذب نسبتاً قوی هستند که بر نرخ جذب نوترون‌های آبی و تا اندازه‌ای تأخیری مؤثر هستند بنابراین در طول مدت کار رآکتور، عمر نوترون‌های آبی کاهش می‌یابد و این پدیده به لحاظ دینامیک رآکتور باید به حساب آید.

پی‌نوشت‌ها:

- ۱- Block Diagram
- ۲- Linearization
- ۳- Routh Criterion
- ۴- Bode
- ۵- Nichols
- ۶- Nyquist
- ۷- Liapunov