

بررسی تغییرات توان راکتور و راکتیویته با استفاده از حل معادلات سینتیک نقطه ای با تأثیر فیدبک دما و تولید سموم زینان و ساماریوم با نرم افزار MATLAB

دکتر کمال حداد^۲، مجتبی مرتضوی و سید محمد میر وکیلی

بخش مهندسی هسته‌ای و مرکز تحقیقات ایمنی هسته‌ای دانشگاه شیراز

چکیده:

برای بررسی رفتار دینامیک راکتور و تعیین وضعیت توان و شار نوترونی در قلب راکتور نیاز به بررسی پارامترهایی لحظه ای همراه با تأثیرات فیدبکهای موجود در سیستم می باشد. در این مطالعه هدف اندازه گیری توان راکتور یا شار نوترونی و نیز بررسی تغییرات راکتیویته و تأثیرات آن بر روی توان راکتور می باشد. در این مطالعه که از جعبه افزار *Simulink* بسته نرم افزار *MATLAB* استفاده شده، معادلات سینتیک راکتور و حل این دسته از معادلات پس از نرمالسازی، تغییرات توان راکتور و شار با در نظر گرفتن انواع فید بک های موجود در سیستم شبیه سازی شده است. این فیدبک ها شامل فیدبکهای دمایی و نیز فیدبکهای ناشی از تولید سموم ید، زینان و ساماریوم در قلب راکتور می باشد. تغییرات راکتیویته سیستم ناشی از فیدبکهای دمایی و تغییرات زمانی غلظت سموم نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

کلید واژه ها: توان راکتور، سینتیک نقطه ای، فیدبک راکتیویته، نرمال سازی، سموم، *Simulink Toolbox*

مقدمه:

تا کنون روشهای متعددی برای بررسی سینتیک راکتورهای هسته ای به کار گرفته شده اند. در این روشها اغلب از معادلات سینتیک نقطه ای که مستقل از مکان می باشند برای بررسی دینامیک راکتور استفاده شده است [۱]. در این معادلات شکل فضایی شار با زمان تغییر نمی کند. حل این معادلات به دو صورت تحلیلی و عددی انجام شده است. از جمله کارهای انجام شده در این زمینه می توان به حل بهینه عددی معادلات سینتیک نقطه ای توسط *M. Kinard, E. J. Allen* در سال ۲۰۰۳ اشاره کرد [۲]. در این روش برای حل معادلات سینتیک راکتور از تقریب های تکه-خطی ثابت (*Piecewise Constant*) (*PCA Approximation*) برای توابع راکتیویته استفاده شده است. سیستم معادلات دیفرانسیل خطی حاصل به طور دقیق در هر یک گامهای زمانی حل شده اند. مدل حاصل با استفاده از شرایط اولیه، داده ها و توابع راکتیویته متنوع مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج حاصل بیانگر این موضوع است که روش مورد استفاده کارا و دقیق می باشد. *E. J. Allen* و *J. G. Hayes* در سال ۲۰۰۵، از یک سیستم معادلات دیفرانسیل تصادفی برای بررسی دینامیک چگالی نوترونها و غلظت نوترونها تاخیری در یک راکتور هسته ای نقطه ای

² hadadk@shirazu.ac.ir

استفاده کرده اند [۳]. مدل تصادفی حاصل با محاسبات مونت کارلو و داده های تجربی مورد آزمایش قرار گرفته و نشان می دهد که مدل حاصل به طور دقیق توصیف کننده رفتار اتفاقی چگالی نوترونها و غلظت نوترونهای تاخیری در یک راکتور نقطه ای می باشند. در این مطالعه کار برد نرم افزار *MATLAB* در حل عددی معادلات سینتیک نقطه‌ای همراه با فیدبکهای دما، راکتیویته و سموم با استفاده از جعبه افزار *Simulink* مورد نظر است. شرایط اولیه مورد نیاز شامل توان و غلظت‌های اولیه هسته‌های پیشین، راکتیویته، شار نوترونی می‌باشد. با نرمال سازی کلیه معادلات، شرایط اولیه را برابر با یک قرار می‌دهیم. تغییرات توان راکتور بر حسب راکتیویته ورودی و فیدبکهای سیستم و نیز غلظت زینان و ساماریم و نیز تغییرات دمایی با رسم نمودارها مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

روش کار:

برای اندازه گیری توان راکتور و یا شار نوترونی و نیز بررسی تغییرات راکتیویته و تاثیرات آن روی توان راکتور نیاز به حل معادلات سینتیک راکتور است. از طرفی تاثیرات فیدبک دمایی و تغییر غلظت سموم روی راکتیویته بایستی با معادلات قبلی کوپل شود تا رفتار دینامیکی سیستم مشخص گردد. بنابراین نیاز است تا راکتیویته بر حسب مقدار ورودی که می تواند ترکیبی از یک تابع پله و شیب باشد و نیز تغییرات راکتیویته ناشی از فیدبک مدلسازی شود. در این حالت با تغییر پارامترهای مدل می توان مقدار راکتیویته ورودی را انتخاب کرد. برای تعیین تغییرات لحظه ای راکتور از معادلات سینتیک نقطه ای شش گروهی استفاده شده است [۴] [۵] [۶]. از مدل نیوتون برای فیدبک دمایی بر حسب توان راکتور جهت مدلسازی دما استفاده شده است [۴]. با استفاده از ضریب راکتیویته دمایی، فیدبک دمایی در مدل راکتیویته وارد شده است. بعد از مدل کردن فیدبک دمایی سیستم به بررسی معادلات مربوط به تولید سموم نظیر زینان و ساماریم پرداخته شده و روابط مربوط به تغییرات راکتیویته ناشی از این سموم در حالت کار پایدار راکتور تعیین خواهد شد. در اینجا نیز راکتیویته فیدبک ناشی از این سموم در مدل اصلی راکتیویته لحاظ می شود. اکنون نیاز به حل یک دسته معادلات دیفرانسیلی کوپل شده شامل معادلات سینتیک، مدل راکتیویته، مدل بیان کننده وضعیت دمایی سیستم و نیز معادلات مربوط به تولید زینان و ساماریم بر حسب متغیر توان راکتور یا شار نوترونی وابسته به زمان است. شرایط اولیه برای حل پارامترهای مسئله شامل توان اولیه راکتور، غلظت هسته پیشین ها، راکتیویته، شار نوترونی، و برای بررسی فیدبک ناشی از تولید سموم، غلظت پایدار زینان و ساماریم است. پس از نرمال سازی متغیرها تغییرات آنها نسبت به مقادیر اولیه بررسی گردیده است. این امر با استفاده از نرم افزار *MATLAB* امکان پذیر شده است. در این نرم افزار از جعبه نرم افزاری (*Simulink*) برای مدل کردن معادلات واز روش ode-45 برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیلی کوپل شده استفاده شده است. در ابتدا معادلات توان لحظه ای را بدون تاثیر فیدبک ناشی از تغییر غلظت سموم حل کرده و نتایج حاصله ترسیم

شده اند و سپس تجزیه و تحلیلی از تغییرات توان و راکتیویته بعمل آمده است. سپس کلیه معادلات اعم از معادلات سینتیک نقطه ای و فیدبک های دما و سموم در کنار هم قرار گرفته و مساله در حالت کلی و با در نظر گرفتن تاثیر کلیه پارامترهای موثر در توان و راکتیویته بررسی شده است و با مشاهده نتایج و ترسیم آنها تفسیر جامعی از تغییرات هر یک از پارامترها نظیر تغییر در توان راکتور، شار نوترونی، غلظت زینان و ساماریم ، راکتیویته و دما بعمل آمده است. نکته مورد توجه این است که بعد از نرمال سازی معادلات ما تنها نیاز به مقدار اولیه توان راکتور یا شار نوترونی داریم که به راحتی در عمل قابل اندازه گیری است و حتی می توان بر حسب تجربه و مشاهده کار راکتورهای قدرت و یا تحقیقاتی مقدار مناسب را جایگزین کرد. همچنین در این شبیه سازی می توانیم حالت های گذرا که در حوادث راکتیویته اتفاق می افتد را با تغییر راکتیویته ورودی شبیه سازی نمود و تغییرات ایجاد شده در توان و غلظت سموم و فیدبکهای راکتیویته را بررسی کرد.

نرمال سازی معادلات سینتیک نقطه ای شش گروهی همراه با معادلات تغییرات غلظت سموم

با استفاده از معادلات سینتیک راکتور [۵] و نوشتن این معادلات در حالت کار پایدار مقدار نامی توان یا جمعیت نوترونی را بدست آورده و با تقسیم کردن روابط به مقادیر اولیه معادلات نرمالیزه خواهند شد. معادلات نرمال شده سینتیک نقطه ای و تغییرات غلظت ید، زینان و ساماریوم به صورت زیر بدست می آیند:

$$(۱) \quad \begin{cases} \frac{d\hat{n}(t)}{dt} = \frac{\beta}{l} [(R-1)\hat{n}(t) + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\beta} \hat{C}_i(t)] \\ \frac{d\hat{C}_i(t)}{dt} = \lambda_i [\hat{n}(t) - \hat{C}_i(t)] \end{cases}$$

$$(۲) \quad \frac{d\hat{I}(t)}{dt} = -\lambda_I \hat{I}(t) + \lambda_I \hat{\phi}(t) = \lambda_I (\hat{\phi}(t) - \hat{I}(t))$$

$$(۳) \quad \frac{1}{\phi_0} \frac{d\hat{X}(t)}{dt} = \left[\frac{\lambda_X + \bar{\sigma}_{aX}}{\gamma_X + \gamma_I} \right] (\gamma_I \hat{I}(t) + \gamma_X \hat{\phi}(t)) - \left(\bar{\sigma}_{aX} \hat{\phi}(t) + \frac{\lambda_X}{\phi_0} \right) \hat{X}(t)$$

$$(۴) \quad \frac{1}{\phi_0} \frac{d\hat{S}(t)}{dt} = \bar{\sigma}_{as} [\hat{P}(t) - \hat{\phi}(t)\hat{S}(t)]$$

سپس فیدبکهای راکتیویته منفی ناشی از زینان و ساماریم، بر حسب پارامترهای نرمال شده در قسمتهای قبل به دست می آیند [۵] :

$$(۵) \quad \Delta\rho = -\frac{\sigma_X \hat{X}}{\Sigma_a} * \frac{\gamma_I + \gamma_X}{\lambda^*} \Sigma_f \phi_0$$

$$(۶) \quad \Delta\rho_{Xe} = -\frac{\sigma_X \hat{X} * 0.6}{\lambda^*} * (\gamma_I + \gamma_X) \phi$$

$$\Delta\rho = -\frac{\sigma_S S}{\Sigma_a} = -\frac{\sigma_S \hat{S}}{\Sigma_a} * S_0 \quad (7)$$

$$\Delta\rho_{Sm} = -\gamma_P \frac{\Sigma_f \hat{S}}{\Sigma_a} \quad (8)$$

مدل راکتیویته بکارگرفته شده در این شبیه سازی بر حسب مقادیر ورودی و فیدبک دمایی و سموم زینان و ساماریم:

راکتیویته ناشی از سموم + راکتیویته ناشی از دما + راکتیویته ورودی = راکتیویته کل

$$R = A + B * t + \alpha_t * TEMP + \Delta\rho_{Sm} + \Delta\rho_{Xe} \quad (9)$$

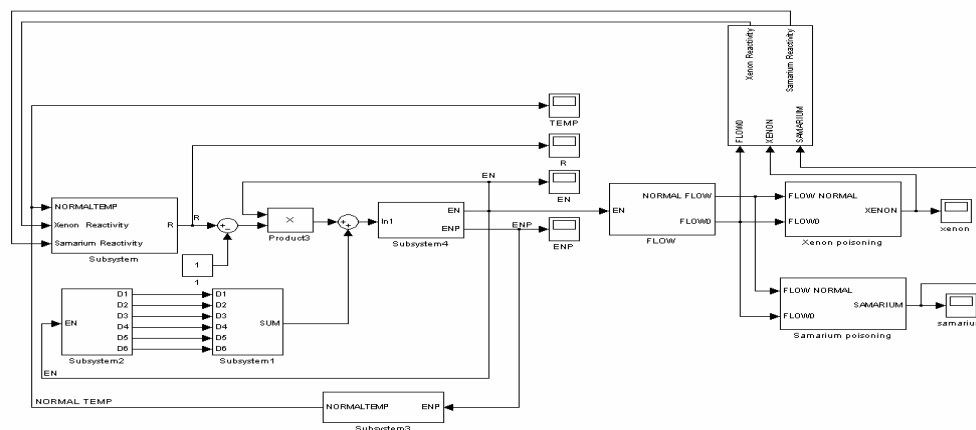
α_t = ضریب فیدبک راکتیویته که مقدار منفی است.

$\Delta\rho_{Sm}$ = تغییر در راکتیویته ناشی از تولید ساماریم که مقدار منفی است.

$\Delta\rho_{Xe}$ = تغییر در راکتیویته ناشی از تولید زینان که مقدار منفی است.

حل معادلات نرمال با نرم افزار MATLAB در محیط Simulink :

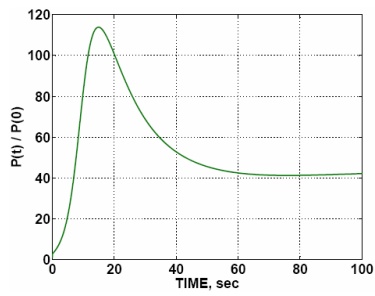
نرم افزار محاسباتی MATLAB و بکارگیری شبیه سازی این معادلات در Simulink به روش ode-45 برای حل این معادلات کوپل شده استفاده شده است. شکل ۱ شماتیک یک مجموعه شبیه سازی را نشان می دهد.



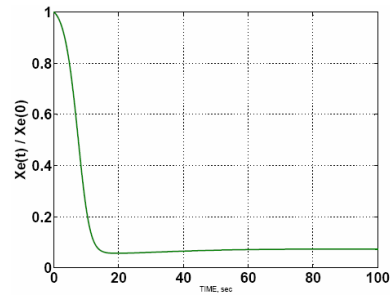
شکل (۱): شبیه سازی روابط سینتیک راکتور همراه با فیدبکهای دما و تولید سموم

بحث در نتایج :

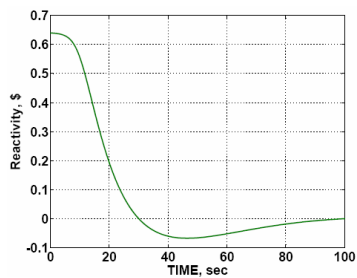
شکل (۲) تغییرات توان، راکتیویته و غلظت زینان و ساماریم را به ازای راکتیویته ورودی ۰/۷ دلار نشان می دهد. در این حالت راکتیویته ورودی کمتر از یک دلار بوده و تاثیر نوترونهای آنی و نوترونهای تاخیری در حالت گذرای سیستم مهم میباشد.



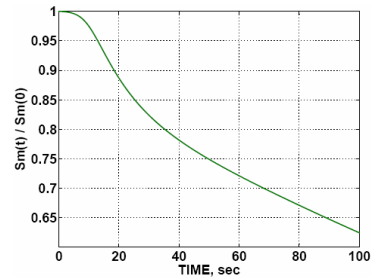
(ب)



(الف)

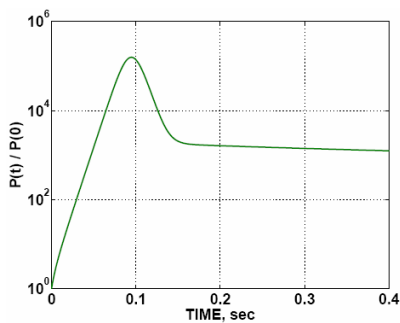


(د)

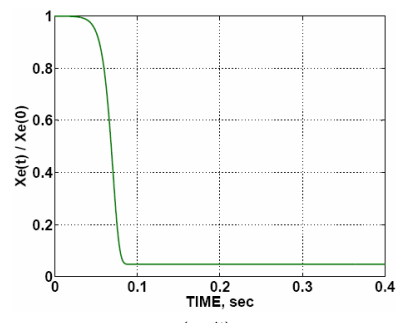


(ج)

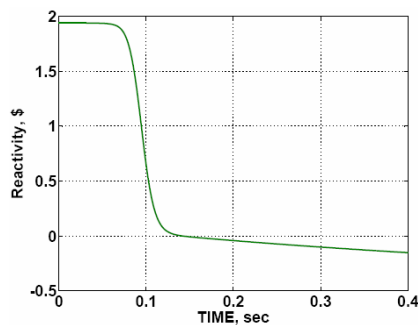
شکل (۲): نتایج به ازای راکتیویته ورودی ۰/۷ دلار.



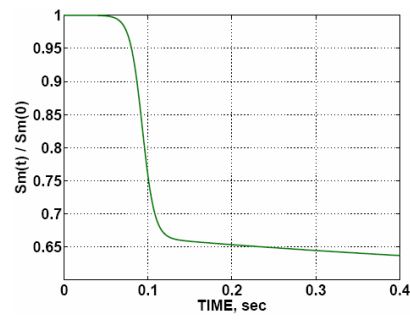
(ب)



(الف)

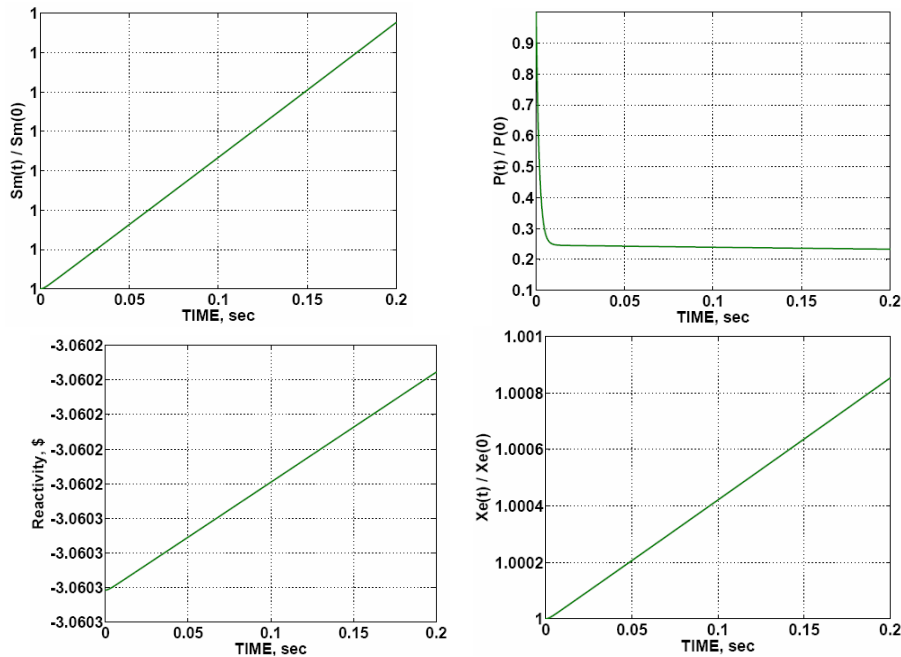


(د)



(ج)

شکل (۳): نتایج به ازای راکتیویته ورودی ۲ دلار



شکل (۴): نتایج به ازای راکتیویته ورودی ۳- دلار

شکل (۳) تغییرات توان و دیگر پارامترهای سیستم را به ازای راکتیویته ورودی پله ۲ دلار ($R > 1$) نشان میدهد همانطور که در شکل (۳-ب) مشاهده می شود توان به سرعت و در زمان کوتاهی افزایش می یابد و از آنجایی که زمان افزایش توان بسیار کوچک است می توان از تغییرات غلظت precucerها صرف نظر کرده و در واقع نوترونهای تأخیری در رفتار سیستم تأثیر چندانی نخواهند داشت و نقش اصلی را نوترونهای آنی ایفا می کنند. غلظت زینان بواسطه افزایش شار سرعت کاهش میابد ولی در بلند مدت با شیب بسیار کم به حالت قبل باز می گردد. شکل (۴) نشان دهنده تغییرات توان، راکتیویته و غلظت سموم زینان و ساماریم به ازای راکتیویته ورودی منفی سه دلار است در این حالت توان به سرعت کاهش یافته (شکل ۴-ب) و به دنبال آن، غلظت سموم زینان و ساماریم شروع به افزایش می کند.

مراجع:

- [1] J. J. Duderstadt and L. J. Hamilton, *Nuclear Reactor Analysis*. New York: Wiley, 1976, pp. 241–245.
- [2] M. Kinard and E. J. Allen, “Efficient numerical solution of the point kinetics equations in nuclear reactor dynamics,” in *annals of nuclear energy* 31, 2004, pp. 1039-1051.
- [3] J. G. Hayes and E. J. Allen, “Stochastic point-kinetics equations in nuclear reactor dynamics,” in *annals of nuclear energy* 32, 2005, pp. 572-578.
- [4] John R. Lamarsh, *Introduction to Nuclear Reactor Theory*, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1972
- [5] E. E. Lewis, *Nuclear Power Reactor Safety*, John Wiley & Sons, New York, 1977.
- [6] W. M. Stacy, *Nuclear Reactor Physics*. New York: Wiley, 2001.