

آنالیز عددی تزریق راکتیویته در راکتور تحقیقاتی تهران

احمد لشکری، حسین خلفی، حسین کاظمی نژاد، صمد خاکشورنیا

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، معاونت توسعه کاربرد پرتوها-راکتور

چکیده:

در این مقاله به آنالیز روشی موثر و مفید برای تحلیل رفتارهای گذرای راکتور تهران پرداخته می شود. در این روش با استفاده از تقریب سینتیک نقطه ای در بخش نوترونیک و روش توده ای در بخش ترموهیدرولیک معادلات تولید توان و انتقال حرارت به روش عددی حل شده است. مدل فیدبک های دمایی بکار رفته، مدل وابستگی خطی راکتیویته به دمای سوخت و خنک کننده می باشد. نتایج حاصل از این روش برای دو تزریق آبی ۰,۹ و ۱,۵ دلار آبی در قلب اول تهران بررسی شد و با نتایج PARET مقایسه شد. مدل پیشنهادی در راکتیویته های کم هم خوانی خوبی با نتایج کد PARET دارد. استفاده از این روش در تزریق راکتیویته هایی که منجر به جوشش خنک کننده نشود، جواب های قابل قبولی دارد.

کلید واژه: سینتیک نقطه ای، مدل توده ای، ترموهیدرولیک، تزریق راکتیویته، راکتورهای تحقیقاتی.

مقدمه:

راکتورهای هسته ای در حالت کلی به دو دسته راکتورهای تحقیقاتی و راکتورهای تولید قدرت تقسیم بندی می شوند. که اساس کار هر دوی آنها تولید انرژی در اثر شکافت هسته های سنگین است. هدف راکتورهای تحقیقاتی داشتن شار نوترونی ماکزیمم در محل تابش دهی نوترون می باشد. این راکتورها علاوه بر داشتن شار ماکزیمم، بایستی پارامترهای ایمنی را نیز برآورده کنند. استفاده از کدهایی که برای آنالیز ایمنی راکتورهای قدرت بکار برده میشود بدلیل پیچیدگیهای آنها در راکتورهای تحقیقاتی توصیه نمی شود. بکارگیری تعداد زیادی از این کدها، نیاز به تلاش و مهارت زیاد برای تهیه ورودی و همچنین تحلیل خروجی کدها می باشد. بطوریکه این عمل برای اپراتورهای راکتورهای تحقیقاتی کوچک سخت است. بدلیل آنکه اپراتورها مجبورند بارها بخاطر هر تغییرات کوچک در آرایش قلب راکتور، محاسبات مربوط به آنالیز ایمنی را انجام دهند. در صورتی که می توانیم با تقریب های مناسبی معادلات را برای این گونه از راکتورها به سادگی حل کنیم و در نتیجه کد مخصوص این راکتورها را تولید کنیم. هدف اصلی این مطالعه، تهیه یک مدل عددی برای آنالیز رفتارهای گذرای راکتور تهران می باشد. از این مدل می توانیم برای تحلیل قدرت به ازای راکتیویته های متفاوت استفاده کنیم. تنها معیاری که بایستی رعایت شود این است که نبایستی از راکتیویته ای استفاده کنیم که به ازای آن دمای خنک کننده به دمای اشباع برسد. بنابراین صحت نتایج تا زمانی که لایه بخار تشکیل نشده باشد قابل اعتماد است.

روش کار:

کدهای دینامیکی بکار رفته برای تحلیل رفتارهای گذرای یک راکتور از سه بخش نوترونیک، ترموهیدرولیک و محاسبه فیدبک ها تشکیل شده است. در بخش نوترونیک معادلات مربوط به تولید توان حل شده و با استفاده از توان بدست آمده دماهای مربوط به سوخت، غلاف و خنک کننده در بخش ترموهیدرولیک محاسبه میشود. افزایش یا کاهش دما باعث تغییر نرخ واکنش های مربوط به تولید توان می شود. فیدبک های دمایی سهم هریک از عناصر موجود در قلب راکتور را محاسبه کرده و به بخش نوترونیک اعمال می کند.

- مدل سینتیک نوترونی

مدل عددی ارائه شده در بخش حل معادلات نوترونیک، تقریب سینتیک نقطه ای می باشد، که راه حل مناسب و سریعی برای محاسبه توان راکتورهایی با قلب کوچک می باشد. معادلات سینتیک نقطه ای به روش های متفاوتی قابل حل است و در اکثر مواقع از روش رانجو گوتا مرتبه ۴ استفاده می شود. اما در این کد از مدل

ریاضی که در سال ۲۰۰۴ توسط ماتيو کینارد^۱ برای حل معادلات دینامیک راکتور پیشنهاد شده، استفاده شده است. [۱] در این روش به هر تعداد گروه نوترون تاخیری، می توان معادلات دینامیکی راحل کرد. دقت این روش بسیار مناسب و قابل مقایسه با جواب های دقیق مسئله می باشد که البته بستگی به اندازه مشبندی زمانی دارد. در این روش پیشنهادی پارامترهای وابسته به زمان در بازه های زمانی کوچک ثابت فرض می

شوند^۲ (PCM). در نتیجه در هریک از این بازه ها تمام جملات ثابت بوده و دستگاه معادلات بصورت دقیق حل می شوند و همین روش در بازه های زمانی متوالی تکرار می شود. یکی از مهمترین خواص معادلات

سینتیک نقطه ای غیر آرام بودن این گونه معادلات است. در نتیجه رفتار این سیستم از معادلات در تمام بازه های زمانی شبیه هم نیست. این ناآرامی شناخته شده در این معادلات یکی از مشکلات اساسی حل این دسته از معادلات می باشد، در نتیجه ناگزیر به حل معادله در بازه های زمانی کوچک هستیم. اگر جملات مربوط به چشمه نوترون و راکتیویته تابع آرامی از زمان باشد، روش PCM جواب های بسیار دقیقی می دهد. البته اگر وابستگی به زمان در این جملات شدید باشد نیز می توان نتایج دقیقی گرفت به شرط اینکه بازه های زمانی نسبت به دقت جوابها کوچک در نظر گرفته شود. شرایط اولیه این مدل بصورت تعادلی در نظر گرفته میشود، که

۱۱- Matthew Kinard

۱۲- stiffness

۱۳- Piecewise Constant Method

در آن تغییرات زمانی صفر است. الگوریتم حل این مدل بدینصورت است که معادلات دینامیک نوترون، برای یک بازه کوچک h مابین زمان های t_i, t_{i+1} مستقل از زمان فرض می شوند و مقادیر متوسط آنها در زمان $t_i + h/2$ محاسبه شده و بعنوان مقدار ثابت در این بازه در نظر گرفته میشود. آنگاه معادلات به روش ویژه مقادیری حل میشوند که در نهایت منجر به ریشه یابی معادله آین آور میشود و با استفاده از این ریشه ها، بردارهای ویژه ساخته و در نهایت جواب های مسئله بدست می آیند. با استفاده از نرم افزار **Matlab** این روش در حالت شش گروهی پیاده سازی شده است. صحت و دقت جواب های این روش با سایر روش های بکار رفته برای حل معادله سینتیک نقطه ای مقایسه شده است. برای راکتوری با مشخصات $\lambda = 0.0018, \beta = 0.0079$ ، $T=50, \Lambda$ با تزریق راکتیویته نوسانی $\rho(t) = 0.00533 \sin(\frac{\pi t}{0.01})$ این مدل تست شده است. معیار سنجش حداکثر چگالی نوترون در بازه زمانی ۱۰۰ ثانیه می باشد. با در نظر گرفتن گام زمانی نسبتا بلند ۱ ثانیه، جواب بدست آمده در حدود ۵۰ می باشد که با نتایج سایر روشهای بکار رفته که در حدود ۴۹٫۲۵ می باشد همخوانی خوبی دارد. [۲]

– مدل ترموهیدرولیک

بخش ترموهیدرولیک این کد به روش مدل توده ای بررسی شده است. از این مدل عموما برای مطالعه کیفی دینامیک راکتور استفاده می شود. در این مدل از قانون سرمایش نیوتن برای انتقال حرارت از غلاف به خنک کننده استفاده می شود [۳]. در بخش ترموهیدرولیک، شبیه سازیها بر اساس مدل دوکانالی در نظر گرفته شده است. کانال داغ نماینده داغ ترین صفحه سوخت به همراه کانال خنک کننده مجاورش است و کانال متوسط نماینده سایر کانال های دیگر موجود در قلب می باشد. در این مدل اثرات دما تنها برای یک دمای موثر برای هریک از نواحی سوخت، غلاف و خنک کننده بکار می رود. از دماهای محاسبه شده در کانال متوسط برای محاسبه فیدبک ها استفاده میشود. برای محاسبه حداکثر دماها در کانال داغ، بایستی ضرایب مربوط به فاکتور مهندسی EF و قله توان شعاعی RPF را در توان متوسط ضرب کرد. وابستگی دما به مکان بصورت استاتیک و معمولا بصورت کسینوسی در نظر گرفته می شود در این مرحله فاکتور قله توان محوری APF اعمال می گردد. این مدل به دلیل سادگی الگوریتم حل عددی و قابل قبول بودن دقت نتایج حاصل اقتصادی بنظر می رسد. در این مدل راکتور تحقیقاتی تهران با نوع سوخت MTR که توسط آب سبک کند و خنک میشود به

عنوان مرجع مطالعه انتخاب شده است. در این مدل از رابطه دیتوس باتلر^۴ به عنوان ضریب انتقال حرارتی غلاف به خنک کننده در جریان های آشوبی استفاده شده است. دمای استخر یا دمای ورودی کانال خنک کننده

^۴ -lumped parameters

۱۷-Dittus-Boelter correlation

به عنوان یک پارامتر ثابت داده می شود. در این مدل تغییرات چگالی خنک کننده بر حسب دما بصورت یک رابطه درجه ۲ در نظر گرفته شده است. صحت نتایج این بخش در حات استاتیک برای توان ثابت ۵ مگاوات در قلب اول راکتور تهران تست شد. نتایج صحت عملکرد این بخش را تایید می کرد.

- مدل راکتیویته و محاسبه فیدبک ها

مدل راکتیویته کل شامل راکتیویته خارجی تزریق شده به همراه راکتیویته های ناشی از فیدبک ها می باشد. راکتیویته خارجی می تواند بصورت پله ای یا شیب دار با زمان باشد.

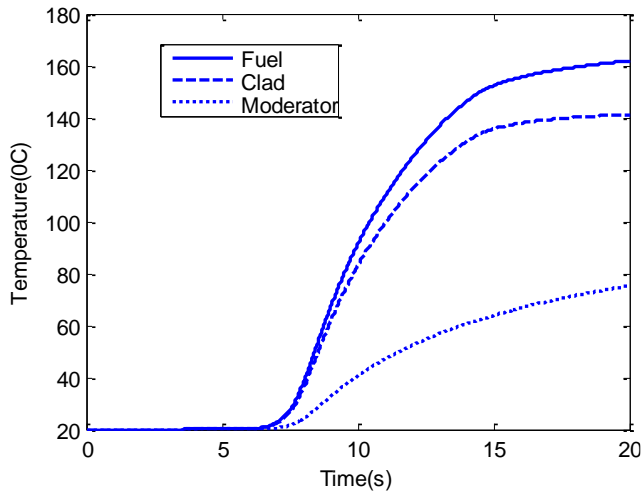
$$R(t) = R_{ex} + \alpha_f \Delta T_f + \alpha_c \Delta T_c + \alpha_{pc} \Delta \rho_{pc}$$

ΔT_c ، ΔT_f به ترتیب تغییرات دمای سوخت و خنک کننده در کانال متوسط و نیز $\Delta \rho_{pc}$ تغییرات دانسیته خنک کننده در اثر تغییر دمای خنک کننده می باشد. α_f ، α_c و α_{pc} به ترتیب ضرایب فیدبک دمایی متوسط سوخت، خنک کننده و تغییر دانسیته خنک کننده می باشد. در این مدل وابستگی راکتیویته به دما بصورت خطی در نظر گرفته شده است ولی می توان با داشتن ضرایب درجه دوم تغییرات راکتیویته با دما این معادله را تصحیح کرد.

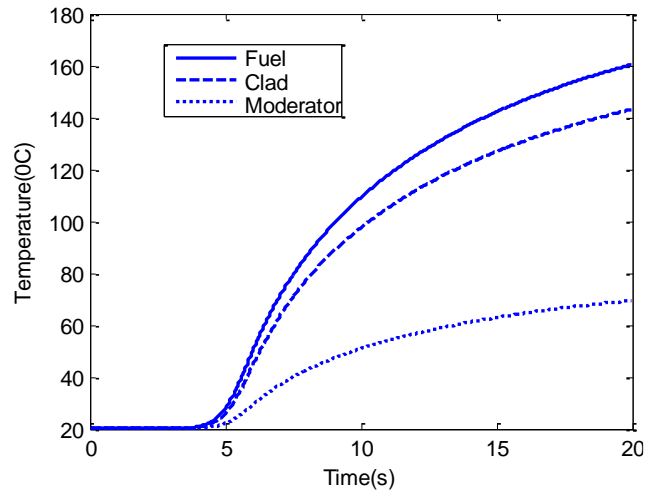
- نتایج

از مدل عددی پیشنهاد شده برای شبیه سازی رفتارهای گذرای تزریق راکتیویته مثبت نخستین قلب راکتور تحقیقاتی تهران استفاده شده است. سناریوی تزریق راکتیویته مثبت ۰,۹ دلار بدون شرط خاموشی با استفاده از کد [۴] PARET و مدل عددی پیشنهادی بررسی شده است. شکل ۱-الف منحنی تغییرات دمای سوخت، غلاف و خنک کننده را با استفاده از مدل نمایش می دهد. شکل ۱-ب همین نتایج را با استفاده از کد PARET نمایش می دهد. نتایج حاصل از مدل عددی تقریباً نتایج مشابهی با نتایج حاصل از کد PARET دارد. مورد دیگری که توسط مدل پیشنهادی بررسی شده است، تزریق راکتیویته پله ای ۱,۵ دلار بدون شرط خاموشی می باشد. شکل ۲-الف دماهای سوخت، غلاف و خنک کننده در کانال داغ را در مدل عددی نمایش می دهد. شکل ۲-ب دمای سوخت کانال داغ را مقایسه می کند. حداکثر دمای پیش بینی شده سوخت در مدل عددی بالاتر از مدل PARET می باشد. شکل ۲-ج توان راکتور در اثر تزریق راکتیویته ۱,۵ دلار پله ای را نشان می دهد. مدل عددی توان قله ای بیشتری را پیش بینی می کند.

19 th Iranian's Nuclear Conference



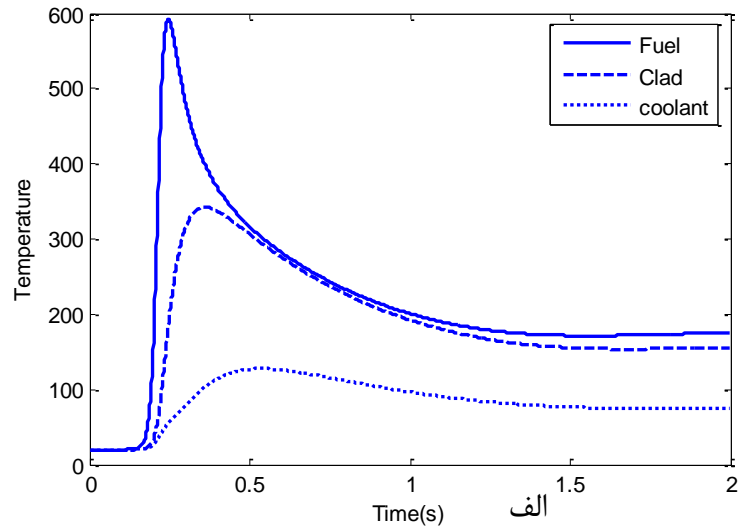
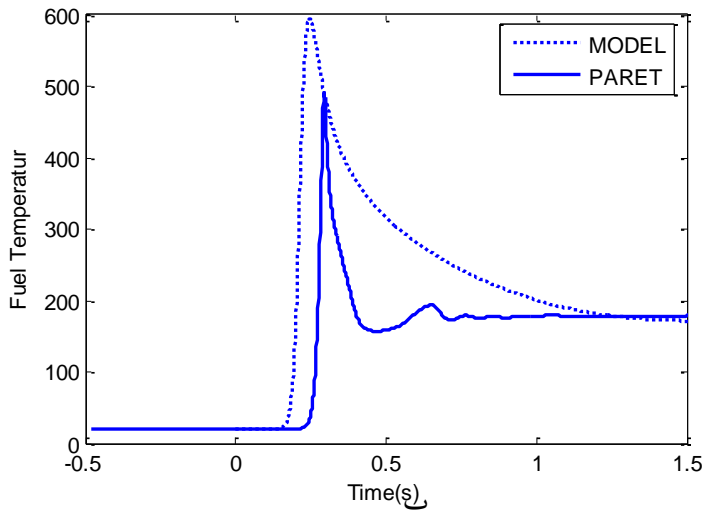
(ب)



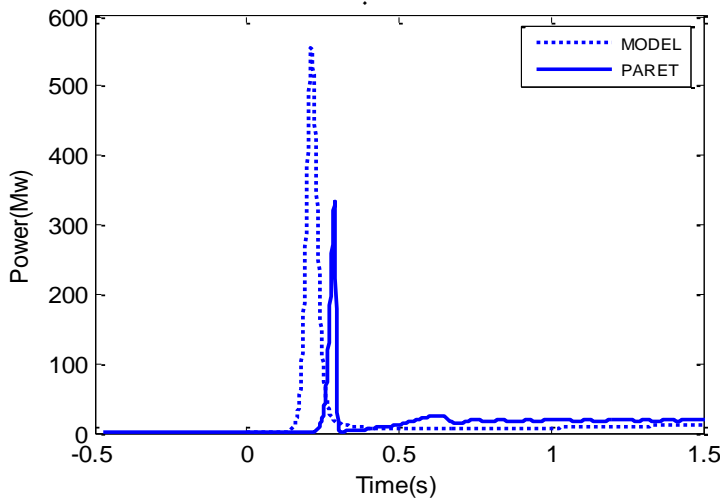
(الف)

شکل ۱- تزریق راکتیویته پله ای ۰,۹ دلار با توان اولیه ۱ میلی وات و بدون شرط خاموشی راکتور الف) دماهای پیش

بینی شده در مدل عددی ب) دماهای پیش بینی شده در مدل PARET



الف



ج

شکل ۲- شکل ۱- تزریق راکتیویته پله ای ۱,۵ دلار

با توان اولیه ۱mW و بدون شرط خاموشی راکتور

الف) دماهای پیش بینی شده در مدل عددی

ب) مقایسه دمای سوخت

ج) مقایسه توان ها

بحث و نتیجه گیری :

مدل ارایه شده در این مقاله، رفتارهای گذرای راکتور تهران را به سادگی پیش بینی می کند. بررسی نتایج حاصل از این کد در مورد تزریق راکتیویته های پله ای، نشان می دهد که به ازای تزریق راکتیویته های پایین همخوانی خوبی بین نتایج حاصل از این روش با کد PARET وجود دارد. ولی برای تزریق راکتیویته بالا مدل پیشنهادی مقادیر عددی بیشتری نسبت به نتایج کد PARET پیش بینی می کند. دلیل این رفتار به محدودیت های این کد برمی گردد. این کد بدلیل سادگی فقط جریان یک فازی را مدل می کند و اثر تولید بخار را در نظر نمی گیرد، در نتیجه تزریق راکتیویته های بالایی که منجر به تولید جریان دوفازی و ایجاد بخار در راکتور شود توسط این مدل جواب مناسبی داده نمی شود. دلیل متفاوت بودن نتایج در تزریق آنی ۱,۵ دلار به این موضوع بر می گردد. بنابراین روش عددی پیشنهادی بیشتر برای توصیف کیفی رفتارهای گذرا در تزریق راکتیویته هایی که منجر به جوشش خنک کننده نشود بسیار مفید است.

مراجع :

- [۱] Matthew Kinard, E.J. Allen*. Efficient numerical solution of the point kinetics equations in nuclear reactor dynamics. Annals of Nuclear Energy ۳۱ (۲۰۰۴) ۱۰۳۹-۱۰۵۱
- [۲] Hetrick, David, L., ۱۹۷۲. Dynamics of nuclear reactors.
- [۳] Housiadas, C., ۲۰۰۲. Lumped Parameters analysis of coupled kinetics and thermal-hydraulics for small reactors. Annals of nuclear energy ۲۹, ۱۳۱۵-۱۳۲۵
- [۴] Woodruff, W.L., ۱۹۸۳. A Kinetics and Thermal Hydraulics Capability for the Analysis for Research Reactor. ANL