



## تحلیل تجربی و عددی رفتارهای گذرای رآکتور تحقیقاتی تهران

احمد لشکری، حسین خلفی\*، حسین کاظمی نژاد، صمد خاکشورنیا، ارسلان عزتی، مهدی کیوانی، اشکان حسنی رخ  
پژوهشکده‌ی رآکتور، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

**چکیده:** با استفاده از یک مدل عددی، رفتار گذرای ناشی از تزریق واکنش‌پذیری‌های مثبت و کاهش جریان خنک‌کنندگی رآکتور تهران بررسی و نتیجه‌های آن با داده‌های تجربی و کد PARET مقایسه شد. بخش نوترونیک مدل با استفاده از روش ویژه-مقدار، که در آن پارامترهای وابسته به زمان معادله‌های سینتیک نوترون در بازه‌های زمانی کوچک ثابت فرض می‌شود، و بخش ترموهیدرولیک مدل با استفاده از مدل توده‌ای حل شد. محدودیت استفاده از این مدل نرسیدن دمای خنک‌کننده به دمای اشباع و باقی ماندن خنک‌کننده در فاز مایع است. مقایسه‌ی یافته‌ها نشان داد که هم‌خوانی خوبی بین داده‌های تجربی و نتیجه‌های حاصل از کد برقرار است. هدف اصلی این مطالعه به کارگیری روش‌های ساده‌ی محاسباتی و اعتبارسنجی آن با استفاده از داده‌های تجربی بود. استفاده از چنین مدل‌هایی توسط گروه بهره‌برداری رآکتور برای پیش‌بینی کیفی رفتارهای گذرای رآکتور و نیز مقاصد آموزشی بسیار مفید است.

**کلیدواژه‌ها:** رآکتور تحقیقاتی تهران، ترموهیدرولیک، تزریق واکنش‌پذیری، کاهش جریان خنک‌کنندگی

## Experimental and numerical transient analysis of Tehran Research Reactor (TRR)

A. Lashkari, H. Khalafi\*, H. Kazeminejad, S. Khakshourniya, A. Ezzati, M. Keyvani, A. Hosnirokh  
Reactor Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

**Abstract:** In this paper, a numerical model is presented to analyze a series of reactivity insertion and loss of flow transients in TRR. The model predictions are compared with the experimental data and PARET code results. The model uses the piecewise constant method and the lumped parameter methods for the coupled point kinetics and thermal-hydraulics modules, respectively. The advantages of the piecewise constant method are simplicity, efficiency and accuracy. A main criterion for the applicability range of this model is that the exit coolant temperature remains below the saturation temperature, i.e. no bulk boiling occurs in the core. The calculated values of power and coolant temperature, in both positive reactivity insertion and loss of flow scenario's, are in good agreement with the experiment values. However, the model is a useful tool for the transient analyses of most researches encountered in reactors in practice. The main objective of this work is using simple calculation methods and benchmarking them with the experimental data. This model can also be used for training purposes.

**Keywords:** Tehran research reactor, Thermal-hydraulic, Reactivity insertion, Loss of flow



## ۱. مقدمه

رآکتورهای تحقیقاتی به دلیل استفاده‌های وسیع در زمینه‌های علمی، صنعتی و کاربردهای پزشکی، دارای نقش مهمی در حوضه‌های علوم هسته‌ای و فن‌آوری هستند. هدف رآکتورهای تحقیقاتی داشتن شار نوترونی بالا در محل تابش‌دهی است. این رآکتورها علاوه بر شرط شار بالا، باید الزام‌های ایمنی را نیز برآورده کنند. استفاده از کدهایی که برای تحلیل ایمنی رآکتورهای قدرت به کار برده می‌شود، به دلیل پیچیدگی‌های آن‌ها، برای رآکتورهای تحقیقاتی توصیه نمی‌شود [۱]. به کارگیری اغلب این کدها، نیاز به تلاش و مهارت زیاد برای تهیهی ورودی و هم‌چنین تحلیل خروجی دارد؛ این عمل برای کارگردان‌های رآکتورهای تحقیقاتی کوچک سخت است، چرا که کارگردان‌ها مجبورند برای هر تغییر کوچک در آرایش قلب رآکتور، محاسبات مربوط به تحلیل ایمنی را دوباره انجام دهند. در حالی که می‌توان با تقریب‌های مناسبی معادله‌ها را برای این گونه رآکتورها به سادگی حل کرده و کد مخصوص این رآکتورها را تولید نمود. اگرچه برخی از این کدها برای استفاده شدن در رآکتورهای تحقیقاتی سازگار شده‌اند [۲، ۳] با این حال توسعهی روش‌های ساده برای تحلیل رفتارهای گذرای رآکتور بدون نیاز به شبیه‌سازی کامل آن بسیار مطلوب است. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی در این راستا انجام شده است [۴، ۵]. هدف اصلی این پژوهش، تهیهی یک مدل عددی برای تحلیل رفتارهای گذرای ناشی از تزریق واکنش‌پذیری و کاهش جریان خنک‌کنندگی رآکتور تهران بود.

## ۲. روش کار

مدل عددی پیشنهادی مانند هر کد دینامیکی استفاده شده برای تحلیل رفتارهای گذرای یک رآکتور هسته‌ای از سه بخش نوترونیک، ترموهیدرولیک و محاسبه‌ی بازخوردها تشکیل شده است. در بخش نوترونیک، معادله‌های مربوط به تولید توان حل و با استفاده از توان به دست آمده، دماهای مربوط به سوخت، غلاف و خنک‌کننده در بخش ترموهیدرولیک محاسبه می‌شود. افزایش یا کاهش دما باعث تغییر آهنگ واکنش‌های مربوط به تولید توان می‌شود. بازخوردهای دمایی، سهم هر یک از

مؤلفه‌های قلب رآکتور (سوخت، خنک‌کننده) را محاسبه و به بخش نوترونیک واگذار می‌کند.

### ۱.۲ مدل سینتیک نوترون

محاسبه‌ی دقیق توان تولید شده در قلب هر رآکتور هسته‌ای مستلزم حل معادله‌های نوترونیک وابسته به مکان و زمان است. از آنجایی که در نظر گرفتن توأم وابستگی زمانی و مکانی بسیار پیچیده است، از تقریب سینتیک نقطه‌ای برای حل معادله‌های دینامیک استفاده می‌شود. تقریب سینتیک نقطه‌ای راه حل مناسب و سریع برای محاسبه‌ی توان رآکتورهایی است که قلب کوچکی دارند [۶]. معادله‌های سینتیک نقطه‌ای به روش‌های متفاوتی قابل حل است و در اکثر مواقع از روش رانجو-گوتای اصلاح شده استفاده می‌شود [۷]. اما در کد مورد بحث از مدل ریاضی که در سال ۲۰۰۴ توسط کینارد [۸] برای حل معادله‌های دینامیک رآکتور پیشنهاد شد، استفاده شده است.

روش ثابت تکه‌ای<sup>(۱)</sup> (PCM) به این صورت است که معادله‌های دینامیک نوترون، در یک بازه‌ی زمانی کوچک  $h$  بین زمان‌های  $t$  و  $t+h$  مستقل از زمان فرض شده و مقدارهای متوسط آن‌ها در زمان  $t+h/2$  به عنوان مقدار ثابت در این بازه در نظر گرفته می‌شود. معادله‌ها به روش ویژه-مقدار حل می‌شوند که منجر به ریشه‌یابی معادله‌ی بی‌زمان<sup>(۲)</sup> شده و با استفاده از این ریشه‌ها، ویژه-بردارها ساخته و در نهایت جواب‌های مسأله به دست می‌آید. شرایط اولیه‌ی حل معادله‌های سینتیک در این مدل به صورت تعادلی در نظر گرفته شده است، که در آن تغییرهای زمانی چگالی مولدهای نوترون‌های تأخیری صفر در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار Matlab این روش در حالت شش گروه‌ی پیاده‌سازی شد. اگر جمله‌های مربوط به چشمه‌ی نوترون و واکنش‌پذیری تابع آرامی از زمان باشد، روش ثابت تکه‌ای با انتخاب بازه‌های زمانی بزرگ نیز جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌دهد [۸]. البته اگر وابستگی به زمان در این جمله‌ها شدید باشد می‌توان با انتخاب بازه‌های زمانی کوچک (در حدود میلی‌ثانیه) نتیجه‌های دقیقی به دست آورد. بنابراین ساده بودن و دقیق بودن نتیجه‌ها از ویژگی‌های اصلی این روش است؛ این مزیت باعث سهولت در برنامه‌نویسی کامپیوتری نیز می‌شود. از مزیت‌های دیگر این روش، سادگی در هم‌بسته کردن معادله‌های دینامیکی با



تنها برای یک دمای مؤثر برای هر یک از ناحیه‌های سوخت، غلاف و خنک‌کننده به کار می‌رود. از دماهای محاسبه شده در کانال متوسط برای محاسبه‌ی بازخوردهای دمایی<sup>(۴)</sup> استفاده می‌شود. برای محاسبه‌ی حداکثر دماها در کانال داغ، باید ضریب‌های مربوط به عامل مهندسی<sup>(۵)</sup> و عامل قله‌ی توان شعاعی<sup>(۶)</sup> را در توان متوسط ضرب کرد. وابستگی دما به مکان به صورت ایستا و معمولاً به صورت کسینوسی در نظر گرفته می‌شود. در این مرحله عامل قله‌ی توان محوری<sup>(۷)</sup> نیز به کار گرفته می‌شود. این مدل به دلیل سادگی الگوریتم حل عددی و قابل قبول بودن دقت نتیجه‌های حاصل از آن اقتصادی به نظر می‌رسد. در این مدل، رآکتور تحقیقاتی تست مواد<sup>(۸)</sup> (MTR) تهران که به وسیله‌ی آب سبک خنک می‌شود برای مطالعه انتخاب شد. در این مدل از رابطه‌ی دیتوس باتلر<sup>(۹)</sup> به عنوان ضریب انتقال حرارتی غلاف به خنک‌کننده در جریان‌های آشفته استفاده شد. دمای استخر یا دمای ورودی کانال خنک‌کننده به عنوان یک پارامتر ثابت در نظر گرفته شد، ولی این پارامتر نیز می‌تواند متغیر باشد. در این مدل تغییرات چگالی خنک‌کننده بر حسب دما به صورت یک رابطه‌ی خطی در نظر گرفته شد. مدل عددی ارایه شده تنها به حل معادله‌ی موازنه‌ی انرژی می‌پردازد. معادله‌های وابسته به زمان و مکان مربوط به ناحیه‌های سوخت، غلاف و خنک‌کننده‌ی رآکتورهای تست مواد در مرجع شماره ۴ آورده شده است. توان موضعی دارای شکل کسینوسی در راستای محور است که شامل عامل‌های قله‌ی توان محوری و شعاعی نیز است [۴]. گرما از سطح غلاف از طریق روش هم‌رفتی به خنک‌کننده منتقل می‌شود. برای ضریب هم‌رفت گرمایی برای خنک‌کنندگی اجباری در روند زیرسرد<sup>(۱۰)</sup> از رابطه‌ی سیدر-تیت<sup>(۱۱)</sup> یا دیتوس باتلر [۱۰] استفاده شد.

به هر یک از ناحیه‌های سوخت، غلاف و خنک‌کننده یک دمای میانگین نسبت داده شد و از مدل توده‌ای برای به دست آوردن دماهای میانگین استفاده شد. در این معادله‌ها، دمای ورودی خنک‌کننده به عنوان پارامتر ثابت در نظر گرفته شد. در مواقعی مانند خاموش بودن پمپ مدار خنک‌کننده‌ی ثانویه، دمای ورودی قلب، دیگر ثابت نبوده و با زمان تغییر می‌کند. در این موارد معادله‌ی موازنه‌ی انرژی بین توان تولیدی رآکتور و افزایش دمای آب استخر به معادله‌های فوق افزوده

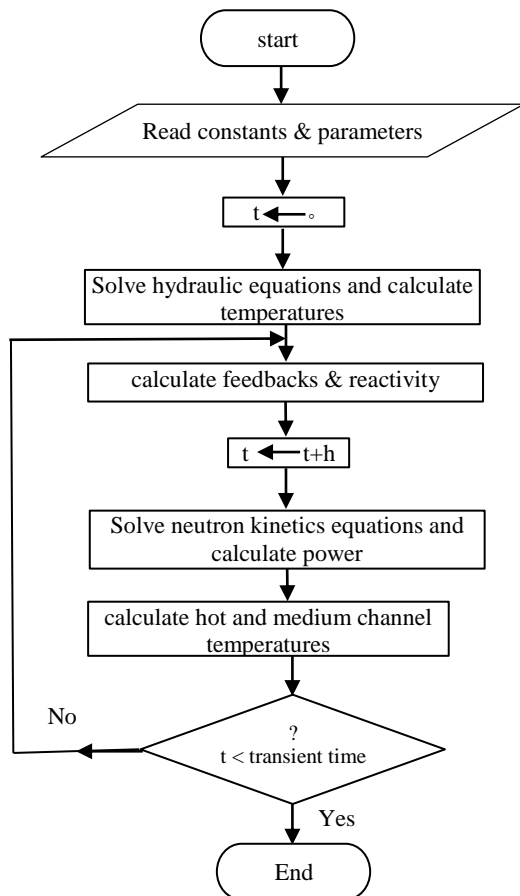
معادله‌های وابسته به زمان ترموهیدرولیکی است. در این معادله‌ها نیز وابستگی زمانی به صورت بازه‌های زمانی متوالی در نظر گرفته می‌شود که هر دو مجموعه از معادله‌ها می‌توانند بازه‌های زمانی مشترک داشته باشند. برای اطمینان از جواب‌های بخش نوترونیک این مدل، نتیجه‌های مربوط به واکنش‌پذیری نوسانی ذکر شده در کتاب هتریک به عنوان مرجع، برای رآکتوری با مشخصه‌های ثبت شده در جدول ۱ به دست آورده شد [۶]. تغییرات چگالی نوترون در حالت دو گروهی در مدت ۱۰۰ ثانیه با بازه‌ی زمانی یک ثانیه محاسبه شد. معیار این اعتبارسنجی، سنجش حداکثر چگالی نوترون در این بازه‌ی زمانی است. جواب دقیق (حداکثر چگالی نوترون) برای این مسأله در حدود ۲۵، ۴۹ نوترون بر واحد حجم است که روش ثابت تکه‌ای مقدار آن را با بازه‌ی نسبتاً بزرگ ۱ ثانیه، برابر ۵۰ نوترون بر واحد حجم محاسبه می‌کند که هم‌خوانی خوبی با جواب مرجع دارد. با انتخاب بازه‌ی زمانی  $h$  در حدود میلی‌ثانیه، روش ثابت تکه‌ای نیز همان جواب را خواهد داد. بدیهی است هر قدر بازه‌ی زمانی کوچک‌تر انتخاب شود جواب‌ها از دقت بالایی برخوردار خواهند شد. درصد خطای محاسبه‌ی توان رآکتور در روش ثابت تکه‌ای متناسب با  $h^2$  است [۸].

## ۲.۲ مدل ترموهیدرولیک

در بخش ترموهیدرولیک این کد از مدل توده‌ای<sup>(۳)</sup> بهره گرفته شده است. از این مدل عموماً برای مطالعه‌ی کیفی دینامیک رآکتور استفاده می‌شود. در این مدل از قانون سرمایش نیوتن برای انتقال حرارت از غلاف به خنک‌کننده استفاده می‌شود [۹]. در بخش ترموهیدرولیک، شبیه‌سازی‌ها براساس مدل دوکانالی در نظر گرفته شده است. کانال داغ نماینده‌ی داغ‌ترین صفحه‌ی سوخت به همراه کانال خنک‌کننده‌ی مجاورش است و کانال متوسط نماینده‌ی کل قلب رآکتور است. در این مدل اثرات دما،

**جدول ۱.** مشخصه‌های رآکتور و پارامترهای مربوط به تزریق نوسانی واکنش‌پذیری

واکنش‌پذیری نوسانی	طول عمر نوترون‌های ثابت واپاشی	آبی ( $\lambda$ )	کسر نوترون‌های تأخیری ( $\beta$ )
$\sin(\pi t/50)$	نوترون‌های تأخیری ( $\lambda$ )	۰،۰۱۶	۰،۰۰۷۹
۰،۰۰۵۳۳	۰،۰۷۷ $s^{-1}$		



شکل ۱. روندنمای محاسبه‌های مدل عددی پیشنهاد شده.

محاسبه‌ی واکنش‌پذیری برگردانده می‌شوند تا برای گام بعدی محاسبه، اثر بازخوردهای دمایی لحاظ شود. محاسبه، برای زمانی که استفاده‌کننده در اول برنامه مشخص کرده است، ادامه پیدا می‌کند. استفاده از این مدل عددی به دو موضوع اساسی محدود می‌شود که توسط مدل توده‌ای اعمال می‌شود. محدودیت اول این که در مسایل گذرا، زمان اختلال نباید کم‌تر از ثابت زمانی مربوط به آن ناحیه باشد وگرنه این مدل پاسخ‌های درستی نمی‌دهد. ثابت زمانی به صورت  $\tau = \frac{cm}{hA}$  تعریف می‌شود که در آن  $m$  جرم توده و  $A$  سطح خنک‌کنندگی مربوط به ناحیه است. استفاده از مدل توده‌ای برای ناحیه‌هایی که ثابت زمانی کوچکی داشته باشند بسیار مؤثر است. بنابراین در مسأله‌ی مورد بحث ما شرط زمانی برقرار است، فاصله‌ی زمانی افزایش توان، که از حل معادله‌های سینتیک نوترون دیکته می‌شود، باید بزرگ‌تر از ثابت زمانی ناحیه‌های مورد نظر باشد. فاصله‌ی زمانی رآکتور متناسب با عکس میزان تزریق واکنش‌پذیری است. بنابراین مدل قادر به پیشگویی رفتارهای گذرای است که در آن‌ها تزریق واکنش‌پذیری به اندازه‌ای باشد که فاصله‌ی زمانی کوچک‌تر از

می‌شود. با دانستن دماهای میانگین (توده‌ای) وابستگی مکانی و توزیع محوری دما در سوخت، غلاف و خنک‌کننده و نیز در مکانی از محور طولی کانال که در آن دمای سوخت، غلاف و خنک‌کننده بیشینه است، قابل محاسبه است [۴].

### ۳.۲ مدل واکنش‌پذیری

مدل واکنش‌پذیری کل شامل واکنش‌پذیری خارجی تزریق شده و واکنش‌پذیری ناشی از بازخوردهای دمایی است. واکنش‌پذیری خارجی تزریق شده، در مقیاس زمانی می‌تواند به صورت پله‌ای یا شیب‌دار باشد

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

که در آن،  $\Delta T_c$ ،  $\Delta T_f$  به ترتیب، تغییرات دمای سوخت و خنک‌کننده در کانال متوسط، و  $\Delta \rho_{pc}$  تغییرات چگالی خنک‌کننده در اثر تغییر دمای خنک‌کننده؛  $\alpha_c$ ،  $\alpha_f$  و  $\alpha_{pc}$  به ترتیب، ضریب‌های بازخوردهای دمایی متوسط سوخت، خنک‌کننده و تغییر چگالی خنک‌کننده‌اند.

ضریب‌های واکنش‌پذیری دمایی مقدار ثابتی نداشته و تابع دما هستند. در مدل عددی امکان هر گونه وابستگی واکنش‌پذیری به دما وجود دارد. در مطالعه‌ی حاضر، ضریب‌های واکنش‌پذیری به صورت تابعی خطی از دما در نظر گرفته شدند.

### ۴.۲ روندنمای محاسبات

روندنمای محاسبات مدل عددی در شکل ۱ نمایش داده شده است. مقدارهای ثابت و پارامترهای ورودی مانند دمای استخر و توان اولیه در ورودی برنامه داده می‌شود. در مرحله‌ی اول، مدل با توجه به شرایط اولیه، دماهای متوسط سوخت، غلاف و خنک‌کننده را محاسبه می‌کند. این دماها به بخش محاسبه‌ی واکنش‌پذیری واگذار می‌شوند. در زمان شروع، هیچ‌گونه بازخورد دمایی وجود ندارد. مدل واکنش‌پذیری در گام بعدی مقدار اولیه‌ی واکنش‌پذیری تزریقی را به بخش نوترونیک واگذار می‌کند. بخش نوترونیک با توجه به شرایط و مقدار اولیه‌ی واکنش‌پذیری تزریقی، توان را محاسبه می‌کند. توان محاسبه شده به بخش ترموهیدرولیک واگذار می‌شود و دماهای میانگین و داغ به ترتیب، در کانال‌های متوسط و داغ محاسبه می‌شود. دماهای سوخت و خنک‌کننده‌ی کانال متوسط به بخش

**جدول ۲.** پارامترهای سینتیک و ضریب‌های واکنش‌پذیری آرایش قلب‌های

مرجع	
ضریب‌های واکنش‌پذیری دمایی	
ضریب واکنش‌پذیری دمایی سوخت $\alpha_{T, f}$ [pcm/°C] (۲۰-۳۴۰ °C)	-۱,۱۷۵ تا -۱,۱۷۵
ضریب‌های واکنش‌پذیری دمایی کندساز $\alpha_{T, m}$ [pcm/°C] (۲۰-۱۱۴ °C)	
ضریب واکنش‌پذیری دمایی کندساز $\alpha_{T, m}$	-۸,۸۹ تا -۸,۵۳
ضریب واکنش‌پذیری چگالی کندساز $\alpha_{D, m}$	-۵,۰۰ تا -۱۷,۰۰
ضریب واکنش‌پذیری خلأ $\alpha_v$ (۰-۴۰٪)	-۱۷۹ تا -۵۸۰
پارامترهای سینتیک	
کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری $\beta_{eff}$ (pcm)	۷۶۹
طول عمر نوترون‌های آبی $\Lambda$ (μs)	۵۵

**۳. یافته‌ها و بحث****۱.۳ برنامه‌ی تزریق واکنش‌پذیری**

دو برنامه‌ی تزریق واکنش‌پذیری با نرخ تزریق  $0.2 \text{ s}^{-1}$  و  $0.3 \text{ s}^{-1}$  آزموده شد. در این برنامه‌ها توان اولیه‌ی رآکتور  $1 \text{ kW}$  و تزریق واکنش‌پذیری مثبت با خارج‌سازی جاذب بور کاربرد موقعیت  $B_2$  به انجام رسید. مقدار واکنش‌پذیری جاذب با استفاده از زمان دو برابر شدن توان رآکتور تعیین شد. شرط خاموشی رآکتور در  $110$  درصد قدرت برقرار بود. مقدارهای مربوط به توان و دماهای ورودی و خروجی خنک‌کننده در بازه‌های زمانی  $20 \text{ s}$  ثبت شد. در این آزمایش، رآکتور در توان  $5.5 \text{ MW}$  دستور خاموشی گرفت.

**۱.۱.۳ برنامه‌ی اول**

در برنامه‌ی اول، تزریق واکنش‌پذیری مثبت با نرخ  $0.2 \text{ s}^{-1}$  با استفاده از کد PARET و مدل عددی شبیه‌سازی شد. در شکل ۲ تغییرات توان و دمای خنک‌کننده‌ی رآکتور در برنامه‌ی اول تزریق واکنش‌پذیری نمایش داده شده است. نتیجه‌های تجربی توان، مربوط به توان‌های یادداشت شده از طریق کانال خطی  $CIC^{(12)}$  است. پارامتر قابل مقایسه در منحنی توان، زمان رسیدن به توان بیشینه است. مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار در این فرایند، میزان تزریق واکنش‌پذیری است. هر اندازه میزان تزریق واکنش‌پذیری زیاد باشد زمان رسیدن به توان بیشینه به همان اندازه کوتاه‌تر است. نقطه‌ی اشتراک مطالعه‌ی تجربی و عددی میزان تزریق واکنش‌پذیری است. مقدار واکنش‌پذیری تزریقی با استفاده از زمان دو برابر شدن توان در معادله‌ی شش گروهی بی‌زمان شده محاسبه شد. با در نظر گرفتن خطای اندازه‌گیری حدود  $50 \text{ pcm}$  در مقدار واکنش‌پذیری، تزریق واکنش‌پذیری حدود  $0.06 \text{ s}^{-1}$  خطا داشت.

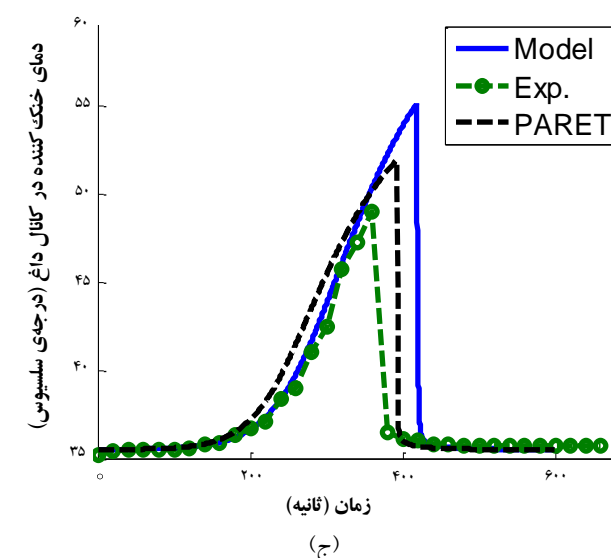
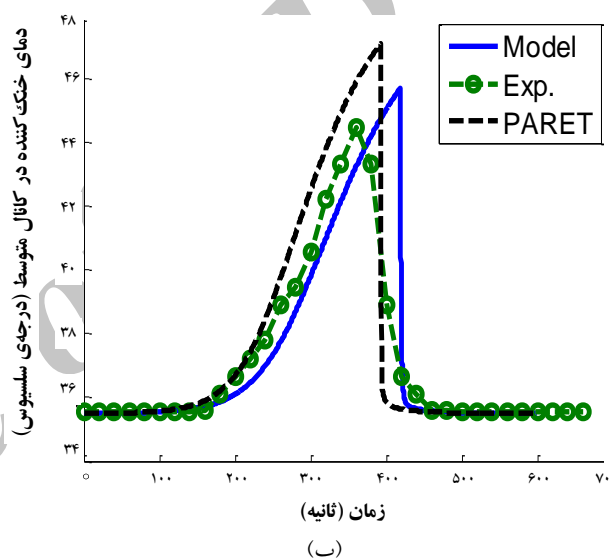
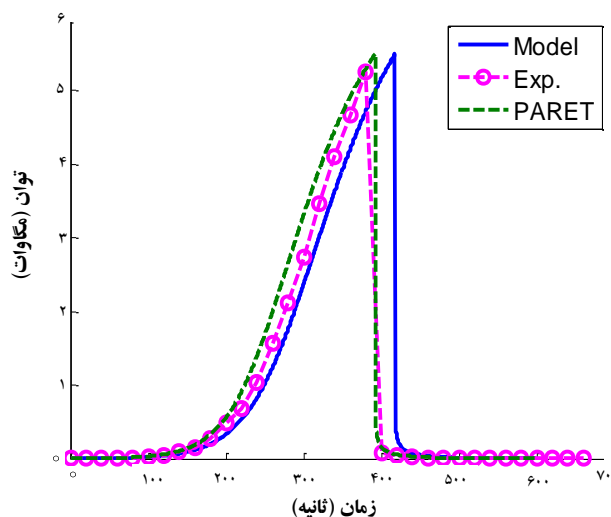
ثابت زمانی نباشد. محدودیت دوم این است که در تمام مدت رفتار گذرای رآکتور، مانند تزریق واکنش‌پذیری و کاهش جریان خنک‌کنندگی، دمای خنک‌کننده نباید به دمای اشباع برسد. بنابراین درستی نتیجه‌های مدل عددی تا زمانی که لایه‌ی بخار تشکیل نشده باشد قابل اعتماد است.

**۵.۲ روش پژوهش**

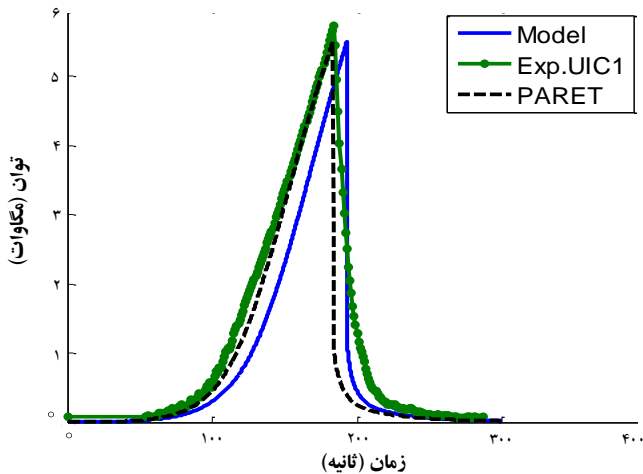
رآکتور تحقیقاتی تهران از نوع استخری است که در آن آب سبک نقش خنک‌کننده، کندساز و بازتاباننده را دارد. رآکتور تهران برای تولید شار نوترونی در حداکثر توان  $5 \text{ MW}$  طراحی شده است. قلب مرجع رآکتور تهران با تعداد  $28$  مجتمع سوخت استاندارد و  $5$  مجتمع کنترل با استفاده از مدل عددی مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای نوترونیک مورد نیاز برای اجرای مدل عددی و کد PARET در جدول ۲ درج شده است. ضریب‌های واکنش‌پذیری و پارامترهای سینتیک قلب مرجع با استفاده از کدهای نوترونیک CITVAP, WIMS-5D و BORGES به دست آمدند. روش‌های محاسبه‌ی ضریب‌های واکنش‌پذیری و پارامترهای سینتیک با یکدیگر متفاوت است و به ترتیب، شبیه به روش‌هایی است که دقیقاً در مراجع [۱۱] و [۱۲] آورده شده‌اند. در این پژوهش علاوه بر مدل عددی، کد PARET نیز برای شبیه‌سازی یافته‌های آزمایش‌ها استفاده شد. هدف اصلی، مقایسه‌ی نتیجه‌های مدل عددی با نتیجه‌های کد PARET و یافته‌های تجربی، اعتبار بخشیدن به این گونه مدل‌های ساده بود که امروزه برای رآکتورهای تحقیقاتی تهیه می‌شوند. پارامترهای تجربی و عددی که در بخش تزریق واکنش‌پذیری با یکدیگر مقایسه شدند شامل توان رآکتور، دمای متوسط و بیشینه‌ی خنک‌کننده (آب) در خروجی قلب بود. در شرایط عادی امکان اندازه‌گیری دمای خروجی آب در تک کانال داغ وجود ندارد ولی با تقریب قابل قبولی می‌توان دمای خروجی آب در ناحیه‌ی داغ قلب را تعیین کرد. برای اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی قلب رآکتور در ناحیه‌ی میانی (دمای بیشینه) از یک ترموکوپل نوع K استفاده شد. دو عدد از این نوع ترموکوپل دقیقاً در بالا و پایین محل تابش دهی ( $D_6$ ) در نزدیکی مرکز قلب رآکتور نصب شد. دماسنج‌های مربوط به خود رآکتور در فاصله‌های زیادی نسبت به قلب نصب شده بودند به طوری که دماسنج خروجی دقیقاً دمای متوسط خروجی قلب را نمایش می‌داد.



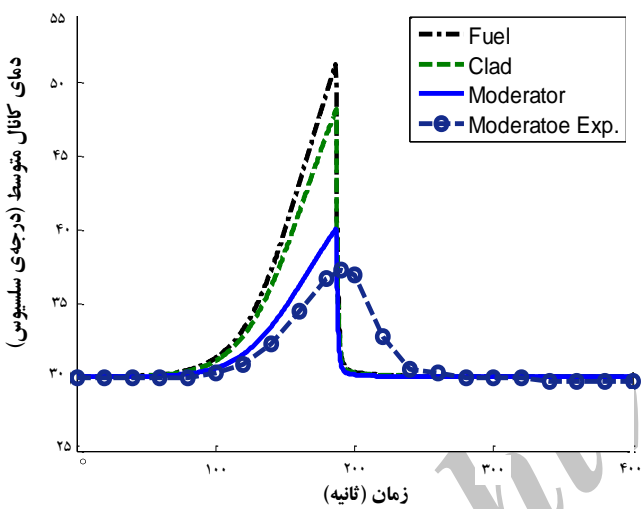
بنابراین مقدار عددی واکنش پذیری مثبت در ورودی کد PARET و مدل عددی در حدود ۶٪ نایقینی دارد. با توجه به نقش بسیار مهم مقدار واکنش پذیری تزریقی، این موضوع می تواند عمده ترین دلیل تفاوت یافته های تجربی با نتیجه های عددی باشد. نکته ی مهم دیگر مقایسه ی نتیجه های مدل عددی با کد PARET است. همان گونه که منحنی توان نشان می دهد به ازای یک واکنش پذیری تزریقی مشخص، کد PARET زودتر از مدل عددی به توان بیش تری می رسد. به عبارت دیگر مقادیر توان و دمای بیش تری را نسبت به مدل عددی پیش بینی می کند. این اختلاف، ارتباطی به خطای اندازه گیری واکنش پذیری و توان ندارد. وجود اختلاف بین نتیجه های دو مدل متفاوت در مورد یک برنامه بدیهی است. مدل PARET به مراتب دقیق تر بوده و مدل های محاسباتی آن کامل تر از مدل عددی پیشنهاد شده است. بخش نوترونیک دو کد یکسان بوده و هر دو از تقریب سینتیک نقطه ای استفاده می کنند. تفاوت های اصلی بین کد PARET و مدل عددی مورد بحث به ترمو هیدرولیک و نحوه ی حل معادله ها برمی گردد. کد PARET معادله های انرژی و سیال را به طور کامل حل می کند، در صورتی که مدل عددی پیشنهاد شده با استفاده از مدل توده ای، تنها معادله ی موازنه ی انرژی را حل می کند. در حالت کلی کد PARET و مدل عددی روند افزایش توان و دمای آب در کانال متوسط و داغ را درست، ولی بیش تر از مقادیرهای تجربی پیش بینی می کنند. شکل ۲ ج ۲ دماهای پیش بینی شده ی خنک کننده (آب) در کانال داغ را با دمای تجربی اندازه گیری شده به وسیله ی ترموکوپل مقایسه می کند. با توجه به این که ترموکوپل در موقعیت D6، نزدیک به مرکز قلب، نصب شده است می تواند به طور تقریبی نماینده ی رفتار دمایی خنک کننده (آب) در کانال داغ باشد. دلیل اصلی تفاوت بین دماهای خنک کننده در شبیه سازی ها با مقادیرهای تجربی به نحوه ی شبیه سازی ها مرتبط است. کد PARET و مدل عددی تنها قادر به شبیه سازی یک کانال متوسط (نماینده ی کل قلب) یا داغ اند. در عمل کانال های متعددی در قلب وجود دارد که در برخی از آن ها عملاً توانی تولید نمی شود. ضمناً همیشه بخشی از توان رآکتور (۵٪) در خنک کننده آزاد می شود که بخشی از آن (آب های کنار قلب) عملاً از قلب رآکتور عبور نمی کند در نتیجه



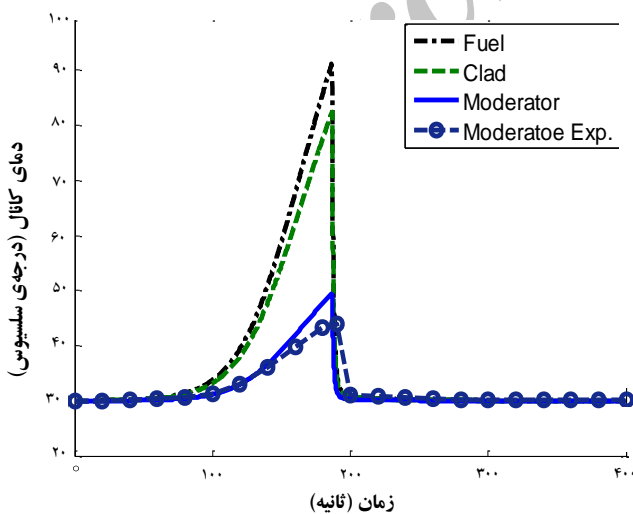
شکل ۲. تزریق واکنش پذیری مثبت با نرخ  $0.02 \text{ } s^{-1}$  مقایسه ی تغییرات (الف) توان؛ (ب) دمای خنک کننده در کانال متوسط؛ (ج) دمای خنک کننده در کانال داغ.



**شکل ۳.** مقایسه‌ی توان تجربی و پیش‌بینی شده به وسیله‌ی مدل‌های عددی در تزریق واکنش‌پذیری مثبت با نرخ  $0.3 \text{ } s^{-1}$ .



(الف)



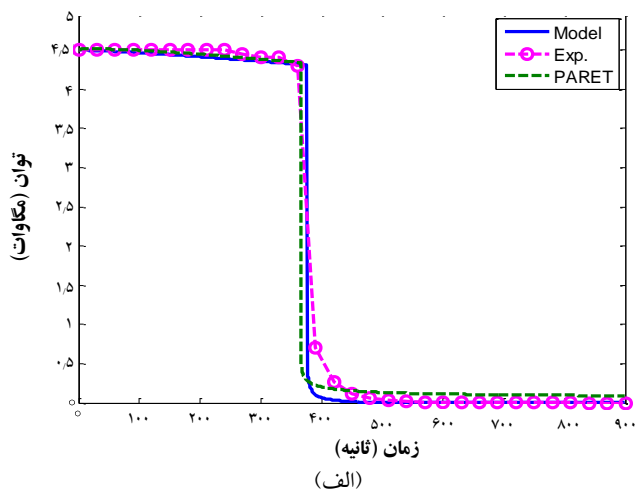
(ب)

**شکل ۴.** تغییرات دمای سوخت، غلاف و خنک‌کننده در تزریق واکنش‌پذیری مثبت با نرخ  $0.3 \text{ } s^{-1}$ . (الف) کانال متوسط؛ (ب) کانال داغ.

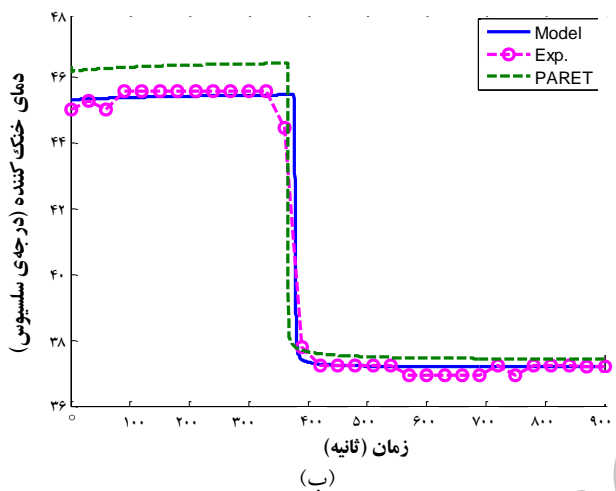
در فرایند برداشت گرما از کانال متوسط شرکت نمی‌کند. این مقدار گرما باعث گرم شدن سیال اطراف رآکتور می‌شود. بنابراین با استناد به دلایل فوق انتظار می‌رود دمای خنک‌کننده (آب) در خروجی قلب کم‌تر از مقدارهای عددی پیش‌بینی شده باشد. در مورد کانال داغ نیز باید توجه کرد که دمای تجربی اندازه‌گیری شده دمای متوسط ناحیه‌ی پر قدرت قلب و نه یک کانال داغ است. نکته‌ی دوم این که نتیجه‌های شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن شرایط محافظه‌کارانه و اعمال عامل‌های قله‌ی توان به دست آمده‌اند و مقدارهای بیش‌تری را پیش‌بینی می‌کنند.

### ۲.۱.۳ برنامه‌ی دوم

تزریق واکنش‌پذیری مثبت با نرخ  $0.3 \text{ } s^{-1}$  با شرایط برنامه‌ی اول تکرار شد. شکل ۳ توان تجربی رآکتور را که با استفاده از کانال UIC1<sup>(۱۳)</sup> در هر ثانیه اندازه‌گیری شده است، با توان‌های پیش‌بینی شده‌ی مدل‌های عددی مقایسه می‌کند. با توجه به این که سامانه‌ی ثبت داده‌های رآکتور توان را هر یک ثانیه اندازه‌گیری می‌کند، مقایسه‌ی توان رآکتور بعد از دست‌خاموشی به راحتی امکان‌پذیر است. با رسیدن توان رآکتور به حداکثر مقدار تعیین شده، فرمان خاموشی صادر شده و بعد از  $0.25 \text{ } s$  میله‌های کنترل پایین رفته و واکنش‌پذیری منفی متناسب با ارزش میله‌ها در مدت زمان حدود  $0.5 \text{ } s$  به رآکتور اعمال شد. همان‌گونه که تزریق واکنش‌پذیری مثبت (کم‌تر از  $1 \text{ } s$ ) باعث جهش آنی توان نمی‌شود، تزریق واکنش‌پذیری منفی نیز باعث خاموشی آنی رآکتور نمی‌شود بلکه با یک روند نمایی منفی توان شروع به کاهش می‌کند. مقایسه‌ی منحنی‌های توان نشان می‌دهد که یافته‌های تجربی با نتیجه‌های شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط کد PARET و مدل عددی توافق قابل قبولی دارد. شکل ۴ تغییرات دمای سوخت، غلاف و خنک‌کننده را در برنامه‌ی دوم تزریق واکنش‌پذیری نمایش می‌دهد که با استفاده از مدل عددی برای دو کانال متوسط و داغ پیش‌بینی شده‌اند. در هر دو کانال تنها یافته‌های تجربی دمای خنک‌کننده با نتیجه‌های عددی مقایسه شده است. در هر دو کانال مقدارهای تجربی کم‌تر از مقدارهای پیش‌بینی شده است. بخشی از این تفاوت به خطای محاسبات و اندازه‌گیری دما برمی‌گردد ولی بخش دیگر آن با توجه به توضیح‌های ذکر شده در برنامه‌ی اول مورد انتظار



(الف)



(ب)

شکل ۵. برنامه‌ی اول حادثه‌ی خرابی پمپ. تغییرات (الف) توان؛ (ب) دمای خنک‌کننده.

و توان رآکتور را کاهش می‌دهد. منحنی‌های دمای مربوط به خنک‌کننده برخلاف توان، افزایش محسوسی در خلال کاهش جریان نشان نمی‌دهند. دلیل این موضوع به پویایی توان رآکتور در طول حادثه برمی‌گردد. هم‌زمان با کاهش جریان، توان رآکتور نیز کاهش می‌یابد. هم‌زمانی این دو پدیده باعث می‌شود که دمای سیال تغییرهای چندانی نداشته باشد. نتیجه‌ی مهمی که از تحلیل این حادثه به دست می‌آید این است که اگر حالت عملکرد رآکتور در وضعیت غیرخودکار باشد توان رآکتور در اثر بازخوردهای دمایی کاهش یافته و دمای خنک‌کننده افزایش چندانی پیدا نمی‌کند که منجر به حادثه شود ولی اگر وضعیت رآکتور در حالتی باشد که به صورت خودکار توان خود را ثابت نگه دارد، دمای خنک‌کننده رفته‌رفته افزایش پیدا می‌کند و بازخورد دمایی حاصل نیز با تغییر موقعیت میله‌های کنترل جبران می‌شود و این وضعیت منجر به حادثه می‌شود.

است. دمای متوسط تجربی توسط دماسنجی اندازه‌گیری شده است که در فاصله‌ی دو متری از پایین قلب و نزدیک به شیر خروجی نصب شده است. در این فاصله خنک‌کننده تا حدودی توسط آب موجود در اطراف لوله خنک شده است. هم‌چنین در مورد دمای کانال داغ، ترموکوپل دمای بخش میانی قلب رآکتور را نمایش می‌دهد و دمای آن کم‌تر از داغ‌ترین کانال مورد انتظار است. نکته‌ی مهم در مقایسه‌ی یافته‌های تجربی با نتیجه‌های مدل‌سازی این است که مدل عددی قادر به پیشگویی درست رفتار دمای خنک‌کننده است و گرچه پیچیده‌ترین مدل‌های عددی به دلیل خطاهای موجود در شیوه‌ی حل معادله‌ها و رابطه‌های انتقال حرارت، قادر به پیش‌بینی دقیق نیستند. مطابق پیش‌بینی‌های انجام شده توسط مدل عددی، حداکثر دمای غلاف در کانال متوسط و داغ کم‌تر از به ترتیب، ۵۰ و ۹۰ °C است. بنابراین حداکثر دمای غلاف در این حادثه‌ی تزریق واکنش‌پذیری کم‌تر از مرجع آن (۱۰۵ °C) است.

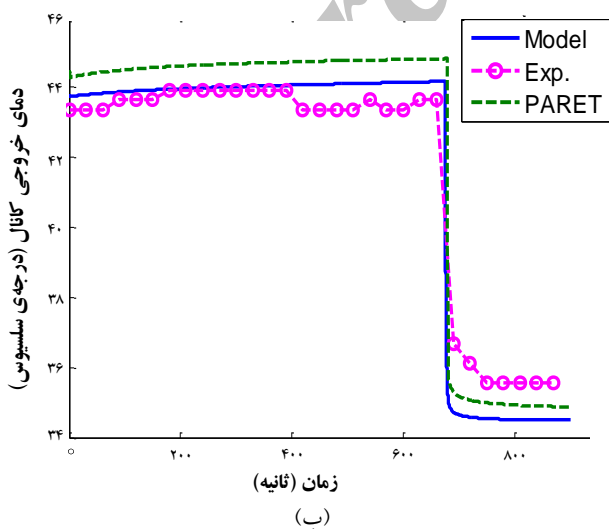
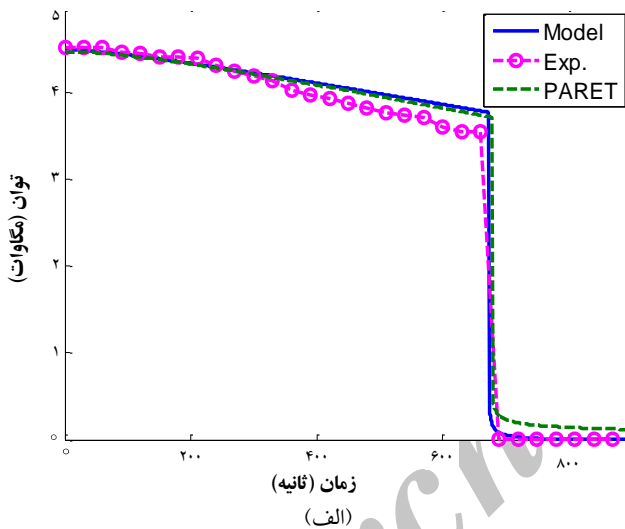
### ۲.۳ برنامه‌ی کاهش جریان خنک‌کننده<sup>(۱۴)</sup>

#### ۱.۲.۳ برنامه‌ی اول

در این بخش نیز دو برنامه مطالعه شد. در برنامه‌ی اول، رآکتور تهران با قلب مرجع با توان ثابت ۴/۵ MW در شرایط ایستا در حال کار بود که ناگهان پمپ مدار اول قطع شد. دستور خاموشی مربوط به پمپ عمل نکرده و رآکتور هم‌چنان با توان اولیه روشن بود. با پایین رفتن آب استخر و کاهش فشار ایستای آب بالای قلب، جریان در قلب کاهش یافت. با کاهش جریان خنک‌کنندگی دمای سیال آب بالا رفت. با کاهش سطح آب استخر و رسیدن به فاصله‌ی ۹۶ cm (۹۶٪ مقدار اولیه) رآکتور دستور خاموشی گرفت. در این آزمایش مقادیرهای مربوط به توان و دماهای ورودی و خروجی قلب همراه با مقدار جریان در بازه‌ی زمانی ۳۰ s ثبت شد. شکل ۵ تغییرات توان و دمای خنک‌کننده در این حادثه را نمایش می‌دهد. در این شکل نتیجه‌های شبیه‌سازی‌های PARET و مدل عددی با یافته‌های تجربی مقایسه شده است. منحنی‌های توان در این برنامه با توافق بسیار خوبی نشان می‌دهند که توان رآکتور با کاهش جریان خنک‌کننده، شروع به کاهش می‌کند. دلیل این رفتار افزایش دمای خنک‌کننده در اثر کاهش جریان است. افزایش دما در خنک‌کننده باعث افزایش دما در سوخت و غلاف نیز می‌شود و با گذشت زمان بازخوردهای دمایی وارد عمل شده



ورودی کانال خنک کننده را به عنوان یک پارامتر ثابت در نظر می‌گیرد و امکان تغییر آن وجود ندارد. برای مدل عددی ارایه شده، این امکان وجود دارد که دمای ورودی کانال متوسط تغییر کند. با استفاده از یک تقریب خطی، افزایش دمای ورودی قلب براساس نتیجه‌های تجربی افزایش دمای ورودی قلب در برنامه‌ی دوم خرابی پمپ مجدداً توسط مدل عددی شبیه‌سازی شد. شکل ۷ تغییرات توان رآکتور و دمای خروجی آب از قلب را نشان می‌دهد که در آن افزایش دمای ورودی خنک کننده منظور شده است. با این اصلاح، منحنی کاهش توان مربوط به مدل عددی، شیب بیش تری پیدا کرده و رفتاری شبیه به یافته‌های تجربی را پیش‌بینی می‌کند. هم‌چنین با متغیر گرفتن دمای ورودی قلب در مدل عددی، نتیجه‌های تجربی و عددی دمای خروجی آب از قلب، بعد از دستور خاموشی بر یک‌دیگر منطبق شدند.



شکل ۷. برنامه‌ی دوم حادثه‌ی خرابی پمپ. تغییرات (الف) توان؛ (ب) دمای خروجی کانال.

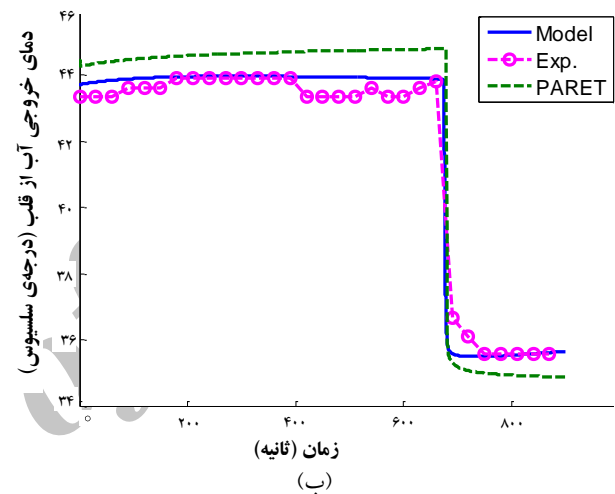
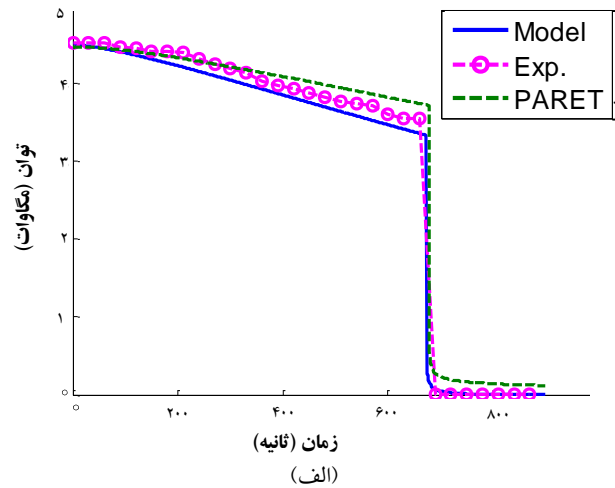
در برنامه‌ی دوم نیز رآکتور با توان ثابت ۴٫۵ MW در شرایط ایستا در حال کار بود. ناگهان پمپ مدار اول قطع شده، دستور خاموشی مربوط به پمپ عمل نکرده و رآکتور هم‌چنان با توان فوق روشن بود. با کاهش سطح آب استخر و رسیدن به فاصله‌ی ۹۶ سانتی متری رآکتور هم دستور خاموشی نگرفت. در این برنامه دستور خاموشی جریان در ۱۵۵۰ گالن بر دقیقه تنظیم شده بود. مقدار جریان اولیه در این آزمایش ۱۹۰۰ گالن بر دقیقه بود. در نتیجه رآکتور در ۸۰ درصد جریان اولیه دستور خاموشی گرفته است. سطح آب استخر در لحظه‌ی خاموشی رآکتور ۳٫۵ m پایین تر از سطح اولیه‌ی آب استخر بوده است. شکل ۶ تغییرات توان و دمای خروجی کانال متوسط برای برنامه‌ی دوم خرابی پمپ را نشان می‌دهد. تغییرات توان شبیه‌سازی شده توسط کد PARET و مدل عددی هم‌خوانی بسیار خوبی با یک‌دیگر دارند ولی شیب کاهش توان پیش‌بینی شده توسط آن‌ها کم‌تر از مقدار تجربی است. در مورد دمای خروجی کانال متوسط نیز کد PARET مقدارهای بیش تری پیش‌بینی می‌کند. ولی تفاوت دماها بین نتیجه‌های قبل از دستور خاموشی کمتر از ۱ °C بوده و در محدوده‌ی خطای اندازه‌گیری است. افزایش و کاهش دمای تجربی اندازه‌گیری شده در محدوده‌ی خطا بوده و توضیح فیزیکی ندارد. پدیده‌ی مهمی که در شکل ۶ دیده می‌شود، تفاوت رفتاری توان رآکتور قبل از دستور خاموشی و دمای خروجی قلب بعد از دستور خاموشی است. نتیجه‌های تجربی دمای خروجی کانال متوسط بیش تر از مقدارهای عددی پیش‌بینی شده‌ی آن است. با بررسی دقیق نتیجه‌های آزمایش متوجه می‌شویم که دمای خنک کننده در ورودی قلب با زمان افزایش پیدا کرده است. این افزایش دما در طول انجام آزمایش در حدود ۱٫۱ °C بوده است. این افزایش دما به دلیل طولانی بودن زمان آزمایش و کاهش مقدار آب بالای استخر است. با توجه به خرابی پمپ، آب خارج شده از قلب رآکتور به استخر برگشت داده نمی‌شود. در وضعیت کاری عادی، دما و حجم آب استخر هر دو با زمان ثابت است ولی در شرایط فعلی به دلیل عدم جای‌گزینی آب خروجی از قلب، دمای آب ورودی به قلب رآکتور در اثر حرارت قلب رآکتور افزایش پیدا می‌کند. در برنامه‌ی اول خرابی پمپ کوتاه بودن زمان قبل از دستور خاموشی و نیز حجم زیاد آب مانع از افزایش محسوس دمای آب استخر می‌شود. یکی از عیب‌های کد PARET این است که دمای



خنک‌کنندگی نیز مدل عددی مورد نظر به مانند کد PARET رفتار دینامیکی رآکتور را به خوبی پیش‌بینی کرد. در مواردی که دمای ورودی خنک‌کننده به قلب رآکتور با زمان ثابت نیست، مدل عددی رفتار پویایی رآکتور را بهتر از کد PARET پیشگویی می‌کند. سادگی روش‌های محاسباتی استفاده شده در این مدل عددی به همراه سهولت به کارگیری آن توسط استفاده‌کننده از ویژگی‌های این مدل عددی است. استفاده از این مدل عددی برای مقاصد آموزش دینامیک رآکتور و همچنین پیش‌بینی کیفی رفتارهای گذرای رآکتور تهران مفید است. استفاده از این کد به عنوان یک ابزار تخمینی به گروه بهره‌بردار رآکتور تهران این توانایی را می‌دهد که رفتار پویایی رآکتور را در حالت‌های گذرای معمولی پیش‌بینی کند و در موارد غیرضروری مجبور به استفاده از کدهای تجاری پیچیده نباشند. تهیهی ورودی، اجرا و تحلیل خروجی کدهای تجاری زمان‌بر است.

#### پی‌نوشت‌ها

1. Piecewise constant method
2. Inhour
3. Lumped parameters
4. Temperature feedbacks
5. Engineering factor
6. Radial peaking factor
7. Axial peaking factor
8. Materials testing reactor
9. Dittus-boelter correlation
10. Subcooled
11. Seider-tate
12. Compensated ionization chambers
13. Uncompensated ionization chamber
14. loss of flow accident



شکل ۷. برنامه‌ی دوم حادثه‌ی خرابی پمپ به دنبال اصلاح دمای ورودی قلب. تغییرات (الف) توان؛ (ب) دمای خروجی آب از قلب.

#### ۴. نتیجه‌گیری

مدل عددی پیشنهادی که بخش نوترونیک آن به روش ویژه-مقدار و بخش ترموهیدرولیک آن به روش توده‌ای به ترتیب، معادله‌های سینتیک و ترموهیدرولیک را حل می‌کند، به سادگی رفتارهای گذرای رآکتور تحقیقاتی تهران را پیش‌بینی می‌کند. از مدل پیشنهادی به همراه کد PARET برای تحلیل تزریق واکنش‌پذیری مثبت و کاهش جریان خنک‌کنندگی در رآکتور تهران استفاده شد و یافته‌های این دو کد با داده‌های تجربی مقایسه شد. در آزمایش تزریق واکنش‌پذیری، مقدارهای پیش‌بینی شده‌ی توان با داده‌های تجربی توافق بسیار خوبی داشت ولی دماهای پیش‌بینی شده برای خنک‌کننده در کانال متوسط و داغ بیش‌تر از داده‌های تجربی بود. در آزمایش کاهش جریان



- [1] S.M. Khaled, Numerical modeling of reactivity excursion accidents in small light water reactors, department of nuclear techniques institute of nuclear techniques budapest university of technology, PHD Thesis (2006).
- [2] T. Hamidouche, A. Bousbia-Salah, M. Adorni, F. D'Auria, Dynamic calculations of the IAEA safety MTR research reactor benchmark problem using RELAP5/3.2 code, *Annals of Nuclear Energy*, 31, (2004) 1385-1402.
- [3] W.L. Woodruff, A kinetics and thermal-hydraulics capability for the analysis of research reactors, *Nuclear Technology*, 64 (1984) 196-206.
- [4] M.A. Gaheen, Simulation and analysis of IAEA benchmark transients, *Annals of Nuclear Energy*, 49 (2007) 217-229.
- [5] H. Kazeminejad, Thermal-hydraulic modeling of flow inversion in a research reactor, *Annals of Nuclear Energy*, 35 (2008) 1813-1819.
- [6] D.L. Hetrick, *Dynamics of nuclear reactors*, (1972).
- [7] H. Kazeminejad, Reactivity insertion limits in a typical pool-type research reactor cooled by natural circulation, *Annals of Nuclear Energy*, 33 (2006) 252-261.
- [8] M. Kinard, E.J. Allen, Efficient numerical solution of the point kinetics equations in nuclear reactor dynamics, *Annals of Nuclear Energy*, 31 (2004) 1039-1051.
- [9] C. Housiadas, Lumped parameters analysis of coupled kinetics and thermal-hydraulics for small reactors, *Annals of Nuclear Energy*, 29 (2002) 1315-1325.
- [10] F.W. Dittus, L.M.K. Boelter, *Publications on engineering*, University of California, Berkeley, 2 (1930) 443.
- [11] A. Lashkari, H. Khalafi, S.M. Mirvakili, Neutronic analysis for Tehran Research Reactor mixed-core, *Progress in Nuclear Energy*, 60, (2012) 31-37.
- [12] A. Lashkari, H. Khalafi, H. Kazeminejad, Effective delayed neutron fraction and prompt neutron lifetime of Tehran research reactor mixed-core, *Annals of Nuclear Energy*, 55, (2013) 265-271.