

اندازه‌گیری ضریب راکتیویته توان با استفاده از معادله Inhour در رآکتور تحقیقاتی تهران

احمد لشکری^{۱*}، میثم علیخانی^۲، روح‌الله آهنگری شادهی^۱، رضا صابری^۱

۱. پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران- ایران

۲. دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، صندوق پستی: ۱۴۵۱۵-۷۷۵، تهران، ایران

*Email: alashkari@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۲/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۶/۱۲

چکیده

در این مقاله از روش جدیدی برای اندازه‌گیری ضریب راکتیویته دمایی و توان استفاده شد. در این روش میزان تغییرات راکتیویته کل قلب رآکتور در اثر افزایش دما یا توان به‌طور مستقیم و مستقل از ارزش و موقعیت میله‌های کنترل محاسبه می‌گردد. این موضوع باعث کاهش خطا نسبت به روش اندازه‌گیری از طریق موقعیت میله‌های کنترل شد. استفاده از این روش کاملاً جدید بوده و گزارش یا مقاله‌ای در این زمینه گزارش نشده است. افزایش توان قلب باعث اعمال راکتیویته منفی در اثر فیدبک‌های دمایی می‌شود و بالعکس خنک کردن قلب باعث اعمال راکتیویته مثبت می‌شود. در این روش ابتدا رآکتور در حالت خنک‌کنندگی طبیعی در یک توان ثابت بحرانی می‌شود، سپس بعد از مدتی که تعادل گرمایی نسبی برقرار شد، با باز کردن شیر پروانه‌ای رآکتور رژیم خنک‌کنندگی از حالت طبیعی به حالت اجباری تغییر داده می‌شود. بدیهی است با برقراری جریان خنک‌کنندگی در زمان کوتاه تمام گرمای تولید شده در قلب در اثر گردش طبیعی به یک‌باره از بین رفته و یک راکتیویته مثبت معادل با توان رآکتور تزریق می‌شود. تزریق این مقدار راکتیویته باعث افزایش توان رآکتور می‌شود. با اندازه‌گیری زمان دو برابر شدن توان، مقدار راکتیویته تزریقی با استفاده از معادله Inhour به‌دست می‌آید. متوسط ضریب راکتیویته توان در محدوده آزمایش‌های انجام شده در حدود 1.02 pcm/KW اندازه‌گیری شد که مقدار آن هم با نتایج مطالعات قبلی و هم نتایج شبیه‌سازی‌ها سازگار است.

کلیدواژه‌ها: رآکتورهای تحقیقاتی، ضریب راکتیویته توان، ضرایب راکتیویته دمایی، خنک‌شوندگی طبیعی

Measurement of power reactivity coefficients using In-hour equation in Tehran Research Reactor

A. lashkari¹, M. Alikhani², R. Ahangari¹, R. Saberi¹

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran- Iran
2. Faculty of engineering Islamic azad university, research and science branch, P.O.Box: 14515-757, Tehran- Iran

Research Article

Received 18.5.2020, Accepted 2.9.2020

Abstract

This paper uses a new technique to measure the power and temperature reactivity coefficients. In this method, the core reactivity changes due to the modifications in the power or temperature directly. The values of these coefficients are independent of the worth and positions of the control rods. This method is completely new and no report or article has been reported in this field. Increasing the core power causes negative reactivity due to the temperature feedback, and cooling the core makes positive reactivity. In this method, TRR is critical at constant power in natural cooling mode. After getting a relative equilibrium in inlet and outlet coolant temperature, the fly valve of the reactor is opened, so that the cooling mode of TRR changes from natural to the forced mode. Obviously, by establishing a cooling flow in a short time, all produced heat in the natural mode is removed by forced, then a positive reactivity is inserted. As a result, the positive reactivity increases the reactor power. By measuring the doubling time of the power growing, the value of the inserted reactivity is obtained using Inhour equation in each initial power. The mean value of the power reactivity coefficient in TRR is about 1.02 pcm / kW that agrees with both results of the previous and recent simulations.

Keywords: Research reactors, power reactivity coefficient, Temperature reactivity coefficients, natural cooling.



۱. مقدمه

ایمنی رآکتورهای هسته‌ای به‌طور عام و رآکتورهای تحقیقاتی به‌طور خاص از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. گرچه رآکتورهای تحقیقاتی به‌دلیل پیچیدگی کم‌تر در مقایسه با رآکتورهای قدرت از ایمنی بالایی برخوردار هستند، ولی به‌دلیل استقرار برخی از آن‌ها در مراکز جمعیتی مانند مراکز آموزشی و تحقیقاتی نیاز به توجه ویژه‌ای دارند. ایمنی رآکتور ۵ MW تهران به‌دلیل شرایط مکانی فعلی آن، توان متوسط و استهلاک بالای آن حایز اهمیت است. گرچه در سال‌های اخیر سیستم‌های کنترل و ابزار دقیق رآکتور تهران به روزرسانی شده‌اند، اما همچنان نیازمند روش‌های جدید و دقیق برای اندازه‌گیری پارامترهای ایمنی رآکتور تهران هستیم. افزایش دمای مؤلفه‌های قلب (سوخت، کندکننده، خنک‌کننده) در اثر افزایش توان باعث اعمال فیدبک منفی شده و توان رآکتور را کاهش می‌دهند. تغییرات راکتیویته کل قلب رآکتور به‌ازای تغییر توان و یا دما ضرایب راکتیویته توان یا دما نامیده می‌شود. سوخت فعلی رآکتور تهران از نوع صفحه‌ای با غنای پایین (کم‌تر از ۲۰٪) است. سوخت‌های با غنای پایین نسبت به سوخت‌های با غنای بالا از میزان اورانیم ۲۳۸ بالاتری برخوردار هستند. ایزوتوپ ۲۳۸ اورانیم نسبت به ایزوتوپ ۲۳۵ از ضرایب دمایی بالایی برخوردار است و این موضوع باعث افزایش ضریب راکتیویته دمایی و توانی در سوخت‌های با غنای پایین اورانیم ۲۳۵ می‌شود [۱]. بالا بودن و منفی بودن این ضریب باعث افزایش ایمنی ذاتی رآکتور می‌شود. با وجود بهبود وضعیت ایمنی رآکتورهای MTR با نوع سوخت غنای پایین، این نوع سوخت‌ها در مقایسه با سوخت‌های TRIGA از ایمنی کم‌تری برخوردار هستند. بسته‌های سوخت TRIGA به‌دلیل داشتن کندکننده هیدرید زیرکونیم در سوخت از ضریب راکتیویته دمایی آبی بالایی برخوردار هستند، به‌گونه‌ای که این نوع از رآکتورها تقریباً در برابر تزریق راکتیویته مثبت ایمن هستند [۲]. ضرایب راکتیویته دمایی سوخت و خنک‌کننده از ویژگی‌های اصلی ایمنی هر رآکتور است که تعیین آن از اهمیت بالایی برخوردار است. این ضرایب ارتباط تغییر دما در مؤلفه‌های رآکتور را با تغییرات راکتیویته نشان می‌دهد و مستقل از نوع خنک‌کنندگی رآکتور (طبیعی، اجباری) هستند. اندازه‌گیری تجربی ضرایب راکتیویته دمایی رآکتور تهران به مانند سایر رآکتورهای استخری کار بسیار مشکلی است.

لازمه اندازه‌گیری ضرایب راکتیویته دمایی، افزایش دما در هریک از مؤلفه‌ها به‌صورت مستقل از دیگری است. در صورتی که در عمل افزایش دمای سوخت و خنک‌کننده هم‌زمان صورت گرفته و تعیین سهم هریک از آن‌ها کار ساده‌ای نیست. گرچه استفاده از بسته سوخت تجهیز شده به ابزار دقیق قادر به اندازه‌گیری دمای غلاف سوخت و خنک‌کننده است، ولی باز هم دارای محدودیت‌هایی است. در یک تحقیق انجام شده به روش هم‌دمایی و در رژیم خنک‌کنندگی طبیعی، ضرایب راکتیویته دمایی و توان رآکتور تهران محاسبه و اندازه‌گیری شده است [۳]. روش اندازه‌گیری ضرایب راکتیویته دمایی و توان در این تحقیق مشابه با روشی است که در رآکتور TRIGA برزیل از آن استفاده شده است [۲]. از کدهای نوترونیک و ترموهیدرولیک بسته نرم‌افزاری MTR_PC برای انجام محاسبات، استفاده شده است. متوسط ضریب راکتیویته توان اندازه‌گیری شده تا ۱۰۰ kW در حدود ۰/۸۵ pcm/kW در صورتی که مقدار محاسباتی آن در حدود ۰/۹۶ pcm/kW است. مقادیر متوسط محاسباتی ضرایب راکتیویته دمایی سوخت و خنک‌کننده برای رآکتور تهران در رژیم خنک‌شوندگی طبیعی به‌ترتیب برابر با $۱۳۴۰ \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$ و $۱۷۶ \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$ اعلام گردید. در تحقیق صورت گرفته میزان تغییرات راکتیویته کل قلب رآکتور در اثر افزایش دما یا توان از تغییر موقعیت محوری میله‌های کنترل محاسبه می‌گردد که این موضوع به‌دلایلی که در ادامه بدان اشاره می‌گردد از خطای بالایی برخوردار است. از آنجایی که تغییرات راکتیویته قلب در اثر دما در توان‌های پایین بسیار کوچک است، اندازه‌گیری این مقدار تغییرات از روی تغییر محوری موقعیت میله‌های کنترل دارای عدم‌قطعیت قابل ملاحظه‌ای است که به چند مورد آن اشاره می‌گردد. محدودیت ابزار دقیق و عدم‌قطعیت در تعیین و تشخیص دقیق موقعیت محوری میله‌های کنترل، وابستگی شدید ارزش میله‌های کنترل به آرایش قلب، میزان مصرف سوخت‌های قلب، طول سیکل، موقعیت سایر میله‌های کنترل و تجهیزات آزمایشی موجود در قلب از جمله پارامترهای تاثیرگذار در مقدار راکتیویته انتگرالی و یا دیفرانسیلی میله‌های کنترل هستند.

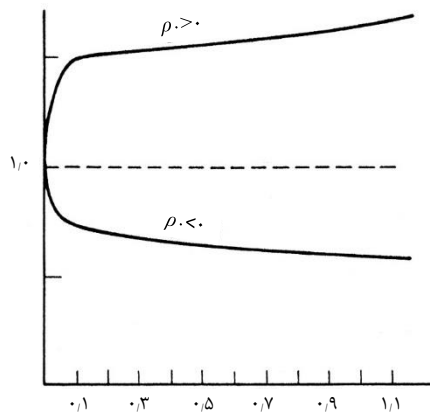
در این مقاله از روش جدیدی برای اندازه‌گیری ضریب راکتیویته دمایی توان استفاده می‌شود. در این روش میزان تغییرات راکتیویته قلب در اثر افزایش دما یا توان به‌طور



	A	B	C	D	E	F	
	E.B	GR	GR	GR	E.B	GR	9
	SFE	RR CFE	SFE	SFE	SFE	SFE	8
	SFE	SFE	SFE	SFE	SR2 CFE	SFE	7
	SFE	SR1 CFE	SFE	E.B	SFE	SFE	6
	SFE	SFE	SFE	SFE	SR3 CFE	SFE	5
	SFE	SFE	SR4 CFE	SFE	SFE	SFE	4
	E.B	SFE	SFE	SFE	SFE	E.B	3
	GR	E.B	E.B	GR	GR	GR	2
	GR	GR	GR	GR	GR	GR	1

SFE: STANDARD FUEL ELEMENT
CFE: CONTROL FUEL ELEMENT
GR: GRAPHITE BOX E.B: EMPTY BOX
SR: SHIM SAFETY ROD RR: REGULATING ROD

شکل ۱. آرایش قلب ۶۱ راکتور تحقیقاتی تهران



شکل ۲. نحوه تغییرات قدرت راکتور در اثر اعمال راکتیویته پله

۲. روش کار

قلب راکتور تهران شامل بسته‌های سوخت از نوع MTR^۱ است که در یک شبکه ۶×۹ چیده می‌شوند. مشخصات دقیق بسته‌های سوخت و پارامترهای مربوط به قلب راکتور تهران در مرجع [۵] آمده است. آرایش قلب تعادلی شماره ۶۱ در شکل ۱ آورده شده است.

هر تغییری در دمای سوخت و خنک‌کننده قلب راکتور سبب تغییر در راکتیویته کل قلب راکتور می‌گردد. وقتی که $\rho=0$ است پریود تغییر قدرت راکتور بی‌نهایت بوده و راکتور در حالت پایدار به کار خود ادامه می‌دهد. زمانی که دمای مؤلفه‌های

مستقیم و مستقل از ارزش و موقعیت میله‌های کنترل محاسبه می‌گردد و به دنبال آن، شاهد کاهش عدم قطعیت‌های ذکر شده در روش اندازه‌گیری از طریق میله‌های کنترل خواهیم بود. ارزش میله‌های کنترل راکتور تهران با استفاده از معادله Inhour تک‌گروهی محاسبه می‌گردد. در این روش میله کنترل مورد نظر اندکی بیرون کشیده شده و با تزریق راکتیویته مثبت توان راکتور افزایش می‌یابد. با اندازه‌گیری زمان دو برابر شدن توان و جایگذاری در معادله ۱ ارزش دیفرانسیلی میله کنترل محاسبه می‌گردد. در روش پیشنهادی در این مقاله از شش گروه نوترون تأخیری استفاده شده است که نسبت به تک‌گروهی باعث کاهش خطا می‌شود. خطای سیستماتیک تعیین ارزش میله‌های کنترل و تعیین راکتیویته معادل با هر توان یکسان است. مهم‌ترین منابع خطا در تعیین ضریب راکتیویته توان یا دما در کسر میزان راکتیویته بر توان با دما است. دقت اندازه‌گیری توان یا دما باعث کاهش عدم قطعیت ضرایب راکتیویته توان و دما می‌شود.

استفاده از این روش کاملاً جدید بوده و تنها نتایج اولیه مطالعه در این زمینه در کنفرانس NENE 2015 توسط نویسنده مسئول این مقاله ارائه گردیده است [۴]. افزایش دمای قلب باعث اعمال راکتیویته منفی در اثر فیدبک‌های دمایی می‌شود و بالعکس خنک‌کردن قلب باعث اعمال راکتیویته مثبت می‌شود. در این روش ابتدا راکتور در حالت خنک‌شوندگی طبیعی در یک توان ثابت، بحرانی می‌شود و با رسیدن به تعادل گرمایی نسبی، دمای ورودی و خروجی قلب در وضعیت گردش طبیعی ثبت می‌گردد. با استفاده از این دو دما، دمای متوسط قلب قابل محاسبه است. با باز کردن شیر پروانه‌ای راکتور رژیم خنک‌کنندگی از حالت طبیعی به حالت اجباری تغییر داده می‌شود. بدیهی است با برقراری جریان خنک‌کنندگی در زمان بسیار کوتاه (در حدود یک ثانیه) تمام گرمای تولیدشده در قلب در اثر گردش اجباری به یکباره از بین رفته و یک راکتیویته مثبت معادل با توان راکتور تزریق می‌شود. تزریق این مقدار راکتیویته باعث افزایش توان می‌شود. با اندازه‌گیری زمان دو برابر شدن توان، مقدار راکتیویته تزریقی با استفاده از معادله Inhour به دست می‌آید.



در این مقاله، از شش گروه نوترون‌های تأخیری برای مشخص کردن معادله $Inhour$ استفاده می‌شود. ثابت واپاشی شش گروهی مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده و پریود افزایش توان نیز از رابطه $\omega = \frac{\ln 2}{T_D}$ محاسبه می‌شود.

۲.۲ شرح آزمایش

روند انجام آزمایش‌ها بدین صورت است که رآکتور در مد خنک‌شوندگی طبیعی بروی توان‌های انتخابی، تنظیم می‌شود. دماهای ورودی و خروجی متناسب با هر توان از طریق ترموکوپل‌های نصب‌شده در موقعیت D6 قرائت می‌شود. شکل ۳ موقعیت ترموکوپل‌های ورودی و خروجی نصب شده در جعبه آلومینیومی و نمایشگرهای دماهای ترموکوپل ورودی و خروجی را نمایش می‌دهد. بعد از برقراری نسبی دماهای مشاهده شده ورودی و خروجی، هم‌زمان با بسته شدن دریچه پایینی قلب رآکتور^۱ و شیر پروانه‌ای باز شده و جریان خنک‌شوندگی اجباری^۲ برقرار می‌گردد. با برقراری جریان اجباری، جهت جریان خنک‌شوندگی معکوس شده و حرارت تولید شده توسط جریان آب از قلب رآکتور برداشت می‌شود. برداشت حرارت از قلب باعث کاهش دمای مؤلفه‌های قلب شده و باعث تزریق راکتیویته مثبت و افزایش توان می‌گردد. با اندازه‌گیری زمان دو برابر شدن توان رآکتور در دو بازه توانی متفاوت (به‌طور مثال ۳ تا ۶ و ۴ تا ۸) و محاسبه زمان میانگین، پریود رآکتور محاسبه می‌گردد. اندازه‌گیری زمان دو برابر شدن توان در اثر تزریق راکتیویته مثبت روشی است که از آن برای اندازه‌گیری ارزش میله‌های کنترل استفاده می‌گردد [۶].

جدول ۱. پارامترهای سینتیک قلب اول

آرایش قلب	β_{eff}	MS(t)
اول	۰٫۰۰۸۱۴	۴۴٫۶
قلب ۶۱	۰٫۰۰۷۶۸۹	۵۵٫۱

جدول ۲. ثوابت واپاشی شش گروهی نوترون‌های تأخیری

گروه انرژی	ثابت واپاشی
۱	۰٫۱۲۴
۲	۰٫۳۰۵
۳	۰٫۱۱۱
۴	۰٫۳۰۱
۵	۱٫۱۴
۶	۳٫۰۱

قلب رآکتور هسته‌ای تغییر می‌کند، شرایط ناپایدار شده و شرایط گذرا جایگزین می‌شود. در حالت گذرا نحوه تغییرات قدرت کل رآکتور در شکل ۲ نشان داده شده است و با تقریب خوبی می‌توان آن را به دو قسمت پرش آنی و قسمتی با شیب ثابت (پریود پایدار) تقسیم‌بندی کرد [۶]. پرش اولیه متأثر از نوترون‌های آنی و عمر متوسط آن است، در حالی که تحول بعدی رآکتور، که بلافاصله در امتداد پرش اولیه حاصل می‌گردد، متأثر از حضور نوترون‌های تأخیری و در نظر گرفتن آن‌ها است. در میان نوترون‌های تأخیری، اثر غالب با اولین گروه نوترون‌های تأخیری با بیش‌ترین نیمه‌عمر تعیین می‌گردد. پریود پایدار رآکتور نیز با استفاده از همین گروه تعریف می‌گردد. با توجه به تئوری آزمایش به نظر می‌رسد که با این روش می‌توان میزان تزریق راکتیویته ناشی از سرد شدن قلب رآکتور را اندازه‌گیری کرد.

۱.۲ اندازه‌گیری پریود پایدار افزایش توان

مقدار راکتیویته تزریقی معادل با اندازه‌گیری پریود پایدار افزایش توان قابل محاسبه است. این مقدار راکتیویته با اندازه‌گیری زمان دو برابر شدن توان رآکتور و استفاده از رابطه $Inhour$ به‌دست می‌آید. اگرچه شکل ۲ نحوه تغییرات توان رآکتور در اثر اعمال راکتیویته پله‌ای را نمایش می‌دهد، ولی استفاده از معادله $Inhour$ برای راکتیویته‌های شیب‌دار با زمان نسبتاً کوتاه (در حدود ثانیه) نیز معتبر هست، به شرط آن که رآکتور به پریود پایدار خود رسیده باشد و اثرات فیدبک دما باعث کنترل توان در زمان‌های طولانی‌تر نشود.

$$\rho = \beta + l\omega - \sum \frac{\beta_i \lambda_i}{\omega + \lambda_i} \quad (1)$$

$$\beta = \sum_i \beta_i \quad (2)$$

در این رابطه ρ مقدار تزریق اولیه راکتیویته است. β : کسر نوترون‌های تأخیری که می‌توان بصورت تک‌گروهی تا شش گروهی تعریف شود
 l : عمر نوترون‌های آنی
 ω : پریود افزایش توان رآکتور
 λ_i : ثابت واپاشی مولدهای نوترون‌های تأخیری است. به تعداد گروه نوترون‌های تأخیری ثوابت واپاشی وجود دارد.

جداول ۱ و ۲ پارامترهای سینتیک و ثوابت واپاشی مربوط قلب تعادلی رآکتور تهران را نمایش می‌دهند [۷]. اعداد مربوط به قلب اول جهت اعتبارسنجی آورده شده‌اند.

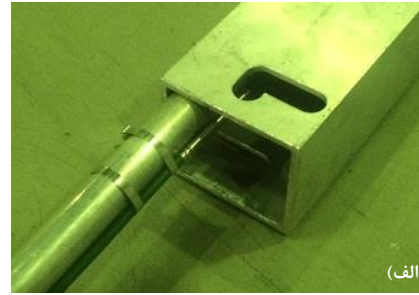
1. flapper valve
2. Forced flow



خاموشی ۱۰۰ kW از کار انداخته شد و امکان انجام آزمایش را تا ۲۰۰ kW فراهم گردید.

۳. نتایج و بحث

جدول ۳ نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در توان‌های ۲۰ تا ۲۰۰ کیلووات را نشان می‌دهد. با افزایش توان اولیه آزمایش زمان دو برابر شدن توان (T_D) کاهش می‌یابد. با جایگزینی مقادیر اندازه‌گیری شده در معادله اول مقدار راکتیویته مثبت تزریقی به‌ازای هر توان محاسبه می‌گردد. ستون آخر جدول ۳ ضرایب راکتیویته توان را به‌ازای آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد. با افزایش توان، ضریب راکتیویته توان کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع در شکل ۴ توضیح داده شده است. منحنی شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی رفتار دمای متوسط قلب راکتور برحسب توان را در رژیم خنک‌کنندگی طبیعی نشان می‌دهد. این نتایج با استفاده از کد CONVEC محاسبه شده‌اند [۸]. برنامه CONVEC به‌صورت اختصاصی برای محاسبه ترموهیدرولیکی راکتورهای MTR در حالت خنک‌شوندگی طبیعی تک‌فاز در شرایط پایدار تهیه شده است. این برنامه به‌طور خاص برای کانال‌های مستطیل شکل مجتمع‌های سوخت MTR تنظیم شده است. دبی و سرعت سیال در کانال، توزیع دمای سیال، توزیع دمای دیواره و سوخت و حاشیه تا شروع جوش هسته‌ای از خروجی‌های این کد است. CONVEC بخشی از بسته نرم‌افزاری MTR-PC است که در بخش مهندسی هسته‌ای، INVAP S. E تهیه شده است. افزایش متوسط دمای قلب به‌ازای هر یک از توان‌های آزمایش شده در جدول ۳ آورده شده است که با استفاده از کد CONVEC محاسبه شده است. البته مقادیر تجربی دمای اندازه‌گیری شده مربوط به هر یک از توان‌ها در جدول ۴ آورده شده است که با توجه به امکانات موجود نسبتاً قابل قبول است. مقادیر اندازه‌گیری شده کم‌تر از مقادیر محاسباتی است. آهنگ افزایش دما برحسب توان خطی نیست و آهنگ افزایش دما در توان‌های بالا کم‌تر است. از آنجایی که راکتیویته تزریقی متناسب با دمای متوسط قلب است در نتیجه، نسبت راکتیویته به توان با افزایش توان کاهش می‌یابد. روند کاهشی ضریب راکتیویته توان اندازه‌گیری شده خود نشان‌دهنده روند صحیح انجام آزمایش بوده و نتایج تجربی به‌طور کیفی با پیش‌بینی‌های حاصل از تئوری هم‌خوانی دارد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳. ترموکوپل اندازه‌گیری دما (الف) ورودی کانال D6، (ب) خروجی کانال D6، (ج) نمایشگرهای دمای

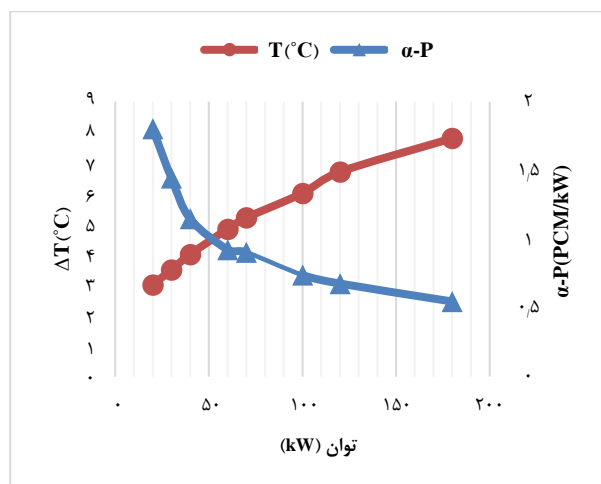
بعد از اندازه‌گیری زمان دو برابر شدن توان، کنترل توان توسط اپراتور صورت گرفته و برقراری جریان اجباری تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که هر دو ترموکوپل یک دما را نشان دهند. فرآیند افزایش توان و نیز دما توسط دو دوربین ثبت می‌گردید. در ابتدا امکان انجام آزمایش در توان‌های بالاتر از ۵۰ kW امکان‌پذیر نبود. دلیل عدم موفقیت در انجام آزمایش در توان‌های بالا به سیستم کنترل راکتور برمی‌گردد. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد برای توان‌های بالاتر زمان دو برابر شدن کاهش می‌یابد. راکتور تهران دارای دستور خاموشی^۱ در ۱۰۰ kW است. بنابراین به‌دلیل کندی انجام آزمایش به‌خصوص در باز کردن شیر پروانه‌ای تا باز شدن کامل شیر، توان راکتور به ۱۰۰ kW رسیده و راکتور دستور خاموشی می‌گیرد. در مواردی هم به‌دلیل وجود نویز در تشخیص پیروید راکتور، دستور خاموشی برای پیرویدهای زیر ۱۰ ثانیه صادر می‌گردد. بنابراین با تصمیم کمیته فنی و سرپرست دستور

1. SCRAM



در این روش دیگر نیازی به ثبت موقعیت میله‌های کنترل نیست چون مستقیماً و به همان روشی که ارزش میله‌های کنترل راکتور اندازه‌گیری می‌شود، آزمایش انجام می‌گیرد. خطای این روش به مراتب کم‌تر از حالتی است که ضرایب راکتیویته را از روی موقعیت و ارزش میله‌های کنترل حساب کرد. ارزش میله‌های کنترل متأثر از آرایش قلب، برن‌آپ، اثر زینان، دما قلب موقعیت سایر میله‌ها است [۹]. شکل ۵ منحنی تغییرات توان برحسب زمان را در توان‌های ۶۰، ۷۰ و ۱۲۰ کیلووات را نشان می‌دهد که به‌صورت تجربی اندازه‌گیری شده‌اند. در ۱۲۰ kW توان ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. دلیل کاهش و سپس افزایش توان راکتور در توان‌های بالا به پروفایل دمایی خنک‌کننده در راستای محوری قلب برمی‌گردد. با تقریب نسبتاً خوبی می‌توان توزیع دمای خنک‌کننده در راستای محوری را خطی دانست و در نتیجه دمای متوسط قلب میانگین عددی دمای ورودی و خروجی است. با باز کردن شیر پروانه‌ای راکتور، سیال خنک‌کننده آب با پروفایل دمایی خطی از قلب راکتور عبور کرده و در ابتدا به‌دلیل عبور آب گرم راکتیویته منفی تزریق شده و موجب کاهش توان می‌شود و سپس با ادامه جریان آب راکتور خنک‌گشته و باعث افزایش توان می‌گردد. بنابراین به‌دلیل برقراری سریع جریان آب و تزریق راکتیویته نیم نوسانی بایستی اندکی صبر کرد تا راکتور به پریرود پایدار خود نزدیک شده و سپس زمان دو برابر شدن توان را اندازه گرفت. همان‌گونه که می‌دانیم در این آزمایش در اثر باز کردن شیر و برقراری جریان خنک‌کننده، سوخت راکتور نیز هم‌زمان با خنک‌کننده خنک می‌شود در نتیجه تزریق راکتیویته مثبت در این آزمایش ناشی از خنک شدن هم‌زمان خنک‌کننده و صفحات سوخت می‌باشد.

شکل ۶ نمودار روند تغییرات توان راکتور در قدرت ۱۸۰ kW بعد از تغییر رژیم خنک‌کنندگی و راکتیویته اعمالی به راکتور در اثر آن را نشان می‌دهد. دلیل کاهش اولیه توان عبور آب داغ بالای قلب در رژیم خنک‌شوندگی طبیعی بوده در نتیجه راکتیویته منفی ناشی از آن باعث کاهش توان راکتور می‌شود.



شکل ۴. تغییرات دما و ضرایب راکتیویته برحسب توان

جدول ۳. ضرایب راکتیویته توان

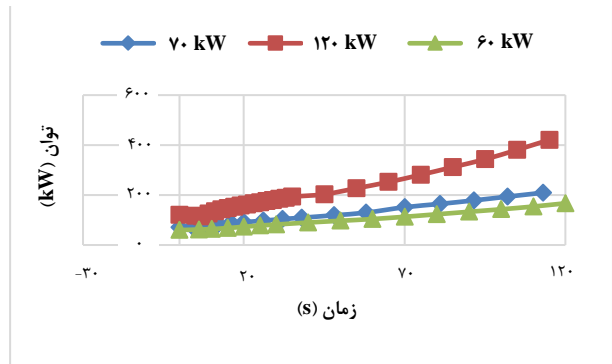
P _o (kW)	T _{D1} (s)	T _{Dr} (s)	T _{Dave} (s)	ρ _o (pcm)	ΔT (°C)	α _P (pcm/kW)
۲۰	۱۶۶	۱۶۴	۱۶۵	۳۶٫۱	۳٫۲	۱٫۸
۳۰	۱۴۳	۱۴۷	۱۴۵	۴۳٫۴	۳٫۵	۱٫۵
۴۰	۱۲۲	۱۲۸	۱۲۵	۴۵٫۹	۴	۱٫۲
۶۰	۱۰۰	۱۰۴	۱۰۲	۵۵٫۴	۴٫۸۳	۰٫۹
۷۰	۸۲	۸۸	۸۵	۶۳٫۳	۵٫۲	۰٫۹
۱۰۰	۶۶	۷۴	۷۰	۷۳٫۹	۶	۰٫۷
۱۲۰	۵۸	۶۶	۶۲	۸۱٫۲	۶٫۷	۰٫۷
۱۸۰	۴۳	۵۳	۴۸	۹۸٫۴	۷٫۸	۰٫۵

جدول ۴. ضرایب راکتیویته دمایی

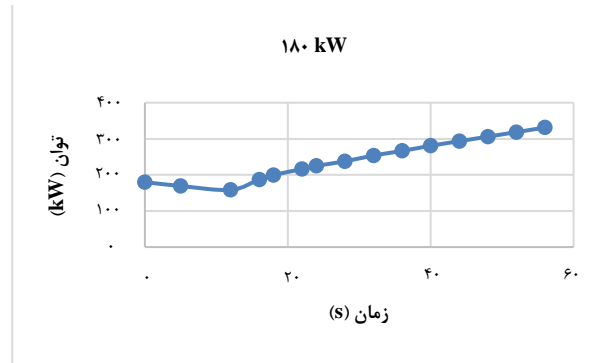
توان اولیه kW برحسب	افزایش دمای متوسط (°C)	راکتیویته تزریقی (pcm)	ضرایب راکتیویته دمایی pcm/°C
۲۰	۲٫۵	۳۶٫۱	۱۴٫۴
۳۰	۳	۴۳٫۴	۱۴٫۵
۴۰	۳٫۲	۴۵٫۹	۱۴٫۴
۶۰	۳٫۸	۵۵٫۴	۱۴٫۶
۷۰	۴٫۲	۶۳٫۳	۱۵٫۱
۱۰۰	۴٫۸	۷۳٫۹	۱۵٫۴
۱۲۰	۵	۸۱٫۲	۱۶٫۲
۱۸۰	۶	۹۸٫۴	۱۶٫۴



CONVEC اختلاف زیادی دارد. دلیل این اختلاف ناشی از محل قرارگیری ترموکوپل‌ها و تفاوت شرایط آزمایش و محاسبه است. کد CONVEC یک کد یک‌بعدی است که تنها یک کانال خنک‌کننده آب در مجاورت یک تیغه سوخت را مدل می‌کند، در صورتی که دماهای اندازه‌گیری شده در کانال تابش‌دهی D6 است که فاقد سوخت است. گرمای تولید شده در کانال تابش‌دهی ناشی از انتقال گرما از دیواره‌های کانال و گرمای پس داده شده گاماها و نوترون‌های سریع و فوق حرارتی است. بنابراین محاسبه دمای متوسط کانال پرتودهی D6 سخت است و نیاز به دانش بیش‌تری از جمله دانستن روابط پیچیده انتقال حرارت در دیواره‌های کانال دارد. نکته دیگری که لازم به توضیح است زمان تخلیه آب موجود در کانال D6 و سایر کانال‌های پرتودهی است. آرایش قلب در شکل ۱ نشان‌دهنده ۷ کانال پرتودهی است. نکته کلیدی در مورد این کانال‌ها این است که سطح مقطع خروجی آب در انتهای این کانال‌ها که بر روی شبکه نگهدارنده سوخت نصب می‌گردد متفاوت بوده و بسیار کم‌تر از سطح مقطع خروجی بسته‌های سوخت است. اندازه سطح مقطع خروجی کانال‌های پرتودهی به مقدار دبی مورد نیاز جهت خنک‌سازی نمونه پرتودهی بستگی دارد. بنابراین دبی خروجی کانال D6 در این آزمایش بسیار کم‌تر از دبی خروجی یک بسته سوخت است. از آنجایی که حجم آب گیر افتاده در کانال‌های پرتودهی بالاست، بنابراین زمان تخلیه کامل آب در هر یک از کانال‌های پرتودهی متناسب با عکس دبی خروجی کانال است. محاسبات محافظه‌کارانه نشان می‌دهد، در شرایطی که جریان سیال در قلب برقرار است، مدت زمان عبور آب از بالا تا انتهای قلب در بسته‌های سوخت در حدود یک ثانیه است. فرایند هم‌دمایی در کانال D6 در حدود ۲۰ ثانیه است که شکل ۷ آن را به خوبی نشان می‌دهد. بنابراین فرایند تغییر رژیم خنک‌کنندگی یک فرایند ترکیبی از یک خنک‌شوندگی سریع بسته‌های سوخت با خنک‌شوندگی تأخیری کانال‌های پرتودهی است که به نسبت فراوانی آن‌ها تأثیرگذار است. بنابراین از دماهای تجربی اندازه‌گیری شده در موقعیت D6 نمی‌توان برای محاسبه ضرایب راکتیویته دمایی استفاده کرد. به‌همین دلیل در آزمایش دیگری ترموکوپل ورودی موقعیت D6 از محل خود خارج و در فاصله تقریبی ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متری از بالای قلب نگه داشته شد و دماهای ورودی و خروجی هر یک از توان‌ها یادداشت گردید. نتایج تجربی افزایش متوسط دمای قلب راکتور به‌ازای هریک از توان‌ها در جدول شماره ۴ آورده شده است. دمای متوسط قلب در هر توان با تقریب بسیار خوبی برابر با میانگین عددی دو دمای ورودی و خروجی است. ستون‌های اول تا سوم جدول ۴ به ترتیب توان، افزایش متوسط دمای قلب و مقدار راکتیویته اندازه‌گیری شده در هر توان را نشان می‌دهد.



شکل ۵. منحنی تغییرات توان



شکل ۶. منحنی تغییرات توان برحسب زمان در توان ۱۸۰ kW

شکل ۷ نمودار تغییرات دمای آب ورودی و خروجی قلب را در سناریوی تغییر فاز خنک‌کنندگی از حالت طبیعی به حالت اجباری در توان ۱۸۰ kW را نشان می‌دهد. شکل ۳ ج نمایشگرهای ترموکوپل‌های نصب شده در ورودی و خروجی را در حالت راکتور خاموش نمایش می‌داد. به دلیل کالیبره نبودن یکی از ترموکوپل‌ها، در حالتی که راکتور توانی نداشت، اختلاف دمای ۰/۸ بین دو ترموکوپل نشان داده می‌شد. دماهای ورودی و خروجی با استفاده از دوربین موبایل در طول آزمایش ثبت می‌گردید. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد دماهای ورودی و خروجی به‌ازای هر توان به حالت تعادل رسیده و ثابت می‌گردد. با باز کردن شیر پروانه‌ای جهت جریان خنک‌شوندگی برعکس می‌شود و ترموکوپل ورودی روند نزولی دما را نشان می‌دهد ولی در ترموکوپل خروجی ابتدا شاهد افزایش دما و سپس کاهش دمای سیال خنک‌کننده هستیم که قبلاً دلیل این رفتار توضیح داده شده است. با گذشت زمان و در زمان‌های طولانی اختلاف دمای دو ترموکوپل ثابت شده که دقیقاً برابر همان اختلاف دمای اولیه است. رفتار دماهای ورودی و خروجی نشان می‌دهد که تمام گرمای تولید شده در قلب راکتور کاملاً برداشت شده و به شرایط هم‌دمایی رسیده است. نکته بسیار مهمی که باید بدان اشاره شود این است که شکل ۷ تنها روند و فرایند تغییر دما را در سناریوی تغییر رژیم خنک‌کنندگی نشان می‌دهد و مقدار دمای متوسط کانال D6 به هیچ وجه نماینده دمای متوسط کل قلب نیست و با مقادیر محاسباتی



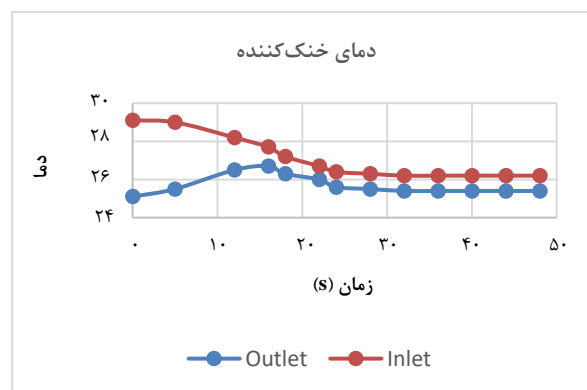
جدول ۵. مقایسه نتایج تجربی با نتایج شبیه سازی شده

	نتایج تجربی		نتایج شبیه‌سازی شده [۳]
	inhour	میله کنترل [۲]	
α_p (pcm/kW)	۱,۰۲	۰,۸۵	۰,۹۶
	۱۵,۱	۱۴,۴۰	۱۵,۱۶

۱.۳ تحلیل عدم قطعیت و آنالیز حساسیت

عدم قطعیت اندازه‌گیری ضرایب راکتیویته توان و یا دما مجموع عدم قطعیت‌های مربوط به اندازه‌گیری راکتیویته به‌ازای هر توان به‌علاوه عدم قطعیت دما یا توان اندازه‌گیری شده است. عدم قطعیت مربوط به تعیین مقدار راکتیویته شامل دو مؤلفه استفاده از معادله Inhour به‌جای حل کامل معادلات سینتیک نوترون و عدم قطعیت در اندازه‌گیری زمان دو برابر شدن توان است. عدم قطعیت مربوط به استفاده از معادله Inhour مطابق با مرجع [۱۰]، تفاوت راکتیویته محاسبه شده از معادله Inhour و حل کامل معادلات سینتیک به‌ازای پریود پایدار اندازه‌گیری شده در جریان افزایش توان راکتور است. مقدار عدم قطعیت محافظه‌کارانه مربوط به این مؤلفه مطابق با مرجع [۱۰] برابر با ۱٪ است. عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری زمان دو برابر شدن به این موضوع برمی‌گردد که پریود راکتور در طول انجام آزمایش ثابت نبوده و به مقدار اندکی با زمان افزایش می‌یابد. به همین دلیل بین دو زمان T_D اندازه‌گیری شده اختلافی دیده می‌شود. متوسط دو زمان اندازه‌گیری شده به‌عنوان زمان دو برابر شدن در معادله Inhour به‌کار برده می‌شود. حداکثر عدم قطعیت ناشی از این اندازه‌گیری از اختلاف راکتیویته‌های محاسبه شده مربوط به زمان دو برابر شدن متوسط با راکتیویته مربوط به کوچک‌ترین زمان دو برابر شدن در هر آزمایش محاسبه می‌گردد. عدم قطعیت‌های مربوط به ضریب راکتیویته توان اندازه‌گیری شده در هر توان در جدول ۶ آورده شده است. بیش‌ترین و متوسط عدم قطعیت گزارش شده در اندازه‌گیری ضریب راکتیویته توان به‌ترتیب ۹/۱ و ۵/۸ درصد می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که عدم قطعیت محاسبه شده در فوق به‌ازای یک‌بار آزمایش است. کالیبره کردن میله‌های کنترل با استفاده از این روش به یک‌باره امکان‌پذیر نیست و در چند بازه (در حدود ۱۰ بازه) انجام می‌گیرد. در نتیجه عدم قطعیت میزان ارزش میله کنترل ترکیب تصادفی یا

ستون آخر نتایج حاصل از تقسیم مقدار راکتیویته اندازه‌گیری شده به متوسط افزایش دمای قلب را نشان می‌دهد. پارامتر محاسبه شده در ستون آخر با تقریب قابل قبولی شامل مجموع ضریب راکتیویته دمایی کندکننده و سوخت است. مقادیر متوسط محاسباتی ضرایب راکتیویته دمایی سوخت و خنک‌کننده برای راکتور تهران در رژیم خنک‌شوندگی طبیعی به‌ترتیب برابر با ۱,۷۶، ۱۳,۴۰ pcm/°C می‌باشند [۳]. مجموع دو ضریب پیشین برابر ۱۵,۱۶ pcm/°C می‌باشد که تقریباً برابر میانگین ستون آخر جدول ۴ (۱۵,۱ pcm/°C) است. جدول ۵ نتایج تجربی حاصل از این تحقیق را با نتایج تجربی مرجع ۳ و نتایج شبیه‌سازی در آن مرجع را مقایسه می‌کند. در این جدول دو پارامتر قابل اندازه‌گیری ضریب راکتیویته توان و نسبت تغییرات راکتیویته کل به تغییر دمای متوسط خنک‌کننده قلب با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد در هر دو پارامتر، نتایج شبیه‌سازی‌ها به نتایج روش تجربی Inhour نزدیک‌تر است. این محاسبات نشان‌دهنده هم‌خوانی نتایج تجربی با نتایج محاسباتی است. بنابراین اگر امکان اندازه‌گیری دمای سوخت و کندکننده به‌طور مجزا فراهم آید با توجه به نتایج این تحقیق امکان اندازه‌گیری ضرایب راکتیویته دمای سوخت و کندکننده به‌طور مجزا مهیا می‌گردد.



شکل ۷ منحنی دمای آب ورودی و خروجی در توان ۱۸۰ kW

جدول ۴. ضرایب راکتیویته دمایی

توان اولیه برحسب kW	افزایش دمای متوسط (C)	راکتیویته تزریقی (pcm)	ضرایب راکتیویته دمایی pcm/°C
۲۰	۲,۵	۳۶,۱	۱۴,۴
۳۰	۳	۴۳,۴	۱۴,۵
۴۰	۳,۲	۴۵,۹	۱۴,۴
۶۰	۳,۸	۵۵,۴	۱۴,۶
۷۰	۴,۲	۶۳,۳	۱۵,۱
۱۰۰	۴,۸	۷۳,۹	۱۵,۴
۱۲۰	۵	۸۱,۲	۱۶,۲
۱۸۰	۶	۹۸,۴	۱۶,۴



متوسط قلب است. دمای متوسط قلب متناسب با توان متوسط بوده در نتیجه پیرو افزایش قدرت نسبت به توان اولیه بسیار حساس است. آشکارسازهای نوترونی نصب شده در بالای قلب رآکتور متناسب با شار نوترون حرارتی دریافت کرده از کل قلب، مقدار توان متوسط قلب را نمایش می‌دهند. آشکارسازهای نوترونی به روش حرارتی کالیبره می‌شوند، ولی با این حال توان نمایش داده شده توسط این آشکارسازها متأثر از پارامترهای مختلفی مانند آرایش قلب، موقعیت میله‌های کنترل، میزان فرسایش سوخت‌ها، اثر زینان و طول سیکل رآکتور هستند. از میان پارامترهای ذکر شده موقعیت میله‌های کنترل بیش‌ترین تأثیر را در مقدار توان نمایشی دارد. معمولاً کالیبره کردن حرارتی در توان‌های بالا در حدود ۴ مگاوات و در شرایط تعادل زینان صورت می‌گیرد که موقعیت میله‌های کنترل جهت جبران راکتیویته دمایی و زینان بالا رفته است. تفاوت موقعیت میله‌های کنترل در ابتدای سیکل با شرایط قدرت و تعادل زینان باعث خطای قابل ملاحظه‌ای در قرائت توان می‌شود.

جدول ۶. عدم قطعیت اندازه‌گیری ضرایب راکتیویته

P_c (kW)	P_c (pcm)	ρ_1 (pcm)	$\rho\Delta$ (pcm)	$\% \rho\Delta/\rho_c$	$\Delta P/p$ %	$\% \Delta a_p/a_p$
۲۰	۳۶٫۱	۳۵٫۹	۰٫۲۲	۰٫۶	۵	۵٫۶
۳۰	۴۳٫۴	۴۰٫۹	۲٫۵	۵٫۸	۳٫۳	۹٫۱
۴۰	۴۵٫۹	۴۶٫۹	۰٫۹۹	۲٫۲	۲٫۵	۴٫۷
۶۰	۵۵٫۴	۵۵٫۴	۰٫۰۳	۰٫۱	۱٫۷	۱٫۷
۷۰	۶۳٫۳	۶۵٫۲	۱٫۹	۳	۱٫۴	۴٫۴
۱۰۰	۷۳٫۹	۷۷٫۴	۳٫۵۱	۴٫۷	۱	۵٫۷
۱۲۰	۸۱٫۲	۸۵٫۵	۴٫۲۷	۵٫۳	۰٫۸	۶٫۱
۱۸۰	۹۸٫۴	۱۰۶٫۵	۸٫۱	۸٫۲	۰٫۵۶	۸٫۸

سیستماتیک از عدم قطعیت‌های به‌دست آمده در هر یک از بازه‌های انجام آزمایش است. اگر N تعداد بازه‌های کالیبره کردن میله کنترل و $\Delta\rho$ میزان عدم قطعیت در هر بازه باشد میزان عدم قطعیت سیستماتیک ارزش میله کنترل $N^* \Delta\rho$ است. این موضوع روشن می‌کند که استفاده مستقیم از روش Inhour در تعیین میزان راکتیویته ناشی از توان یا دما عدم قطعیت را بسیار کاهش می‌دهد. سطر اول جدول ۶ آنالیز حساسیت روش اندازه‌گیری به روش Inhour را به‌ازای ۱ ثانیه را نشان می‌دهد که حساسیت ناشی از این موضوع زیر ۱ درصد است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به یک روش جدید اندازه‌گیری ضریب راکتیویته توان و دما در رآکتور تهران با استفاده از روش Inhour پرداخته شده است. در واقع مهم‌ترین هدف این تحقیق معرفی این روش به‌عنوان یک روش بسیار کارآمد جهت تشخیص ضرایب راکتیویته دمایی و توان رآکتور تهران است. به‌دلیل نبود سوخت تجهیز شده به ابزارهای دقیق اندازه‌گیری دما در رآکتور تهران قادر به محاسبه ضرایب راکتیویته دمایی به‌طور مجزا نبودیم، ولی در عوض راکتیویته معادل با هر توان رآکتور در رژیم خنک‌شوندگی طبیعی با دقت بسیار خوبی قابل اندازه‌گیری می‌باشد. متوسط ضریب راکتیویته توان در محدوده آزمایش‌های انجام شده $۱٫۰۲ \text{ pcm/kW}$ اندازه‌گیری شد که مقدار آن، هم با نتایج مطالعات قبلی و هم نتایج شبیه‌سازی‌ها سازگار است [۳]. متوسط ضریب راکتیویته توان اندازه‌گیری شده تا ۱۸۰ kW در حدود $۰٫۸۵ \text{ pcm/kW}$ خطای کم‌تر از ۱۰٪ می‌باشد، در صورتی که مقدار محاسباتی آن در حدود $۰٫۹۶ \text{ pcm/kW}$ است که به نتایج این تحقیق نزدیک است که خود می‌تواند دلیلی بر کارآمد بودن این روش باشد. در بخش ضرایب راکتیویته دمایی نیز با تقریب نسبتاً خوبی مجموع دو ضریب راکتیویته دمایی سوخت و کندکننده برابر با $۱۵٫۱ \text{ pcm}$ اندازه‌گیری شد که با نتایج شبیه‌سازی‌ها در توافق خوبی است. آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق مانند هر مطالعه تجربی دیگری از عدم قطعیت‌هایی برخوردار است. مهم‌ترین پارامتری که در این تحقیق اندازه‌گیری شده است زمان دو برابر شدن توان است که مقدار آن به شدت وابسته به مقدار تغییر دمای



مراجع

7. A. Lashkari et al, *Effective delayed neutron fraction and prompt neutron lifetime of Tehran research reactor mixed-core*, [Annals of nuclear energy](#) **55**, 265-271, (2013).
8. Pablo Abbate ,INVAP, CONVEX V 3.40,, A program for thermal-hydraulic analysis of a MTR-type core in natural circulation regime. (2002)
9. Yari, Maedeh, et al, [Three dimensional analysis of temperature effect on control rod worth in TRR](#). *Nuclear Engineering and Technology* **50.8** 1266-1276. (2018):
10. T. MAKMA et al. *Validation of the Stable Period Method Against Analytic Solution – IGORR conference*, 2017
1. E. Simon, *MTR-type nuclear reactor safety analysis ,A Thesis Submitted to the School of Graduate Studies in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree Doctor of philosophy*, [McMaster University February](#) (2006).
2. P. Souza, et al., *reactivity power coefficient determination of the ipr-r1 triga reactor*. In [3rd world triga users conference august](#) (2009).
3. A. Lashkari, M. Alikhani, *Measurement and calculation of power and temperature coefficients of TRR using isothermal method in natural circulation*, [Iranian Physic Conference, Yazd university](#), 2016 (in Persian)
4. A. Lashkari, *Reactivity power and temperature Coefficients Determination of the TRR*, [24 International Conference Nuclear Energy for New Europe, Portoroz Slovenia, NENE](#), 2015
5. AEOI, *Safety Analysis Report for the Tehran Research Reactor*, [Tehran-Iran](#), (2018).
6. AEOI, *Nuclear Reactor and Safety School, TRR experiments Guide*

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers. *



استناد به این مقاله

احمد لشکری، میثم علیخانی، روح‌الله آهنگری شادھی، رضا صابری (۱۴۰۰)، اندازه‌گیری ضریب راکتیویته توان با استفاده از معادله Inhour در راکتور تحقیقاتی تهران، **۹۸**، ۸۰-۸۹

DOI: [10.24200/nst.2021.1310](https://doi.org/10.24200/nst.2021.1310)

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1310.html

