

توسعه راکتیویته متر On-Line برای راکتورهای هسته‌ای*

تهیه و ترجمه: هاشم موسوی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی راکتور و دانش آموخته دانشکده برق تبریز

دفتر فنی مهندسین مشاور رهاب

مقدمه

مزایای استفاده از راکتیویته متر در یک راکتور در روشن کردن و هنگام کار راکتور تعیین همزمان راکتیویته جهت ایمنی و ضرورت رسیدن به سطح توان کاری لازم می‌باشد. Monitoring (نمایش) دقیق راکتیویته در سطوح توان بالا جهت تعیین دما، poisons (سموم تولیدی) و ضریب توانی راکتیویته ضروری می‌باشد. و نیز در تعیین ارزش راکتیویته‌المان‌های جدید سوخت، سیستم‌های کنترل راکتور و نمونه‌های تابش دیده نیز ضرورت دارد.

دوروش متفاوت برای اندازه‌گیری راکتیویته وجود دارد؛ دینامیک و کینتیک. در روش دینامیک پریود پایدار یا نهایی راکتور اندازه‌گیری می‌شود و راکتیویته از معادله in-hour بدست می‌آید. این روش تنها در پریودهای مثبت مفید می‌باشد. در روش کینتیک اندازه‌گیری راکتیویته، تغییرات راکتیویته می‌تواند پیوسته باشد و راکتیویته در هر مورد با تحلیل تغییرات زمانی سطح توان راکتور با استفاده از معادلات point kinetic بدست می‌آید. دستگاه اندازه‌گیری راکتیویته می‌تواند روش کینتیک را که در بخش بعدی توضیح داده می‌شود، مورد استفاده قرار دهد.

معادلات تئوری

معادلات point kinetic راکتور رفتار وابسته به زمان راکتور را نشان می‌دهد.

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l^*} \left(\frac{P(t)}{\beta} - 1 \right) P(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + S(t) \quad (1)$$

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l^*} P(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (2)$$

که در آن ها

$P(t)$: توان راکتور در زمان t

$\rho(t)$: راکتیویته سیستم

$C_i(t)$: چگالی مولدهای نوترونهای تأخیری گروه i ام.

λ_i, β_i : ثابت واپاشی و کسر نوترونهای تأخیری متناظر با هر گروه.

L^* : طول عمر متوسط نوترون در راکتور

$S(t)$: منبع خارجی نوترون

زوج معادلات دیفرانسیل قابل تبدیل به یک معادله دیفرانسیل

انتگرالی برای $P(t)$ می‌باشد که بصورت زیر است:

$$\rho(t) = \beta + \frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} - \frac{\beta}{P(t)} \int_0^{\infty} D(u)P(t-u)du - \frac{l^* S(t)}{\beta P(t)} \quad (3)$$

که در آن

$$D(u) = \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^6 \beta_i \lambda_i e^{-\lambda_i u}$$

کرنل نوترونهای تأخیری می‌باشد.

$D(u)du$ احتمال این که یک نوترون تأخیری در du حول u بدنبال

یک فیژن در $u=0$ پخش شود می‌باشد. با جایگذاری مقدار $D(u)$ در

رابطه ۳ و صرفنظر از ترم منبع داریم:

$$\rho(t) = \beta + \frac{L^*}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} - \frac{l^*}{P(t)} \sum_{i=1}^6 \beta_i \lambda_i S_i(t) \quad (4)$$

که $S_i(t)$ تاریخچه توان را توصیف می‌کند، یعنی:

$$(5)$$

$$S_i(t) = \int_0^{\infty} P(t-u)e^{-\lambda_i u} du$$



با قراردادن $y=t-u$ ، $S_i(t)$ بصورت زیر می‌شود:
(۶)

$$S_i(t) = e^{-\lambda_i t} \left[\int_{-\infty}^0 p(y) e^{\lambda_i y} dy + \int_0^t p(y) e^{\lambda_i y} dy \right]$$

در نتیجه به ازای تغییرات کم در زمان Δt :
(۷)

$$S_i(t_1 + \Delta t) = e^{-\lambda_i \Delta t} \left[S_i(t_1) + R_i e^{-\lambda_i t_1} \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} p(y) e^{-\lambda_i y} dy \right]$$

اگر انتگرال توان را با R_i نشان دهیم:
(۸)

$$R_i = \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} p(y) e^{\lambda_i y} dy$$

داریم:
(۹)

$$S_i(t_1 + \Delta t) = e^{-\lambda_i \Delta t} \left\{ S_i(t_1) + R_i e^{-\lambda_i t_1} \right\}$$

اگر تغییرات $p(t)$ با زمان در فاصله زمانی کوچک Δt خطی باشد، می‌توانیم بنویسیم:
(۱۰)

$$p(y) = p(y_1) + \frac{P(y_1 + \Delta t) - p(y_1)}{\Delta t} (y - y_1)$$

با جایگذاری این مقدار $p(y)$ در R_i برای ترم Source داریم:
(۱۱)

$$S_i(t_1 + \Delta t) = S_i(t_1) e^{-\lambda_i \Delta t} + \frac{1}{\lambda_i} \left(1 - e^{-\lambda_i \Delta t} \right)$$

$$\left\{ P(t_1) - \frac{P(t_1 + \Delta t) - P(t_1)}{\lambda_i \Delta t} + \frac{P(t_1 + \Delta t) - P(t_1)}{\lambda_i} \right\}$$

این مقدار S_i می‌تواند برای محاسبهٔ زمانی راکتیویته استفاده شود. با در نظر گرفتن مقادیر فعلی و قبلی با زیر نویس ۰ و ۱، متناظراً می‌توانیم بنویسیم:
(۱۲)

$$\rho_1 = \beta + \frac{L^*}{P_1} \left(\frac{P_1 - P_0}{\Delta t} \right) - \frac{1}{P_1} \sum_{i=1}^6 \beta_i \lambda_i S_{i1}$$

(۱۳)

$$S_{i1} = S_{i0} e^{-\lambda_i \Delta t} + \frac{1}{\lambda_i} \left(1 - e^{-\lambda_i \Delta t} \right) \left[P_0 - \frac{P_1 - P_0}{\lambda_i \Delta t} \right] + \frac{P_1 - P_0}{\lambda_i}$$

(۱۴)

$$S_{i0} = \frac{\langle P_0 \rangle}{\lambda_i}$$

مقدار اولیه S_i از مقدار متوسط سطح توانی که راکتور در آن بحرانی است بدست می‌آید. معادله ۱۲ معروف به معادلهٔ کینتیک معکوس می‌باشد. ملاحظات زیر در مورد این معادله باید در نظر گرفته شوند. اولاً این عبارت در $p(t)$ بدون دیمانسیون است، ثانیاً $p(t)$ باید رفتار فیزیکی معقولی داشته باشد.

نکته جالب حل این معادلات مقدار اولیه راکتیویته می‌باشد که از این حل با جایگذاری مقدار S_{i0} از ۱۴ در رابطه ۴، ترم های اول و سوم با هم ساده می‌شوند و نیز و ترم دوم ۴ نیز صفر می‌شود. نتیجتاً اولین مقدار اولیه راکتیویته حاصله همیشه صفر خواهد شد.

تشریح راکتیویته متر

دستگاه اندازه‌گیری راکتیویته طراحی شده برای راکتورهای PARR سیگنال چگالی نوترون ها را از وسایل اندازه‌گیری با تابعیت زمانی گرفته و این اطلاعات را در الگوریتم محاسبه راکتیویته مورد محاسبه قرار می‌دهد.

یک بلوک دیاگرام سیستم اندازه‌گیری راکتیویته برای راکتور PARR-1 در شکل ۱ نشان داده شده است. گرفتن داده‌ها و تحلیل آن‌ها توسط میکرو کامپیوتر PDP11/23 plus comp انجام می‌شود. خصوصیت طرح گرفتن داده، آن است که سیستم می‌تواند هر کدام از سیگنال‌های کانال‌های فلاکس را با یک نرم افزار ساده انتخاب کند. ۲ روش برای گرفتن داده‌ها وجود دارد. اولی یک کارت (ADC) converter آنالوگ به دیجیتال ۱۲ بیتی با ۱۶ سیگنال ورودی آنالوگ می‌باشد. دومی کارت محلی گرفتن پالس با ۱۶ بیت وضوح و سرعت زیاد نمونه برداری می‌باشد.

الف) گرفتن داده‌ها

خروجی پیوستهٔ کانال‌های نمایش دهنده فلاکس نوترون بصورت سیگنال‌های جریان حدود صفر تا ۲۰ میلی‌آمپر می‌باشند. این جریان خروجی به خروجی ولتاژ حدود صفر تا ۵+ ولت تبدیل شده و برد AXV11-C PDP1123-plus Computer، I/O برای تبدیل آنالوگ به دیجیتال تغذیه می‌کند. سیگنال شرطی در ورودی کامپیوتر جهت کاهش اثر نویز بکار می‌رود. AXV11-C یک converter با وضوح ۱۲ بیتی دارد که حداکثر ۱۶ سیگنال بعنوان ورودی می‌گیرد. ۲ converter (مبدل) دیجیتال به آنالوگ (DAC) نیز در این کارت موجود می‌باشد که می‌تواند داده‌های ۱۲ بیتی دیجیتال را به ولتاژ آنالوگ بین $\pm 10V$ تبدیل کند.

ب) الگوریتم محاسبات راکتیویته

برنامه کامپیوتری جهت محاسبات راکتیویته ۲ سطح برنامه‌ریزی را مورد استفاده قرار می‌دهد. یکی از آن‌ها ماکرو اسمبلر سطح پایین REACMAC می‌باشد، دیگری برنامهٔ فترن REACFOR77 است



که داده‌های رقمی گرفته شده با REACMAC را خوانده و از آنها برای محاسبه راکتیویته استفاده می‌کند. متعادل کردن داده‌های ورودی در این قسمت با استفاده از روش Moving ave انجام می‌گیرد.

دو برنامه REACMAC و REACFOR همزمان بکار می‌افتند و در یک بلوک معمولی به نام "ANALG" بصورت متقابل و در ارتباط با هم کار می‌کنند. انتقال کنترل از یک برنامه به دیگری با تنظیم یا پاک کردن event flag می‌کنند. منطق کنترل این برنامه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. REACMAC (برنامه A) آدرس واحدهای (ADC) و (DAC) را تولید می‌کند و سیگنال توان راکتور، ورودی مخصوص برای نمایش داده شدن را انتخاب می‌کند. این برنامه همچنین بازه زمانی نمونه برداری یا تأخیر زمانی بین دو نمونه داده پشت سر هم (Δt) را تولید می‌کند. بعد از انجام تبدیل آنالوگ به دیجیتال، مقدار عددی سیگنال ورودی در بلوک ANALG بار می‌شود. سپس REACMAC کنترل را با تنظیم B flag یا FB به فرتن (برنامه B) انتقال می‌دهد و به حالت انتظار می‌رود. REACFOR مقدار داده ورودی را از بلوک ANALG خوانده و مقادیر متعادل‌تر داده‌ها را تولید می‌کند و آن را به مقدار واقعی توان تبدیل می‌کند.

برای تخمین دقیق مقدار اولیه توان، برنامه بسادگی روی داده‌های ورودی برای ۵۰ مرحله اول میانگین‌گیری می‌کند. میانگین زمانی توان راکتور بدست می‌آید، برنامه B، فوراً مقدار توان $p(t)$ را برای محاسبه راکتیویته مورد استفاده قرار می‌دهد. بعد از محاسبات راکتیویته برنامه A مجدداً فعال شده و داده دیجیتال راکتیویته را بصورت آنالوگ با کمک مبدل دیجیتال به آنالوگ نمایش می‌دهد.

وقتی سیکل محاسبات راکتیویته و نمایش آن تکمیل شد، برنامه A و B به ابتدای حلقه پریده تا محاسبات راکتیویته جدید را شروع کنند. برنامه با دادن فرمان stop مناسب از میز فرمان متوقف می‌شود. مقدار نهایی راکتیویته قبل از اتمام برنامه، در ثبات داده DAC ذخیره می‌شود و بصورت پیوسته قابل نمایش است. زمان سیکل برای یک مرحله کامل اندازه‌گیری راکتیویته حدود ۰/۳ ثانیه برای PARR1 و ۰/۵ ثانیه برای PARR2 تنظیم می‌شود. اندازه‌گیری تجربی نشان می‌دهد که این زمان برای اندازه‌گیری ناحیه گذار سریع راکتیویته هر دو راکتور به مقدار کافی کوچک می‌باشد.

نتایج

الف) معیار انتخاب سیگنال ورودی

از آنجا که راکتیویته متر به چگالی نوترون بعنوان ورودی احتیاج دارد، انتخاب سیگنال ورودی مناسب از آشکارسازهای گوناگون نوترون بکار رفته در اطراف قلب راکتور ضروری است. سیگنال لگاریتمی بزرگنمایی شده (تقویت شده) فلاکس نوترون برای

محاسبات راکتیویته پیشنهاد می‌شود، چون تغییرات نمایی فلاکس نوترون بین دو بازه زمانی متوالی با یک خط راست قابل تخمین است. برای تعیین اثر انواع مختلف سیگنال فلاکس نوترون محاسبات راکتیویته در توان حالت پایدار راکتور با کمک کانال‌های ابزارهای اندازه‌گیری PARR1 برای فلاکس لگاریتمی و خطی و لحظه شروع انجام می‌گیرد. درصد ریشه متوسط خطا (s) برای سیگنال‌های توان ورودی و داده‌های راکتیویته در هر مورد محاسبه شده است. بیشترین خطای سیگنال ورودی برای کانال start-up نوع پالسی مشاهده می‌شود (حدود ۴٪ نرخ شمارش متوسط). سیگنال کانال لگاریتمی خطایی کمتر از ۱٪ می‌دهند که با متعادل کردن این خطا تا ۰/۶٪ کاهش می‌یابد.

چنانچه در بخش‌های بعدی توضیح داده خواهد شد، پاسخ آهسته تقویت کننده لگاریتمی در بیشتر موارد توانایی اندازه‌گیری تغییرات سریع راکتیویته را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. براساس این اندازه‌گیری‌ها سیگنال کانال لگاریتمی B برای نمایش راکتیویته در PARR1 انتخاب می‌شود. مزیت دیگر سیگنال این کانال این است که آشکار ساز آن در طرف مخالف منبع خارجی نسبت به قلب راکتور واقع است. سیگنال فلاکس خطی یا پالسی نیز در بعضی موارد برای تعیین تغییرات سریع راکتیویته استفاده می‌شوند.

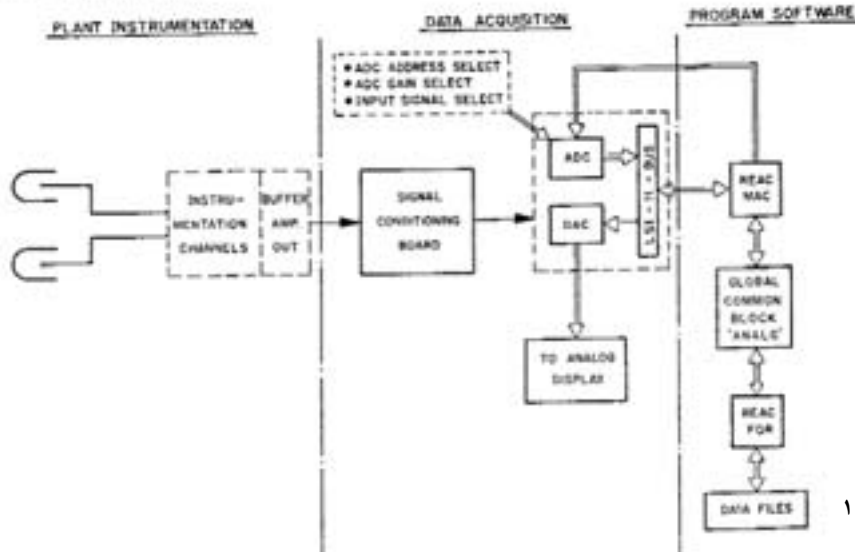
ب) کالیبراسیون اولیه راکتیویته متر

همانگونه که در بخش II نشان داده شد، مقدار اولیه محاسبه شده توسط راکتیویته متر همیشه صفر خواهد بود. (صرفنظر از شرایط دقیق کاری راکتور). بنابراین ضروری است که راکتیویته متر را با تعیین دقیق راکتیویته اولیه راکتور با برخی روشهای مستقل کالیبره کنیم. در راکتورهای PARR این کار با روش kinetic rod drop معکوس (IKPD) انجام می‌گیرد، که روی IBM PC/AT نصب است. IKRD می‌تواند مقدار راکتیویته قطعی را برای هر شرایط زیر بحرانی یا نزدیک بحرانی محاسبه کند. این روش برای کالیبراسیون راکتیویته متر در هر دو راکتور در هر شرایط اولیه خاص بانک rodها یا هر جا هر تغییری در شرایط کاری قلب باشد بکار می‌رود.

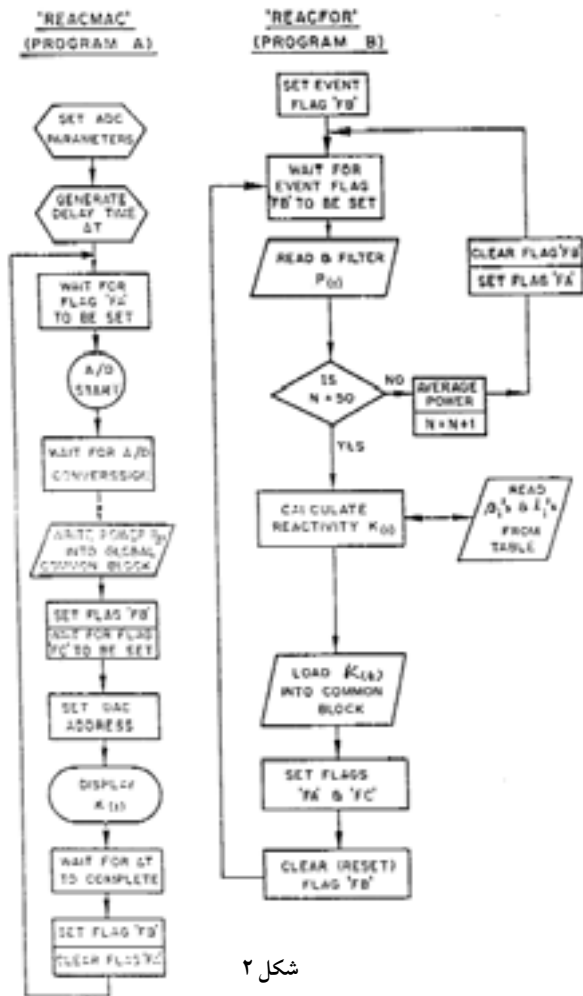
پ) تعیین راکتیویته مین رسیدن به توان اسمی

برای تشریح پاسخ جهشی راکتیویته متر، ترسیم توان راکتور و راکتیویته در زمان رسیدن به توان نامی در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. توان راکتور در هر مرحله، افزایش یافته و توان و خروجی راکتیویته متر ترسیم شده‌اند. توان اولیه راکتور در ۵۰۰ کیلووات تا زمان t_1 در تعادل است، در t_1 یک راکتیویته مثبت آنی (سریع) با بیرون کشیدن همه میله‌های کنترل به قلب وارد می‌شود، بین زمان t_2 تا t_3 راکتیویته سیستم را دست نمی‌زنیم و ثابت نگه می‌داریم. در زمان t_3 راکتیویته منفی با داخل کردن میله‌های کنترل در قلب وارد می‌کنیم و راکتور به حالت بحرانی بر می‌گردد. در نمودار الف از شکل ۳ راکتیویته حول





شکل ۱



شکل ۲

صفر تا زمان t_1 نوسان می‌کند. بین زمان t_1 تا t_2 نمودار الف پرش نشان می‌دهد و تا زمان t_3 ، ρ در همین سطح می‌ماند که در t_3 راکتور خود را در شرایط بحرانی جدید مجدداً پایدار می‌کند. بعد از حدود ۱۰۰ ثانیه از شروع اندازه‌گیری ها یک راکتیویته مثبت دیگر وارد می‌کنیم و توان راکتور به ماکسیمم مقدار خود حدود ۴/۵ مگاوات می‌رسد. راکتیویته حاصل و رفتار توان در بخش بعدی نمودارهای الف و ب شکل ۳ ارائه شده است و بنابر شکل ۳ داریم:

۱- پاسخ راکتیویته متر به هر تغییری در راکتیویته سیستم بعلت تأخیر زمانی نمونه برداری سیگنال توان (۲/۰ ثانیه) جهشی خواهد بود.
 ۲- رفتار توان راکتور مشخصاً از رفتار راکتیویته متفاوت است و بدست آوردن توضیحی برای شرایط راکتور از روی این نمودار غیر ممکن است.

ت) تعیین ارزش میله‌های کنترل

تعیین ارزش راکتیویته میله‌های کنترل اهمیت ایمنی اساسی دارد زیرا کنترل راکتیویته در راکتور بوسیله میله‌های کنترل انجام می‌گیرد. ارزش میله کنترل میله‌های منفرد در دو راکتور با انداختن یک میله از موقعیت کاملاً بیرون و اندازه‌گیری مقدار اولیه و نهایی راکتیویته سیستم بدست می‌آید. اختلاف دو راکتیویته ارزش کلی میله را می‌دهد.

مقادیر ارزش میله در هر دو راکتور به روش IKRD با راکتیویته متر و پریود پایدار (روش inhour) اندازه‌گرفته می‌شود. این مقادیر در جدول ۱ در ازای راکتیویته اولیه سیستم ارائه شده‌اند. توجه شود که برای این موارد که راکتور در حالت اولیه زیر بحرانی است راکتیویته متر تخمین بالاتری از ارزش میله می‌دهد، زیرا فرض شده راکتیویته اولیه صفر باشد. یک مزیت اندازه‌گیری با راکتیویته متر در مقابل روش IKRD این است که این روش هم با تغییرات مثبت و هم با تغییرات منفی راکتیویته کار می‌کند. در حالیکه IKRD تنها شامل

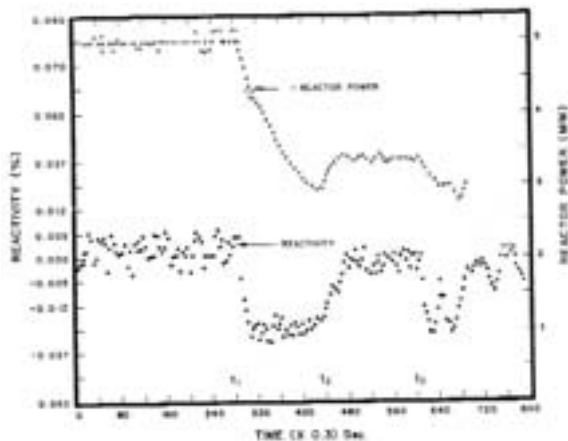


ه) تعیین ضریب راکتیویته

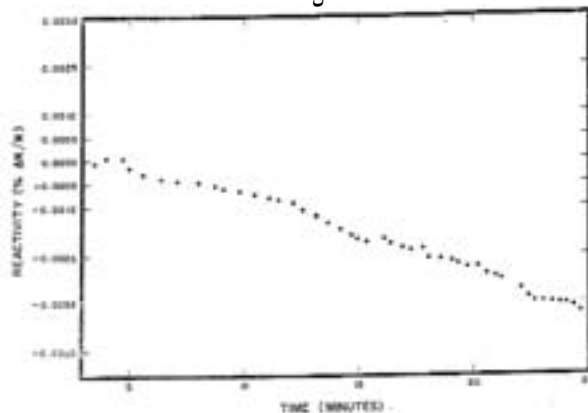
برای تعیین ورود راکتیویته منفی وابسته به زمان در قلب ناشی از دما و اثرات سموم تولیدی، خروجی راکتیویته متر برای یک نیم ساعت بعد از رسیدن به توان نامی مدنظر قرار می‌گیرد. در این مدت زمان، توان راکتور مجاز به تغییر بدون هیچ اپراتور یا عمل کنترلی اتوماتیک می‌شود. توان راکتور در ۳۰ دقیقه کاهش ۲۰٪ نشان می‌دهد. رفتار راکتیویته سیستم بعنوان تابع زمان در شکل ۵ رسم شده است، فاصله زمانی بین دو نقطه متوالی شکل ۵ ثابت نیست ولی براساس زمانی که کانال $\log N$ تغییراتی در فلاکس نوترون ثبت می‌کند تنظیم می‌شود. اندازه‌گیری فوق به ضریب توانی کل راکتیویته در PARR-1 منجر می‌شود.

ه) تعیین فصولیات کنترل خودکار راکتور

برای تعیین اثر روی راکتیویته سیستم حلقه بسته متناسب با کنترلر انتگرال-دیفرانسیلی (PID) راکتور، مقایسه‌ای بین داده‌های راکتیویته حاصل از حالات دستی و کنترل خودکار راکتور انجام می‌شود. راکتور در سطوح پایینتر توان کار می‌کند تا اثر هر اغتشاش خارجی راکتیویته مانند سموم و دما را در هر دو حالت حذف کنند.



شکل ۴



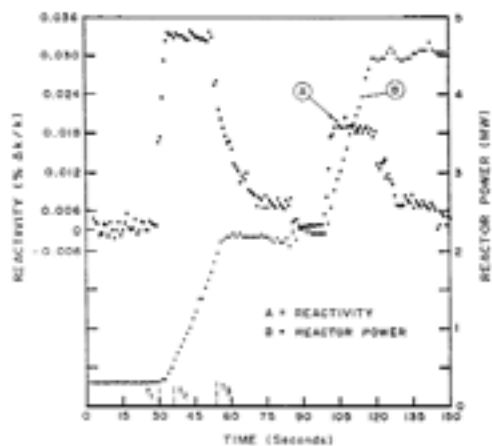
شکل ۵

راکتیویته‌های منفی می‌شود. این خصوصیت راکتیویته متر می‌تواند برای تعیین ارزش دیفرانسیلی میله جایی که میله مقدار کمی بیرون کشیده می‌شود و راکتیویته مثبت تولیدی اندازه‌گیری می‌شود استفاده شود. کاربرد بیشتر اندازه‌گیری فوق تعیین راکتیویته مثبت سوخت‌های جدید و المان‌های رفلکتور اضافه شده به قلب که بصورت موثر با راکتیویته متر قابل اندازه‌گیری است، می‌باشد.

ث) تعیین ارزش راکتیویته نمونه‌های دافل قلب

کاربرد دیگر راکتیویته متر تعیین ارزش راکتیویته نمونه‌های تابش دیده حول قلب راکتور می‌باشد. ارزش نمونه باید بصورت دقیق تعیین شود تا به اپراتور راکتور ایده‌ای درباره محدوده راکتیویته مثبت مورد نیاز جهت جبران جذب نوترون پارازیتی بدهد. یک نمونه کادمیم $4/5gr$ نزدیک قلب راکتور واقع شده در حالیکه راکتور در توان کامل ۵ مگاوات کار می‌کند. تأثیر حضور نمونه روی راکتیویته در شکل ۴ نشان داده شده است.

قبل از بارگذاری نمونه، توان راکتور تنظیم شده و راکتیویته حول مقدار متوسط صفر تغییر می‌کند. هنگامی که نمونه بارگذاری می‌شود (در زمان t_1) راکتیویته بصورت جهشی می‌افتد در زمان t_2 نمونه با حرکت عمودی بالا رونده از قلب راکتور خارج می‌شود و راکتیویته مقدار جدید پایداری حول صفر می‌یابد، اثر نوسانات نمونه روی راکتیویته سیستم در بخش بعدی نمودار در پی زمان t_3 نشان داده شده است.



شکل ۳

جدول ۱

COMPARISON OF INTEGRAL ROD WORTH FOR INDIVIDUAL CONTROL RODS IN PARR-1 OBTAINED BY DIFFERENT METHODS

Control Rod Number	Integral Worth ($-\% \Delta k/k$)			Initial Reactivity ($-\% \Delta k/k$)
	Reactivity meter	IKRD	In-hour	
1	1.378	1.381	1.390	0.003
2	2.466	2.480	2.410	0.312
3	1.580	1.530	1.562	0.015
4	1.693	1.824	1.696	0.247
5	3.342	3.342	3.322	0.006
PARR-2				
1	0.725	0.710	—	0.017

*Development of on-line reactivity meter for nuclear reactors Saleem A. Ansari

