

اندازه‌گیری قدرت رآکتور تحقیقاتی تهران (TRR) با استفاده از فعالیت گامای ایزوتوپ ^{16}N

مهرداد عزیزی شمامی^۱، حسین قدس^۱، جواد رحیقی^۱ و جاوید دبیری^۲
۱. سازمان انرژی اتمی ایران، مرکز تحقیقات هسته‌ای، بخش فیزیک هسته‌ای، گروه فیزیک نوترون
۲. سازمان انرژی اتمی ایران، مرکز تحقیقات هسته‌ای، بخش تحقیقات و کارگردانی رآکتور

(دریافت مقاله: ۸۲/۴/۹ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۲/۹/۳۰)

چکیده

برهمکنش نوترون سریع با اکسیژن موجود در آب خنک‌کننده قلب رآکتور، تولید هسته رادیواکتیو ^{16}N می‌کند. این هسته رادیواکتیو پرتو گامایی با انرژی 6.13 MeV گسیل می‌نماید. با شمارش گامای حاصل از این واپاشی به وسیله یک آشکارساز یدور سدیم $5.08\text{ cm} \times 5.08\text{ cm} \times 0.8\text{ cm}$ NaI(Tl) و با استفاده از رابطه خطی موجود بین فعالیت ایزوتوپ ^{16}N و توان رآکتور، قدرت رآکتور را می‌توان تعیین کرد. جهت دریافت پاسخ مناسب، حفاظ آشکارساز طراحی و فاصله مناسب آن از لوله خروجی آب خنک‌کننده تنظیم گردید. با استفاده از الکترونیک تنظیم شده جهت شمارش پرتوی گامای ^{16}N ، شمارش در قدرتهای مختلف انجام و سیستم بر حسب قدرت درجه‌بندی گردید. در این مقاله سعی شده است دلایل رفتار غیرخطی سیستم در قدرتهای بیشتر، مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: نوترونهای سریع - توان رآکتور - فعالیت پرتو گامای ^{16}N - رفتار غیر خطی

۱. مقدمه

اندازه‌گیری مقدار دقیق قدرت رآکتور، در مبحث ایمنی رآکتور از اهمیت زیادی برخوردار است. همچنین این موضوع برای استفاده کاربران رآکتورهای تحقیقاتی جهت انجام آزمایشهای مختلف مورد نیاز است. روشهای مختلفی برای اندازه‌گیری قدرت رآکتور وجود دارد. در زیر به چند روش که مورد استفاده بیشتری دارند اشاره می‌گردد [۱].
۱- روش کالریمتری^۱.
۲- اندازه‌گیری شار نوترون^۲.

۴- اندازه‌گیری قدرت توسط میزان نوترونهای تأخیری.

۵- اندازه‌گیری قدرت توسط سیستم ^{16}N ^۴.

در رآکتورهای مانند رآکتور تحقیقاتی تهران که در آنها از آب سبک به عنوان خنک‌کننده استفاده می‌شود، بر اثر برهمکنش نوترون سریع با هسته اکسیژن موجود در آب، ایزوتوپ ^{16}N تولید می‌گردد که با آشکارسازی پرتو گامای این ایزوتوپ که دارای انرژی زیاد است و اندازه‌گیری فعالیت آن، می‌توان از ارتباط خطی بین این فعالیت و قدرت رآکتور، استفاده نمود. چون واکنش $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ آستانه‌ای در حدود 10 MeV دارد [۱].

۳- اندازه‌گیری قدرت توسط شدت اشعه چرنکوف^۳.

۳. Cherenkov Power Monitor
۴. ^{16}N Power Monitoring System

۱. Thermal Power Monitoring With Calorimetric Method
۲. Neutron Flux Measurement

راکتور منجر به تغییر در فعالیت ^{16}N خواهد گردید. بنابر این این سیستم نسبت به تغییرات سموم، تهی شدن سوخت و غیره حساس نمی‌باشد.

۳- سیستم ^{16}N از اثرات پاره‌های شکافت حاصل از بمبارانهای نوترونی در قلب و همچنین پرتوهای گامای ناشی از آنها ایمن است زیرا محل آن پشت دیواره بتونی حفاظ قلب است و به اندازه کافی از قلب دور می‌باشد.

۴- با انتخاب محل اندازه‌گیری که در فاصله ۳ متر از لوله خروجی آب خنک‌کننده قلب قرار دارد، می‌توان این آشکارسازی را از نوسانات جریان آب که توسط پمپ ایجاد می‌گردد، مستقل نمود.

۵- اتلاف انرژی حرارتی بر اثر مبادله آن با محیط اطراف هیچ‌گونه مشکلی برای این سیستم به وجود نمی‌آورد. زیرا در این سیستم از تغییرات دمای آب برای اندازه‌گیری قدرت راکتور استفاده نشده است. تغییر چگالی آب قلب بر اثر افزایش دما و تأثیر آن بر شمارش سیستم در نمودار درجه‌بندی سیستم در نظر گرفته شده است.

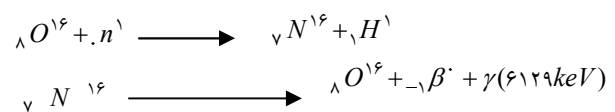
۶- این سیستم به لحاظ سرعت عملی که دارد هر گونه تغییر در قدرت راکتور را بلافاصله ثبت می‌نماید، زیرا با توجه به سرعت گردش آب در چرخه خنک‌کننده قلب راکتور، اثرات تغییر شار نوترون‌های سریع قلب بر فعالیت آب، پس از مدت زمان کمی توسط سیستم ^{16}N مشاهده می‌گردد. این موضوع در مبحث ایمنی راکتور از اهمیت به سزایی برخوردار است. ضمناً با توجه به فرکانس شمارشگر سیستم (۲۰ مگا هرتز)، آهنگ شمارش زیاد برای سیستم هیچ‌گونه مشکلی ایجاد نمی‌نماید.

۳. روش و وسایل اندازه‌گیری

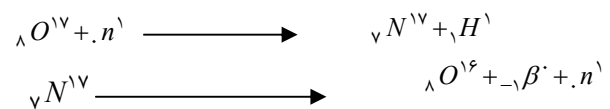
برای بررسی بیناب گامای محیط اطراف لوله خروجی آب خنک‌کننده قلب، از یک سیستم طیف‌نگاری گامای قابل حمل، شامل یک آشکار ساز یدور سدیم به ابعاد $5/08 \text{ cm} \times 5/08 \text{ cm}$ استفاده شده است. با بررسی بیناب چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co مشخص گردید که قدرت تفکیک این آشکارساز برای انرژی 662 keV ، ۱۳٪ و برای

فعالیت ایزوتوپ ^{16}N متناسب با شار نوترون سریع قلب راکتور و بنابر این معیاری از قدرت راکتور خواهد بود. به این ترتیب می‌توان قدرت راکتور را تخمین زد.

استفاده از ^{16}N به عنوان نمایشگر قدرت^۱، بر این اساس استوار است است که فعالیت این ایزوتوپ ناشی از رادیواکتیویته ذاتی، در اثر واکنش $^{16}O(n,p)^{16}N$ در آب خنک‌کننده می‌باشد. پرتو گامای ناشی از واپاشی ^{16}N به دلیل انرژی زیاد به راحتی قابل آشکارسازی می‌باشند. واکنشهای نوترون با اکسیژن موجود در آب به صورت زیر می‌باشد:



واکنش مهم دیگر، واکنش $^{17}O(n,p)^{17}N$ می‌باشد که این واکنش نیز آستانه انرژی ۱۰ MeV دارد [۱، ۲، ۳]. واکنش نوترون با ایزوتوپ ^{17}O به صورت زیر می‌باشد:



اطلاعات مربوط به دو واکنش فوق در جدول ۱ قابل مشاهده است. به دلایل ذکر شده، ایزوتوپ ^{17}N سهم کوچکی از فعالیت ذاتی خنک‌کننده را دارا می‌باشد. به دلیل تفاوت در سطح مقطع این دو واکنش، نسبت دز ^{16}N به ^{17}N برابر ۲۵۷ به ۱ می‌باشد. بنا بر این پرتوزایی ایزوتوپ ^{16}N بیشترین میزان فعالیت مربوط به خنک‌کننده را به خود اختصاص می‌دهد و پرتو گامای آن شاخص تعیین‌کننده قدرت راکتور خواهد بود.

۲. مزیت‌های سیستم نمایشگر قدرت با روش ^{16}N

۱- اندازه‌گیری قدرت توسط سیستم ^{16}N فقط با استفاده از گامای حاصل از تلاشی ایزوتوپ ^{16}N انجام می‌شود و گامای حاصل از ناخالصیها دخالتی در اندازه‌گیری ندارد.

۲- از شار نوترون سریع و تأثیرات آن در آشکارسازی قدرت توسط سیستم استفاده گردیده است. فقط تغییر در قدرت

جدول ۱. اطلاعات مربوط به واکنشهای $^{16}O(n,p)^{16}N$ و $^{17}O(n,p)^{17}N$ [۱].

واکنش	انرژی آستانه (MeV)	نیمه عمر ایزوتوپ تولید شده (ثانیه)	نوع واپاشی	سطح مقطع متوسط واکنش برای بیناب نوترون شکافت (میلی بارن)	درصد فراوانی اکسیژن در آب رآکتور
$^{16}O(n,p)^{16}N$	۱۰	۷/۳۵	$\gamma(6129\text{keV } \%67)$ $\gamma(7115\text{keV } \%5), \beta$	۰/۰۲	۹۹/۸
$^{17}O(n,p)^{17}N$	۱۰	۴/۱۴	Neutron (1 MeV), β	۰/۰۰۷	۰/۰۳۹

گردید. قبل از این کار با استفاده از یک تحلیل گر تک کاناله^۱، تپ‌ساز^۲ و تحلیل گر چند کاناله^۳، پنجره خاصی جهت شمارش پالسهای مربوط به قله‌های انرژی $6/13 \text{ MeV}$ ایزوتوپ ^{16}N تنظیم گردید. این پنجره شامل قله اصلی ایزوتوپ $^{16}N (6/13 \text{ MeV})$ ، $Single\ escape (5/62 \text{ MeV})$ و $Double\ escape (5/11 \text{ MeV})$ می‌باشد. شکل ۲ الکترونیک شمارش را نشان می‌دهد.

۴. بررسی پاسخ سیستم نسبت به تغییرات دما

تأثیر تغییرات دما بر بهره تقویت‌کننده و الکترونیک سیستم و همچنین تأثیر دما بر بهره نوری سوسوزن با قرار دادن سیستم بیناب نگاری در دماهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. این تغییرات چنانچه قابل ملاحظه باشند، می‌توانند در تعداد شمارشهایی که در محدوده تحلیلگر تک کاناله قرار می‌گیرند دخالت کنند و موجب بروز خطا در اندازه‌گیری قدرت گردند. با تغییر دما از حدود 11°C (دمای اتاق در طول شب) تا حدود 26°C (دمای اتاق در گرمترین زمان روز)، تغییرات بهره سیستم بیناب نگاری قابل صرف نظر کردن بود. زیرا در این محدوده دما، تغییرات در حدود $3 \text{ Ch}/^\circ\text{C}$ بود که در مقایسه با عرض پنجره تحلیلگر تک کاناله ناچیز است. جدول ۲ این تغییرات را نشان می‌دهد. چون شرایط لازم برای بررسی اثر تغییر دما بر جابه‌جایی انرژی 6130 keV ایزوتوپ ^{16}N مهیا نبود، لذا اثر تغییرات دما بر انرژی 662 keV ایزوتوپ $^{137} \text{Cs}$ در محیط آزمایشگاه بررسی

انرژی $6132/5 \text{ keV}$ ، 12% می‌باشد. بنابر این، این آشکارساز از قدرت تفکیک لازم جهت تشخیص انرژی ایزوتوپ ^{16}N ، برخوردار است.

جهت مشاهده پرتوهای گامای ایزوتوپ ^{16}N که انرژی آن 6129 keV می‌باشد، ابتدا سیستم طیف‌نگاری از نظر انرژی کالیبره گردید. این کار با استفاده از اندازه‌گیری بیناب پرتوهای گامای چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ غوطه ور در آب انجام شد. انرژی 2230 keV مربوط به گامای آنی هیدروژن حاصل از جذب تابش‌زای نوترونهای حرارتی چشمه $Am-Be$ با آن 4430 keV مربوط به تراز تحریکی کربن در چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ جهت درجه‌بندی انرژی MCA مورد استفاده قرار گرفتند.

پس از درجه‌بندی سیستم، به هنگام کار رآکتور در قدرت $3/5 \text{ MW}$ بیناب گامای محیط اطراف لوله خنک‌کننده مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که با توجه به فعالیت بسیار زیاد محیط اطراف لوله خروجی آب خنک‌کننده قلب رآکتور، قبلاً در مراحل مختلف حفاظ آشکارساز یدور سدیم بهینه‌سازی گردید. این کار به این دلیل انجام شد که آهنگ شمارش سیستم تا حدی کم شود که زمان مرده آشکارساز به مقدار قابل قبولی کاهش یابد و قله‌های انرژی مربوط به ایزوتوپ ^{16}N در مدت زمان کمی قابل مشاهده باشند. بیناب گامای اطراف لوله خروجی آب خنک‌کننده قلب رآکتور در شکل ۱ قابل مشاهده است. با استفاده از یک شمارشگر ارتک 776 ، شمارشهای مربوط به پرتوهای گامای ایزوتوپ ^{16}N ثبت

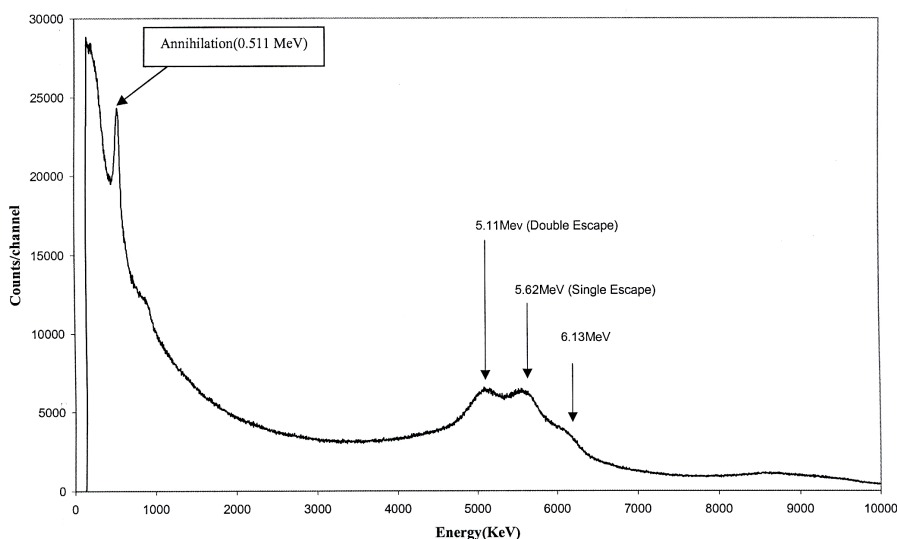
۱. Single Channel Analyzer(SCA)

۲. Research Pulser

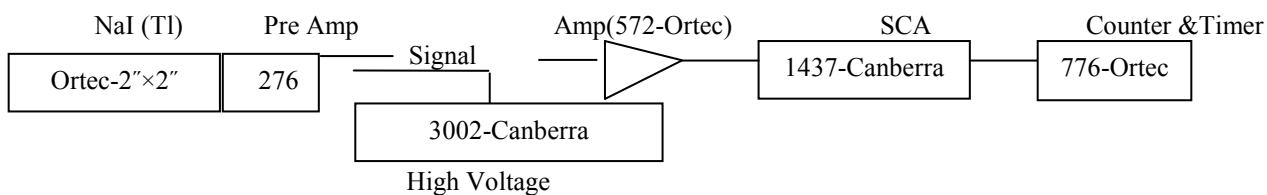
۳. Multi Channel Analyzer(MCA)

جدول ۲. تغییرات مکان کانال مرکزی قله‌های چشمه ^{137}Cs و پالس نسبت به دما

دما (درجه سانتیگراد)	کانال مرکزی قله چشمه $^{137}\text{Cs}(662\text{keV})$	کانال مرکزی قله پالس
۱۰/۸	۸۲۷	۱۴۹۴
۱۱/۳	۸۲۴	۱۵۰۰
۱۳/۳	۸۱۶	۱۵۰۶
۱۵/۰	۸۰۶	۱۵۱۳
۱۸/۰	۸۰۱	۱۵۲۱
۲۰/۰	۷۹۶	۱۵۲۶
۲۶/۲	۷۸۸	۱۵۳۲



شکل ۱. بیناب گامای سیستم ^{16}N در محیط اطراف لوله خروجی آب خنک‌کننده قلب به هنگام کار رآکتور در قدرت $3/5\text{ MW}$ پس از بهینه‌سازی حفاظ آشکارساز یدور سدیم.



شکل ۲. الکترونیک شمارش ^{16}N .

با مقایسه بیناب گامای سیستم در قدرتهای مختلف، هیچ‌گونه جابه‌جایی در انرژی سیستم مشاهده نمی‌شود. شکل ۳ بیناب گامای حاصل از چشمه ^{137}Cs را در دماهای مختلف $10/8^\circ\text{C}$ و $26/2^\circ\text{C}$ نشان می‌دهد. جابه‌جایی قله پالس تأثیرات دما بر الکترونیک سیستم و

گردید. چون این جابه‌جایی با انرژی نسبت تقریباً خطی دارد، جابه‌جایی انرژی 6130 keV ایزوتوپ ^{16}N حدود $28\text{ Ch}^\circ\text{C}$ خواهد بود که هنوز در مقایسه با عرض پنجره شمارش سیستم قابل صرف‌نظر است. ضمناً با توجه به شکل ۵ و

سیستم می‌تواند در هر ثانیه مقدار ۲۰۰/۰۰۰ شمارش را بدون هیچ‌گونه مشکلی انجام دهد. در صورتی که کل سیستم حداکثر ۱۰/۰۰۰ شمارش را در ثانیه ثبت می‌نماید.

در مرحله دوم ارتباط میان کاهش قدرت رآکتور و افزایش دمای آب قلب بررسی گردید. با توجه به اینکه ایجاد هر گونه راکتیویته منفی که به سبب تولید سموم در قلب (زینان، ساماریوم و...) و نیز کاهش ضریب تکثیر بر اثر افزایش دما حاصل می‌شود، توسط میله تنظیم‌کننده قدرت جبران می‌شود، قدرت رآکتور همواره مقداری ثابت است [۴].

در آخرین مرحله ارتباط بین افزایش دمای آب خنک‌کننده در قدرتهای بالاتر و کاهش چگالی آن و در نتیجه افزایش نشت نوترونهاى سریع از قلب و کاهش شمارش سیستم ^{16}N مورد توجه قرار گرفت. کاهش چگالی آب سبب کاهش تعداد اتمهای آب در واحد حجم و بدنبال آن کاهش تعداد واکنش نوترونهاى سریع با اتمهای اکسیژن موجود در آب و نیز نشت بیشتر نوترونهاى سریع از قلب و در نتیجه کاهش تولید ایزوتوپ ^{16}N می‌گردد. از طرف دیگر این موضوع سبب کاهش جرم آب عبوری از مقابل آشکارساز سیستم ^{16}N خواهد گردید. به این ترتیب انتظار می‌رود پس از افزایش قدرت رآکتور تا زمانی که حرارت ایجاد شده به کل آب خنک‌کننده منتقل شده و دمای آب در تمام نقاط آن همگن شود، دمای آب خروجی از قلب به تدریج افزایش یافته و پس از مدتی به مقدار ثابتی برسد. در طول این مدت شمارش سیستم به تدریج کم شده و در نهایت به مقدار ثابتی خواهد رسید. این پدیده در تغییر قدرت با گامهای بزرگتر محسوستر است.

برای اثبات این موضوع به توضیح مراحل آزمایش درجه‌بندی ^{16}N می‌پردازیم. در ابتدای شروع آزمایش، رآکتور در قدرت ۴ مگاوات در حال کار بود و قدرت و دمای آب خروجی مقدار ثابتی بودند. این مقادیر ثبت گردیدند و قدرت رآکتور به ۰/۵ مگاوات کاهش یافت. سپس در قدرتهای ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و

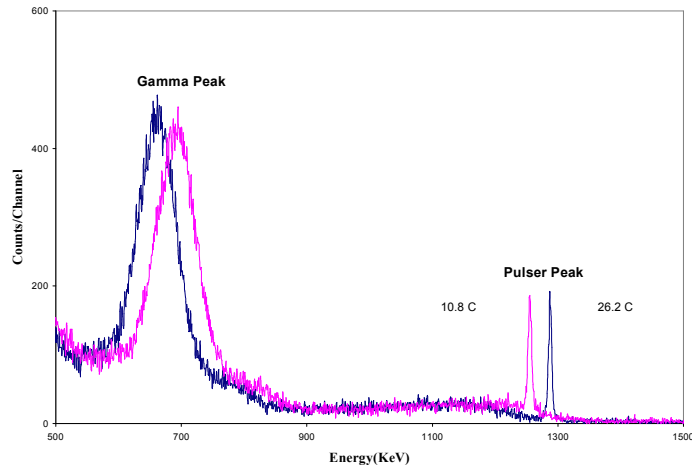
جابه‌جایی قله گاما، تأثیر تغییرات دما بر کل سیستم بیناب‌نگاری شامل سوسوزن، فتو مولتی پلایر و الکترونیک را نشان می‌دهد. در این مرحله سعی گردید تا زمان شمارش بهینه سیستم معین گردد. بنابر این در بازه‌های زمانی ۱، ۲، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ ثانیه با بیست بار تکرار شمارش برای هر بازه زمانی، بررسیهای آماری مربوطه انجام گردید. بازه زمانی ۱۰ ثانیه با توجه به آمار خوب شمارشهای آن و نیز زمان عکس‌العمل کارگردانان رآکتور مناسب تشخیص داده شد.

در نهایت شمارش سیستم ^{16}N در قدرتهای مختلف ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ مگاوات، با تکرار ده بار شمارش برای هر قدرت و میانگین‌گیری از داده‌ها، ثبت گردید. قدرتهای مورد استفاده در این درجه‌بندی توسط روش استفاده از اتافک شکافت با خطای کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. پس از رسم منحنی شمارش بر حسب قدرت می‌توان با برازش یک خط بر نقاط به دست آمده و تعیین معادله این خط در هر زمان با داشتن شمارش سیستم قدرت رآکتور را مشخص نمود. شکل ۴ نمودار مربوط به درجه‌بندی سیستم شمارش ^{16}N را بر حسب قدرت رآکتور نمایش می‌دهد.

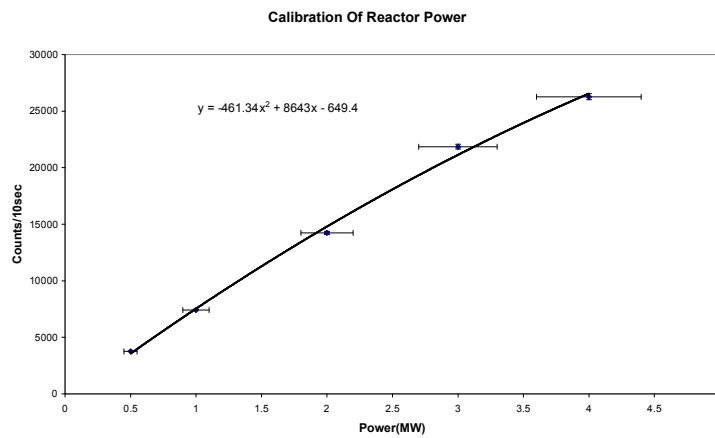
۵. بحث و نتیجه‌گیری

نمودار شکل ۴، نشان می‌دهد که تغییرات شمارش سیستم ^{16}N بر حسب قدرت رآکتور خطی نیست. اندازه‌گیریهای مکرر نشان دادند که نتایج به دست آمده تکرار پذیرند. برای یافتن دلیل این پدیده، در مرحله اول بیناب‌گامای سیستم ^{16}N در قدرتهای مختلف در مقایسه با یکدیگر ثبت گردید (شکل ۵). با توجه به پهنای پنجره شمارش سیستم، هیچ‌گونه جابه‌جایی در محدوده انرژی سیستم مشاهده نشد. بنابر این می‌توان نتیجه گرفت که این کاهش شمارش سیستم در قدرتهای بیشتر و انحراف نمودار درجه‌بندی از حالت خطی هیچ‌گونه ارتباطی با جابه‌جایی انرژی سیستم ندارد.

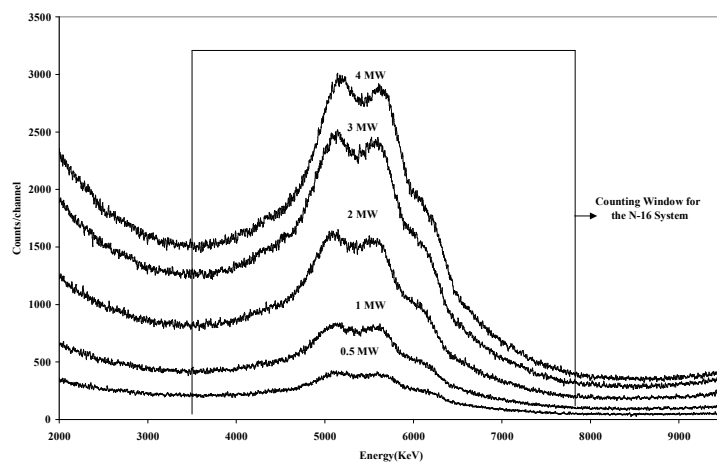
ضمناً با توجه به زمان مرده سیستم شمارش شامل سو سوزن، پیش تقویت‌کننده، تقویت‌کننده، تحلیلگر تک کاناله و شمارشگر که فرکانس آن در حدود پنج میکرو ثانیه است



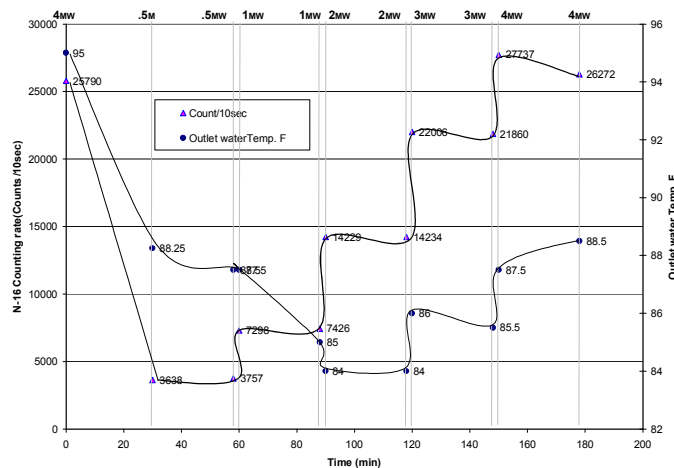
شکل ۳. مقایسه بیناب سیستم برای چشمه ^{137}Cs و پالس در دو دمای ۱۰/۸ و ۲۶/۲ درجه سانتیگراد.



شکل ۴. نمودار درجه بندی سیستم ^{16}N بر حسب قدرت رآکتور.



شکل ۵. بیناب گامای سیستم ^{16}N در قدرتهای مختلف و پنجره شمارش سیستم.



شکل ۶. نمودار تغییرات قدرت، دمای آب خروجی قلب و آهنگ شمارش سیستم N^{16} بر حسب زمان انجام آزمایش.

دمای آب خنک‌کننده بر اثر افزایش قدرت رآکتور سبب کاهش چگالی آب و نیز افزایش نشت نوترونهاي سریع از قلب گردیده و آهنگ شمارش سیستم N^{16} را کاهش می‌دهد.

به هر حال هر چند آهنگ شمارش این سیستم بر حسب قدرت رآکتور در قدرتهای بیشتر از ۱ مگاوات اندکی رفتار غیرخطی دارد، اما هنوز می‌توان با استفاده از این سیستم قدرت رآکتور را در هر لحظه با دقت قابل قبول تخمین زد.

ضمناً با توجه به پاسخ سریع این سیستم نسبت به تغییرات قدرت، وجود چنین سیستمی در کنار سایر سیستمهای تعیین قدرت رآکتور که از سرعت عمل کمتری برخوردارند، به لحاظ ایمنی بسیار با اهمیت است.

تنظیم و درجه‌بندی سیستم از اتاق کنترل رآکتور قابل انجام است و می‌توان آن را توسط کارشناسان گروه فیزیک نوترون و با همکاری گروه کارگردانی رآکتور انجام داد. ضمناً این سیستم باید حداکثر هر دو ماه یکبار مورد بازرسی، تنظیم و درجه‌بندی قرار گیرد.

قدردانی

بر خود لازم می‌دانیم از زحمات ارزنده آقای فرهاد ذنوبی، تکنسین گروه فیزیک نوترون که در تمامی مراحل فنی کار

۴ مگاوات شمارش سیستم N^{16} و همچنین دمای آب خروجی از قلب یکبار در لحظه ابتدای تغییر قدرت و بار دیگر حدود ۲۰ دقیقه پس از تغییر قدرت ثبت گردید. سپس نمودار تغییرات قدرت، شمارش سیستم N^{16} و دمای آب خروجی قلب بر حسب زمان انجام آزمایش رسم گردید (شکل ۶).

پس از تغییر قدرت از ۴ به ۰/۵ مگاوات، دمای آب قلب هنوز همگن نشده بود. بنابر این در این مرحله سیر نزولی دما را شاهد بودیم. قسمتهای تقریباً افقی نمودار شمارشها و دماها را بلافاصله پس از تغییر قدرت و ۲۰ دقیقه پس از آن به هم وصل نموده‌اند. در قسمت نزولی نمودار چون دمای ثانویه از دمای اولیه کمتر است شمارشهای مرحله دوم از مرحله اول بیشتر است (دمای آب هنوز همگن نشده است). ولی در قسمت صعودی نمودار دمای ثانویه از دمای اولیه بیشتر است و شمارشها نیز پس از ۲۰ دقیقه انتظار کاهش یافته‌اند.

ضمناً پس از بازگشت مجدد به قدرت ۴ مگاوات چون هنوز دمای آب ۳۱/۴ درجه سانتیگراد (۸۸/۵ درجه فارنهایت) است و هنوز به دمای ۳۵ درجه سانتیگراد (۹۵ درجه فارنهایت) ابتدای آزمایش نرسیده است، شمارشهای سیستم N^{16} در حدود ۲۶۲۷۲ بوده و پس از مدت زمان مناسب به شمارش ابتدای آزمایش نزدیک خواهد شد. تحلیل ارائه شده نشان می‌دهد که افزایش

کارگردانی رآکتور، همچنین آقایان مستوفی، ولی پور و اسلامی کارگردانان رآکتور و کلیه همکارانی که با راهنماییها و همکاریهای صمیمانه خود، گروه فیزیک نوترون را در انجام این طرح یاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

با ما فعالانه همکاری داشته‌اند، کمال تشکر را ابراز داریم. همچنین از همکارمان آقای مهندس عظیم احمدی نیار به‌خاطر راهنماییهای ارزنده ایشان صمیمانه قدردانی می‌نماییم.

همچنین از آقای مهندس محمد ذاکر، ریاست بخش کارگردانی و تحقیقات رآکتور، آقای آخوندی ریاست گروه

مراجع

1. Lu Yung-shen, "Measurement of reactor power level by a nitrogen-16 monitor", *A thesis in nuclear engineering*, The Pennsylvania State University, The Graduate School, Department of Nuclear Engineering (1964).
2. E Drucker and W D Wallace, *Nuclear Science and Engineering*, **3** (1958) 215-231.
3. W J Henderson and P R Tunnicliffe, *Nuclear Science and Engineering*, **3**(1958) 145-150.
4. John R Lamarsh, " *Introduction to Nuclear Engineering* ", Second ed, Addison-Wesley, (1983).