

آشنایی با آزمایش های فیزیک راکتورهای تحقیقاتی MTR نوعی

تألیف: محمد ارکانی

نیاز دانش

| | |
|-------------------------|--|
| سرشناسه | ارکانی، محمد، ۱۳۶۰ - |
| عنوان و نام پدیدآور | آشنایی با آزمایش‌های فیزیک راکتور تحقیقاتی MTR نوعی / محمد ارکانی. |
| مشخصات نشر | تهران: نیاز دانش، ۱۴۰۳. |
| مشخصات ظاهری | ۱۷۱ص: مصور، جدول، نمودار. |
| شابک | ۹۷۸-۶۲۲-۷۷۹۰-۱۴-۶ |
| وضعیت فهرست نویسی | فیپا |
| یادداشت | کتابنامه: ص. ۱۷۱. |
| موضوع | راکتورهای هسته‌ای Nuclear reactors راکتورهای هسته‌ای -- آزمایش‌ها Nuclear reactors -- Experiments فیزیک هسته‌ای Nuclear physics |
| رده بندی کنگره | TK۹۲۰۲ |
| رده بندی دیویی | ۶۲۱/۴۸۳۲ |
| شماره کتابشناسی ملی | ۹۶۸۸۴۲۶ |
| اطلاعات رکورد کتابشناسی | فیپا |



نیاز دانش

| | |
|----------|--|
| نام کتاب | آشنایی با آزمایش‌های فیزیک راکتورهای تحقیقاتی MTR نوعی |
| مؤلف | محمد ارکانی |
| ناشر | نیاز دانش |
| نوبت چاپ | اول - ۱۴۰۳ |
| شمارگان | ۱۰۰۰ نسخه |
| قیمت | ۱۷۰۰۰۰۰ ریال |

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۷۷۹۰-۱۴-۶

ISBN: 978-622-7790-14-6

هرگونه چاپ و تکثیر (اعم از زیراکس، بازنویسی، ضبط کامپیوتری و تهیه‌ی CD) از محتویات این اثر بدون اجازه‌ی کتبی ناشر ممنوع است. متخلفان به موجب بند ۵ از ماده‌ی ۲ قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان و هنرمندان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

کلیه حقوق این اثر برای ناشر محفوظ است.

آدرس انتشارات: تهران، میدان انقلاب، خیابان ۱۲ فروردین، تقاطع وحید نظری، پلاک ۲۵۵، طبقه ۱، واحد ۲
۰۲۱-۰۶-۶۶۴۷۸۱۰۸-۶۶۴۷۸۱۰۸-۶۶۴۷۸۱۰۷۳۹۳۵-۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵

www.Niaze-Danesh.com

مشاوره جهت نشر: ۰۹۱۲ - ۲۱۰۶۷۰۹

فهرست مطالب

| صفحه | عنوان فصل | شماره فصل |
|------|---|-----------|
| ۱ | آشنایی با روش‌های آماری برای تحلیل داده‌های تجربی | اول |
| ۳۶ | آشنایی با آشکارسازهای هسته‌ای | دوم |
| ۷۱ | معرفی رآکتور تحقیقاتی تهران | سوم |
| ۹۶ | کالیبراسیون میله‌های کنترل با استفاده از روش Inhour | چهارم |
| ۱۰۸ | اندازه‌گیری جرم بحرانی قلب رآکتور | پنجم |
| ۱۱۶ | اندازه‌گیری ضریب راکتیویته خلاء | ششم |
| ۱۲۴ | اندازه‌گیری کل ارزش میله کنترل به روش سقوط میله کنترل | هفتم |
| ۱۲۹ | اندازه‌گیری نقشه شارنوترون در قلب رآکتور | هشتم |
| ۱۴۴ | مسمومیت رآکتور تحقیقاتی تهران | نهم |
| ۱۵۷ | کالیبراسیون قدرت حرارتی به روش کالریمتری | دهم |
| ۱۶۶ | اندازه‌گیری ضریب دمایی راکتیویته قلب رآکتور | یازدهم |

فصل اول: آشنایی با روش‌های آماری برای تحلیل داده‌های تجربی

مقدمه

در نهان داده‌های تجربی، اطلاعات مهمی نهفته و پنهان است. استخراج این اطلاعات به واسطه به کارگیری مدل‌های نظری و روش‌های عددی حل مسایل، ممکن می‌باشد. به علاوه، داده‌های تجربی معمولاً به نوبه و اختلال‌هایی از این دست آغشته هستند. از این رو استخراج صحیح نتایج تجربی بدست آمده مستلزم شناخت این عوامل و تحلیل درستی از خطا^۱ و عدم قطعیت^۲ مسئله می‌باشد. تحلیل داده‌های تجربی نیازمند آگاهی از عوامل بروز خطا، تحلیل خطا، مدل‌های نظری و توزیع‌های آماری مرتبط با مسئله مورد نظر و بعضاً آشنایی با نحوه برازش منحنی بر داده‌های تجربی است. به همین دلیل در این فصل راجع به این موارد نکات مورد نیاز به صورت خلاصه و کاربردی آورده شده‌اند.

۱.۱. خطا

نتیجه هر اندازه‌گیری دارای در بخش اصلی است، مقدار و واحد کمیت مورد نظر، مانند اندازه‌گیری فاصله‌ای به طول ۲ متر. هر اندازه‌گیری همراه با عدم قطعیتی است بدین معنی که هر بار تکرار آزمایش ممکن است نتایج جدیدی را در بر داشته باشد. عدم قطعیت دارای بازه اطمینان^۳ و سطح اطمینان^۴ است. عدم قطعیت در ماهیت خود علم و دانش بشری نهفته است. یعنی نمی‌توان به طور قطع و با اطمینان صد در صد کمیت به‌خصوصی را اندازه‌گیری نمود. فاینمن (فیزیکدان برنده جایزه نوبل سال ۱۹۶۵) می‌گوید، علم نوین بشری به واسطه عدم قطعیت آن توصیف می‌شود. می‌توان آزمایشی را بارها انجام داد و به این ترتیب با متوسط‌گیری نتایج بدست آمده، عدم قطعیت اندازه‌گیری را در گستره‌ای محدودتر کاهش داد. در آزمایش اندازه‌گیری زمان توسط کرنومتر، علی‌رغم آن که این ابزار بسیار دقیق است، نتایج بدست آمده به دلیل پاسخ تاخیری سامانه عصبی انسان (از مقیاس چند ده میلی ثانیه) همراه با خطایی از مقیاس دهم ثانیه است. به عنوان مثال فرض کنید در اندازه‌گیری‌های مکرر توسط کرنومتر، فردی اعداد متفاوتی از بازه‌زمانی مربوطه را به شرح زیر اندازه‌گیری کرده است:

۲٫۳، ۲٫۴، ۲٫۵، ۲٫۴

به‌ترین تقریب از کمیت مورد نظر مقدار متوسط نتایج بدست آمده است که برابر است با ۲٫۴ ثانیه. در شرح نتایج بدست آمده از آزمایش فوق، گستره‌ای که اعداد در آن قرار دارند بین ۲٫۳ و ۲٫۵ ثانیه است. به عبارت دیگر با نگاهی گذرا به نتایج آزمایش فوق متوجه می‌شویم که بازه عدم قطعیت نتایج حدود ± 0.1 ثانیه است. با متوسط‌گیری از داده‌های فوق، به به‌ترین تقریب از نتیجه آزمایش دست می‌یابیم. خطا و عدم قطعیت دو مفهومی هستند که ممکن است بعضاً درک مناسبی از آن‌ها دریافت نشده باشد. خطا تفاضل مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار درست است. خطا قابل حذف نمی‌باشد، ولی می‌توان با دانستن آن و بهره‌گیری از دانش تحلیل خطا به به‌ترین تقریب ممکن از پاسخ مورد نظر دست یافت. هم‌چنین با تعیین میزان عدم قطعیت کمیت مورد نظر، درک به‌تری از نتایج اندازه‌گیری شده می‌توان کسب نمود. عدم قطعیت اطلاعاتی راجع به کیفیت داده‌ها بیان می‌کند و خطا فاصله آن با مقدار درست است.

¹ Error

² Uncertainty

³ Confidence Interval

⁴ Confidence Level

۱.۱.۱. خطای مطلق و خطای نسبی

فرض کنید y مقدار مطلق و Δy خطای مطلق آزمایش است، در این صورت نسبت Δy به y را خطای نسبی می‌نامیم. اجازه دهید با مثالی کمی تفاوت این نوع نمایش خطا را شرح دهیم. فاصله اتم‌ها در شبکه‌ای کریستالی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت که نتیجه حاصله برابر است با 0.10 ± 44.89 نانومتر. در اندازه‌گیری دیگری در مرکز هوا فضای گودارد^۱ وابسته به ناسا^۲، فاصله نقطه مشخصی از زمین تا نقطه مشخصی از ماه برابر با 1 ± 384467 کیلومتر تخمین زده شده است. شکل (۱-۱) نمایی از سامانه مورد نظر را نشان می‌دهد. در آزمایش مربوط به فاصله اتم‌ها در شبکه کریستالی، خطای نسبی حدود $0.0022/0$ است، در حالی که در آزمایش دوم (آزمایش مربوط به فاصله زمین و ماه) علی‌رغم یک کیلومتر خطای مطلق، خطای نسبی حدود $10^{-6} \times 26$ می‌باشد. با این توصیف در می‌یابیم که آزمایش مربوط به اندازه‌گیری فاصله زمین تا ماه، دارای خطای نسبی بسیار کوچک‌تری در مقایسه با آزمایش اول است. از این رو معمول است که میزان عدم قطعیت نتایج تجربی به صورت خطای نسبی گزارش شود. به این ترتیب، صرف نظر از آن که مقدار مطلق نتایج چقدر است، می‌توان خطای نسبی نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه نمود.



شکل (۱-۱) اندازه‌گیری فاصله زمین تا ماه با استفاده از پرتو لیزری در مرکز هوا فضای گودارد در ناسا.

۲.۱.۱. اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم کمیت‌های فیزیکی

اندازه‌گیری طول با استفاده از خط کش و یا متر نواری مثال‌هایی از اندازه‌گیری مستقیم هستند. در اندازه‌گیری مستقیم کمیت مورد اندازه‌گیری مستقیماً با کمیت مبنا یا مرجع مقایسه شده و اندازه‌گیری می‌شود. متغیر خروجی اغلب حس‌گرها^۳ و ادوات الکترونیکی که برای اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی استفاده می‌شوند، جریان و یا اختلاف پتانسیل الکتریکی است. با مشخص بودن ارتباط این کمیت‌ها با کمیت فیزیکی اصلی، طی فرایند تبدیل با استفاده از رابطه‌ای خطی و یا با استفاده از منحنی ارتباط دهنده دو کمیت (جدول مراجعه^۴)، کمیت اصلی اندازه‌گیری می‌شود. به این روش اندازه‌گیری، اندازه‌گیری غیرمستقیم اطلاق

¹ Goddard

² NASA: National Aeronautics and Space Administration

³ Sensors

⁴ Look-up Table

می‌شود. مثال‌های مختلفی از ادواتی که بر این اساس هستند در زندگی روزمره یافت می‌شود، مانند سرعت سنج اتومبیل، دماسنج‌های الکترونیکی، ترازوهای الکترونیکی و غیره.

۳.۱.۱. ارقام با معنی

نتیجه شمارش وقایع گسسته دارای هیچ‌گونه عدم قطعیتی نمی‌باشد (منظور خود شمارش است و نه آزمایش مورد نظر)، در نتیجه تمامی ارقام آن دارای معنی می‌باشند. اما وضع در مورد اعداد اعشاری و کمیت‌های پیوسته متفاوت و پیچیده است. به عنوان مثال عدد $۱۲۳٫۰$ دارای چهار رقم با معنی و عدد $۱۲۳٫۰۰$ دارای پنج رقم با معنی است. عدد $۰٫۰۲۳۰$ دارای سه رقم با معنی است. فرم نمایش علمی اعداد متداول بوده و به عنوان مثال آخرین عدد اعشاری ذکر شده را می‌توان به صورت $۲٫۳۰ \times 10^{-۱۰}$ نمایش داد. چنان‌که در این مثال نیز مشاهده می‌شود، صفرهای بعد از ممیز و قبل از عدد ۲ (در صورتی که عدد اعشاری کوچک‌تر از یک باشد) بدون ارزش است. نمایش علمی اعداد به صورت یک رقم صحیح و در ادامه آن ارقام اعشاری و هم‌چنین توانی از ۱۰ برای عدد مربوطه می‌باشد. ارقام با معنی حتی اگر صفر هم باشند، در نظر گرفته می‌شوند و نشان‌دهنده میزان دقت نتایج گزارش شده هستند.

۴.۱.۱. خطای اندازه‌گیری

- الف - خطای سیستماتیک^۱:** این خطا معمولاً ناشی از سامانه اندازه‌گیری و یا آزمایش‌گر است و اصولاً باید بتوان آن را حذف نمود. معمولاً با اندازه‌گیری‌های مکرر خود را نشان نمی‌دهد. این خطا را خطای "دستگاهی" نیز می‌نامند زیرا عمدتاً ناشی از خود دستگاه و یا ابزارهای استفاده شده در آزمایش است. خطای سیستماتیک چهار نوع است:
- **خطای دستگاه:** در واقع مهم‌ترین نوع خطای سیستماتیک خطای دستگاه می‌باشد. مثلاً با متر فلزی ابعاد میزی را با دقت میلی‌متر اندازه‌گیری می‌کنیم، در حالی که در پایان مشخص می‌شود $۱٫۵$ سانتی‌متر از ابتدای متر بریده شده است (چیزی که اغلب اتفاق می‌افتد). از این‌رو هر بار اندازه‌گیری با این وسیله، به طور سیستماتیک $۱٫۵$ سانتی‌متر اضافه نشان می‌دهد.
 - **خطای مشاهده:** آمپرسنج عقربه‌ای نشان داده شده در شکل (۲-۱) را در نظر بگیرید. از آن‌جا که کل گستره جریان قابل اندازه‌گیری بین مثبت ۸ و منفی ۸ آمپر با تقسیم‌بندی‌های با فاصله یک آمپر مدرج شده، قرایت جریان اندازه‌گیری شده به واسطه مشاهده موقعیت عقربه با دقت $\pm ۰٫۵$ آمپر صورت می‌گیرد. به عنوان مثالی دیگر از خطای مشاهده، شکل (۳-۱) را مورد توجه قرار دهید. چنان‌چه آزمایش‌گر به صورت مایل به صفحه مدرج و عقربه نگاه کند، مقدار قرایت شده همراه با خطا و انحراف خواهد بود.

¹ Systematic Error



شکل (۱-۲) خطای مشاهده هنگام قرابت میزان جریان اندازه گیری شده در مدار، توسط آمپرسنجی عقربه‌ای. صفحه نمایش گر عقربه‌ای با فواصل یک آمپر مدرج شده است، در نتیجه خطای مشاهده نیز از همین حدود است.



شکل (۱-۳) خطای مشاهده هنگام قرابت میزان جریان اندازه گیری شده جاری در مدار، توسط آمپرسنجی عقربه‌ای. صفحه مدرج به صورت مایل قرابت شده است، پس نتیجه اندازه گیری شده همراه با خطای مشاهده نیز می‌باشد.

- **خطای محیط:** هر اثری که محیط بر روی نتایج تجربی بگذارد را خطای محیطی می‌نامیم. ادوات اندازه گیری که اکثراً الکترونیکی هستند به دما یا رطوبت حساس بوده و سبب تغییر پارامترهای داخلی آن‌ها و بعضاً برهم خوردن کالیبراسیون^۱ سامانه مورد نظر می‌شود. مجموعه این اثرها ممکن است سبب بروز خطا در نتایج شود که به آن خطای محیطی اطلاق می‌شود.
- **خطای نظری:** مدل‌سازی آزمایش با تمامی جزئیات در تمام علوم امریست غیر ممکن. یکی از دلایلی که امکان انجام آزمایشی با عدم قطعیت صفر وجود ندارد همین مسئله است. تئوری‌های موجود دانش بشری از توصیف وقایع با تمام جزئیات عاجزند. از این رو حتماً بایستی با فرضیه‌هایی مدل‌های ساده‌سازی شده و قابل حل با دانش زمان خود را ارایه نمود. به همین دلیل بخشی از خطا، خطای مربوط به مدل‌سازی است که قابل حذف نبوده و تنها به واسطه‌ی کاربرد مدل‌های به‌تر می‌توان این بخش از خطا را کاهش داد. صرف نظر کردن از اصطکاک در سقوط آزاد اجسام مثالی از ساده‌سازی در حل مسایل فیزیک نیوتنی است.

^۱ Calibration

ب- خطای اتفاقی (کاتوره‌ای): این خطا به شکل افت و خیزهایی حول مقدار متوسط، خود را نشان می‌دهد. معمولاً روشی که برای کاهش این خطا استفاده می‌شود تکرار آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها به تعداد کافی از کمیت مورد اندازه‌گیری است. عواملی که در بروز این خطا سهیم هستند عبارتند از:

- **خطای مشاهده:** ثبت نتایج آزمایش توسط آزمایش‌گر می‌تواند هر بار دچار خطایی کاتوره‌ای شود. به عنوان مثال در هر بار قرایت تقسیم‌بندی‌های روی صفحه‌ی آمپر سنج، آزمایش‌گر عددی متفاوت را قرایت می‌کند. امروزه در انجام آزمایش‌ها از سامانه‌های جمع‌آوری اطلاعات که بر مبنای رایانه می‌باشند استفاده می‌شود. از این‌رو خطای مشاهده می‌تواند به این ترتیب حذف شود.
- **خطای محیطی:** برخی از عوامل محیطی نیز خود کاتوره‌ای هستند مانند نوفه الکترومغناطیس یا نوسان‌هایی که در برق شهر اتفاق می‌افتد. به این ترتیب نتیجه این نوسان‌های محیطی می‌تواند به شکل خطای کاتوره‌ای در نتایج آزمایش خود را نشان دهد.
- **خطای ذاتی:** برخی از فرایندها ذاتاً کاتوره‌ای هستند مانند واپاشی ایزوتوپی رادیواکتیو. از این‌رو هر اندازه‌گیری و یا تحلیلی از داده‌های این فرایندها، خود نیز کاتوره‌ای است. به عنوان مثال شمارش ذرات گامای گسیل شده از چشمدی در حال واپاشی کوبالت- 60 ، فرایندی ذاتاً کاتوره‌ای است.

بر خلاف خطای سیستماتیک، خطای کاتوره‌ای را می‌توان توسط تحلیل‌های آماری بررسی نمود و ضمن کاهش آن با تکرار نمونه برداری‌ها، مقدار آن را نیز تعیین کرد.

۵.۱.۱. تفاوت خطای سیستماتیک و کاتوره‌ای

خطای سیستماتیک به صورت جابجایی داده‌ها و خطای کاتوره‌ای به صورت پراکندگی داده‌ها خود را نشان می‌دهند. شکل (۴-۱) نشان‌دهنده تفاوت این دو نوع خطا به صورت مصور است. دایره‌ی مرکزی نتیجه‌ی مورد انتظار و درست است. در شکل سمت چپ خطای سیستماتیک سبب انحراف داده‌ها به اطراف دایره‌های بزرگ‌تر شده است. در شکل سمت راست خطای سیستماتیک وجود ندارد ولی وجود خطای کاتوره‌ای سبب پراکندگی داده‌ها حول و حوش مقدار درست آن شده است.

۶.۱.۱. تفاوت بین دقت^۱ و صحت^۲

دماسنجی دیجیتالی را در نظر بگیرید که دما را بر روی نمایش‌گری دیجیتال نشان می‌دهد. این دما سنج به تغییرات کوچک دما حساس بوده و هر گونه افزایش و یا کاهش دما را با پله‌های 0.01 درجه سانتیگراد به نمایش می‌گذارد. حال فرض کنید که حس‌گر این دماسنج در اثر ضربه‌های مکانیکی دچار خرابی شده و دما را با اختلاف زیادی از مقدار واقعی خود، اندازه‌گیری می‌کند. در بخش ۱ از شکل (۵-۱) رفتار این دماسنج به تصویر کشیده شده است. داده‌ها حول و حوش مقداری خاص تجمع دارند ولی همگی آن‌ها از مقدار درست و مورد انتظار دارای انحراف قابل توجهی هستند. در این حالت این دماسنج دقیق است ولی نتایج صحیحی را بدست نمی‌دهد. چنان‌چه حس‌گر این دماسنج را تعمیر و یا تعویض کنیم، علاوه بر دقت، نتایج بدست آمده دارای صحت نیز خواهند بود. بخش ۲ از شکل (۵-۱) نتایج سامانه‌ای را نشان می‌دهد که علاوه بر دقت، دارای صحت نیز

¹ Precision

² Accuracy

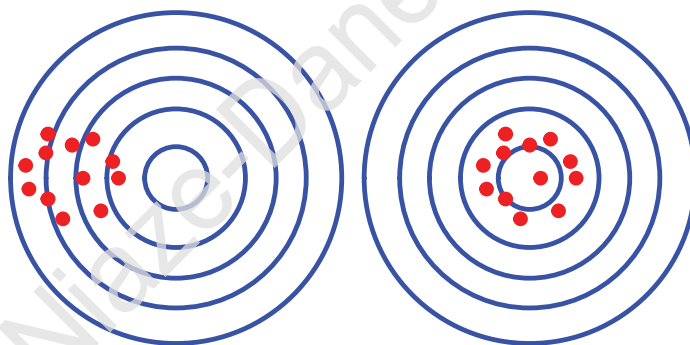
می‌باشد. عکس مثال فوق، دماسنجی است که نتایج را درست نشان می‌دهد ولی دما در پله‌های ۰/۵ درجه سانتیگراد در خروجی به نمایش گذاشته می‌شود. این دماسنج صحیح است ولی دقیق نمی‌باشد. بخش ۳ از شکل (۱-۵) نشان‌دهنده این مطلب می‌باشد. در انتها ابزاری که نه دقت داشته باشد و نه صحت، رفتار نشان داده شده در بخش ۴ از شکل (۱-۵) از آن انتظار می‌رود.

۷.۱.۱. خطا در اعمال محاسباتی

بعد از انجام آزمایش‌ها و یا در حین انجام آن‌ها، رایانه نقشی اساسی در انجام محاسبات مربوطه دارد. به دلیل آن که فضای حافظه اختصاص داده شده به متغیرها در رایانه محدود است، به ناچار قسمتی از اعداد اعشاری که دارای طولی بلندتر از ظرفیت حافظه رایانه می‌باشد، برش داده می‌شود. خطایی که به این ترتیب وارد محاسبات می‌شود را خطای برشی^۱ می‌نامند. برخی از پردازنده‌های پنتیوم اولیه به تراشه‌های جانبی به نام کمک‌پردازنده^۲ مجهز بودند. این تراشه‌های جانبی قبل از برش اعداد، محاسبات را با حافظه‌های با ظرفیت بالاتری انجام می‌دادند (به عنوان مثال محاسبات ۸۰ بیتی اعداد اعشاری^۳) سپس قبل از آن که به صورت ۶۴ بیتی ذخیره شوند، اعداد حاصله با دقت ۶۴ بیت گرد^۴ شده و سپس در حافظه ذخیره می‌شدند. به این خطا در محاسبات کامپیوتری خطای گرد کردن^۵ اطلاق می‌شود. پردازنده‌های امروزی در نهان خود واحدهای کمک پردازنده را دارا می‌باشند.

خطای کاتوره‌ای سبب پراکندگی داده‌ها
حول و حوش مرکز شده است.

علاوه بر آن که داده‌ها دارای پراکندگی هستند،
خطای سیستماتیک باعث انحراف همه آن‌ها از
مرکز شده است



شکل (۱-۴) شکل سمت راست نشان‌دهنده خطای کاتوره‌ای و شکل سمت چپ نشان-
دهنده‌ی خطای سیستماتیک به همراه خطای کاتوره‌ای است.

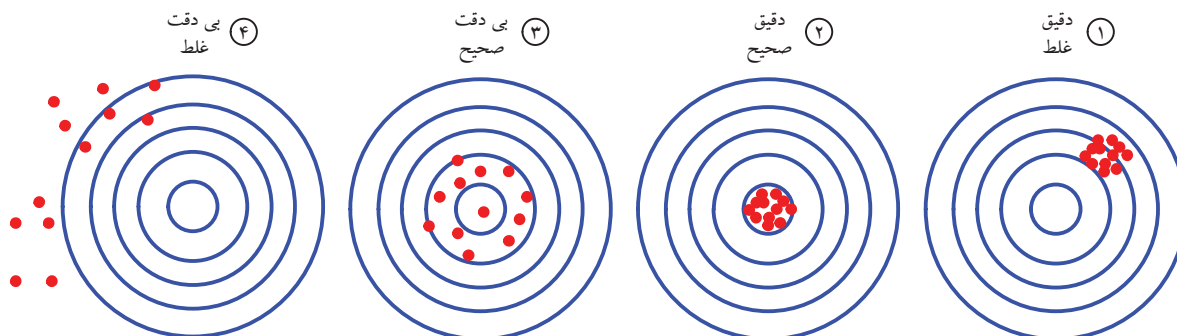
¹ Truncation Error

² Coprocessor

³ Extended Floating Point Operation

⁴ Round

⁵ Round of Error



شکل (۱-۵) مقایسه دو ویژگی دقت و صحت و اثر آنها بر نتایج اندازه گیری شده.

مثال (۱-۱): حاصل تقسیم عدد ۱ بر عدد ۳ را تا سه رقم با معنی گرد کنید:

$$1 \div 3 = 0,333333333333...$$

اگر حاصل را به شکل علمی نمایش دهیم و تا سه رقم با معنی گرد کنیم داریم:

$$3,33 \times 10^{-1}$$

قابل ذکر است گاهی تکرار عمل گرد کردن اعداد به صورت متوالی ممکن است باعث بروز خطا شود. به مثال زیر توجه کنید. عدد ۲,۲۴۹ تا یک رقم اعشار گرد می شود که حاصل آن ۲,۲ است. اگر یک بار تا دو رقم گرد شود (۲,۲۵) و عدد حاصل تا یک رقم اعشار گرد شود در این صورت عدد حاصل برابر خواهد بود با ۲,۳، که با عدد ۲,۲ حاصل گرد کردن عدد اولیه تا یک رقم اعشار متفاوت است.

۸.۱.۱. انتشار خطا^۱

همان طور که در بخش های قبلی با خطای اندازه گیری آشنا شدیم، نتایج تجربی صرف نظر از بعد^۲ آن ها، شامل دو قسمت اصلی، مقدار چشم داشتی (یا به ترین تقریب) و عدم قطعیت کمیت مورد نظر است. فرض کنید دو عدد مختلف که هر یک دارای عدم قطعیت و مقدار چشم داشتی مختص به خود است را با یکدیگر جمع کنیم، نتیجه حاصل چه خواهد شد. خطا یا عدم قطعیتی که بایستی گزارش شود چقدر است؟ اعمال محاسباتی بر روی اعداد با عدم قطعیت های متفاوت سبب انتشار خطا در نتایج می شود. از این رو دانستن نحوه صحیح محاسبه خطای حاصل از عملیات های ریاضی ضروری است. در ابتدا رابطه ای کلی برای محاسبه خطا ارائه می شود و سپس برای چند حالت خاص روابط مفید در جدولی ارائه خواهند شد. اگر فرض کنیم تابع $u(x, y, z, \dots)$ تابع دل خواهی است که در آن متغیرهای x, y, z, \dots متغیرهای کاملاً مستقلی هستند که دارای توزیع پواسون می باشند و هر یک دارای عدم قطعیت مختص به خود هستند، در این صورت می توان با استفاده از رابطه ای زیر که به فرمول انتشار خطا معروف است، میزان عدم قطعیت تابع u را محاسبه نمود.

$$\sigma_u(x, y, z, \dots) = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots} \quad (1-1)$$

¹ Error Propagation

² Dimension

در جدول زیر حالت‌های خاص تابع $u(x,y,z, \dots)$ که در تحلیل مسایل تجربی معمول است در نظر گرفته شده و رابطه انتشار خطا برای تابع مفروض بدست آورده شده است.

جدول (۱-۱) انتشار خطا برای حالت‌های خاصی از تابع u .

| عنوان عملیات ریاضی | $u(x,y,z, \dots)$ | $\sigma_u(x,y,z, \dots)$ |
|---------------------------------|-------------------|---|
| جمع و تفریق | $u = x \pm y$ | $\sigma_u = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ |
| ضرب عدد ثابت A در متغیر x | $u = A x$ | $\sigma_u = A \sigma_x$ |
| تقسیم متغیر x بر عدد ثابت A | $u = \frac{x}{A}$ | $\sigma_u = \frac{\sigma_x}{A}$ |
| ضرب دو متغیر x و y | $u = x y$ | $\frac{\sigma_u}{u} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2}$ |
| تقسیم دو متغیر x و y | $u = \frac{x}{y}$ | $\frac{\sigma_u}{u} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2}$ |

مثال (۱-۲): فرض کنید تعداد N آزمایش مستقل انجام شده و نتایج بدست آمده قرار است متوسط گیری شود. این آزمایش‌ها مستقل بوده ولی دارای شرایط و دقت یکسانی هستند. به عنوان مثال شمارش ذرات گسیل شده از چشمه‌ی رادیواکتیو که نیم-عمر بسیار بزرگی در مقایسه با مدت آزمایش دارد. در همه‌ی آزمایش‌ها بازه‌زمانی شمارش ذرات، ثابت فرض شده است. رابطه‌ای برای خطا و مقدار متوسط یا چشم‌داشتی متغیر x بیابید. اگر دقت آزمایش‌ها یکسان نباشد، در این صورت از چه رابطه‌ای بایستی استفاده شود.

حل: اگر x_i نتیجه در i مین آزمایش باشد، متوسط کمیت مورد نظر از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (1-2)$$

اگر سری صورت کسر فوق را با نماد Σ نام گذاری کنیم، داریم:

$$\Sigma = \sum_{i=1}^N x_i \quad (1-3)$$

در این صورت از توزیع گوسی داریم:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2 + \dots + \sigma_{x_N}^2 = x_1 + x_2 + \dots + x_N = \sum_{i=1}^N x_i = \Sigma \quad (1-4)$$

در نتیجه:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\Sigma} \quad (1-5)$$

همچنین با استفاده از روابط ارایه شده در جدول (۱-۱)، عدم قطعیت \bar{x} به قرار زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_{\Sigma}}{N} = \frac{\sqrt{\Sigma}}{N} = \frac{\sqrt{N\bar{x}}}{N} = \sqrt{\frac{\bar{x}}{N}} \quad (1-6)$$

رابطه (1-6) نشان می‌دهد که اگر بخواهیم دقت را دو برابر کنیم، یعنی بازه عدم قطعیت را به نیم کاهش دهیم، بایستی تعداد دفعات آزمایش را 4 برابر کنیم. البته نتایج فوق با فرض $\sigma_{x_i} = \sqrt{x_i}$ صحیح می‌باشند.

9.1.1. تحلیل خطا برای نتایج تجربی با عدم قطعیت‌های یکسان

حالتی را فرض کنید که آزمایش‌هایی مستقل، با خطایی یکسان، اما دارای توزیعی دل‌خواه انجام شده باشند. در این صورت مقدار چشم‌داشتی \bar{x} از رابطه ساده زیر بدست می‌آید:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1-7)$$

هم‌چنین واریانس¹ \bar{x} نیز توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (1-8)$$

از لحاظ تجربی این رابطه دارای مشکل و محدودیتی خاص است، مقدار واقعی چشم‌داشتی \bar{x} به واسطه متوسط‌گیری بر روی تعداد نامتناهی از نتایج آزمایش‌ها امکان‌پذیر است (در عمل انجام تعداد محدودی از اندازه‌گیری‌ها ممکن است). اثبات می‌شود که اگر از رابطه زیر برای محاسبه واریانس استفاده شود، کاستی فوق بر طرف می‌گردد.

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (1-9)$$

10.1.1. تحلیل خطا برای نتایج تجربی با عدم قطعیت‌های متفاوت

حالتی را فرض کنید که دقت انجام آزمایش‌های متوالی یکسان نباشند. یعنی عوامل بروز خطا که در بخش‌های قبل اشاره شد، در مورد همه‌ی آزمایش‌ها یکسان نیست. در این صورت مقدار چشم‌داشتی متغیر تصادفی x از رابطه (1-10) بدست می‌آید.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N a_i x_i}{\sum_{i=1}^N a_i} \quad (1-10)$$

در رابطه فوق a_i ضریب وزن هر یک از نتایج تجربی است. با فرض بهنجار بودن وزن‌ها، رابطه فوق به شکل زیر ساده می‌شود:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N a_i x_i \quad (1-11)$$

ثابت می‌شود در حالت بهینه، وزن‌های a_i از رابطه زیر بدست می‌آیند:

$$a_i = \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \right)^{-1} \quad (1-12)$$

هم‌چنین عدم قطعیت مقدار چشم‌داشتی \bar{x} نیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

¹ Variance

$$\frac{1}{\sigma_{\bar{x}}^2} = \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \right)^{-1} \quad (1-13)$$

۲.۱. آشنایی با توزیع‌های آماری

خطای کاتوره‌ای بخشی از عدم قطعیت نتایج تجربی است. این نوع خطا قابل بررسی و تحلیل به واسطه توزیع‌های آماری مناسب می‌باشد. به عنوان مثال توزیع شمارش وقایع در خروجی آشکارسازی که متأثر از چشمه واپاشی عنصر رادیواکتیو است، از توزیع پواسون پی‌روی می‌کند. از این‌رو شناخت توزیع‌های آماری به درک درستی از خطا در آزمایش‌های تجربی منجر می‌شود. دو توزیع مهم در اکثر آزمایش‌های هسته‌ای، توزیع‌های پواسون و گوسی هستند که در این بخش به‌طور خلاصه به شرح آن‌ها پرداخته شده است.

۱.۲.۱. توزیع پواسون

اگر در توزیع دو جمله‌ای فرض شود که احتمال وقوع حادثه مورد نظر عددی ثابت و کوچک است، رابطه توصیف کننده توزیع دو جمله‌ای به رابطه زیر ساده می‌شود:

$$P(x) = \frac{(pn)^x e^{-pn}}{x!} \quad (1-14)$$

که در آن:

p : احتمال وقوع حادثه مورد نظر که در توزیع پواسون فرض شده عددی کوچک و ثابت است

n : تعداد دفعات تکرار آزمایش

x : تعداد موفقیت مشاهده شده در n بار تکرار آزمایش

$P(x)$: تابع توزیع احتمال پواسون

با فرض $pn = \bar{x}$ ، این رابطه به صورت زیر ساده می‌شود. رابطه زیر همان شکل آشنای توزیع پواسون است.

$$P(x) = \frac{(\bar{x})^x e^{-\bar{x}}}{x!} \quad (1-15)$$

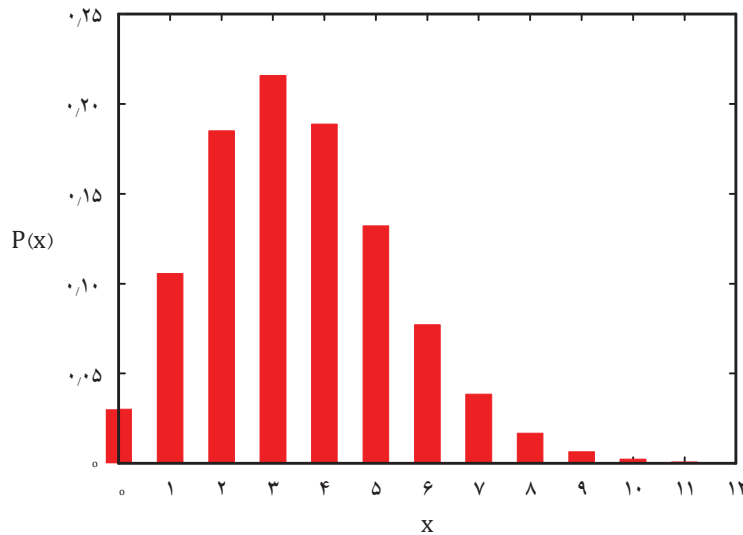
در توزیع پواسون واریانس با مقدار متوسط برابر است. یعنی:

$$\sigma^2 = \bar{x} \quad (1-16)$$

مثال (۳-۱): برنامه‌ای کامپیوتری بنویسید و تابع توزیع پواسون را به ازای $\bar{x} = 3/5$ در بازه $1 < x < 12$ ترسیم کنید.

حل: برنامه زیر در محیط نرم‌افزار متلب، توزیع پواسون با مشخصات فوق را ترسیم می‌کند. شکل (۶-۱) نشان‌دهنده‌ی توزیع پواسون حاصل می‌باشد. قابل ذکر است توزیع پواسون توزیعی گسسته است، از این‌رو مقادیری که به متغیر تصادفی x نسبت داده شده نیز اعدادی صحیح و البته مثبت هستند.

```
X=0: 1: 12;
Xave=3. 5;
Px=(Xave). ^X. *exp(-Xave). /factorial (X);
bar(X, Px);
xlim([0 12]);
```



شکل (۱-۶) توزیع پواسون به ازای $\bar{x} = 3,5$.

۱.۱.۲.۱. تابع توزیع احتمال فاصله زمانی بین وقایع در توزیع پواسون

مثالی ساده از فرایند تصادفی هسته‌ای با تابع توزیع احتمال معلوم، واپاشی ماده رادیواکتیو است. یکی از مشخصه‌های چنین فرایندی، عدم وجود حافظه است. از این رو تابع احتمال وقوع حادثه مورد نظر به آن چه که در گذشته اتفاق افتاده، وابسته نمی‌باشد. می‌دانیم در چنین فرایندی تابع توزیع احتمال، تابع توزیع پواسون است. تا به حال تجربه یا آزمایشی که ثابت کند فرایند واپاشی (که متناظر با آن فرایند آشکارسازی) از توزیع پواسون تبعیت نمی‌کند به انجام نرسیده است. فرض کنید زمان مرده در آشکارساز صفر است، اگر r آهنگ متوسط شمارش و dt فاصله زمانی دیگر آنسیلی باشد، مقدار چشم‌داشتی شمارش در فاصله زمانی dt برابر با $r dt$ خواهد بود. برای بازه زمانی مشخص، t ، متوسط شمارش‌ها برابر با rt است. می‌خواهیم رابطه‌ای برای تابع توزیع احتمال فاصله زمانی بین شمارش‌های متوالی استخراج کنیم. فرض کنید در زمان $t = 0$ حادثه‌ای اتفاق افتاده است. احتمال آن که در بازه زمانی dt و در فاصله زمانی t ، حادثه یا شمارش بعدی اتفاق بیافتد -قدر است؟ به عبارتی دو شرط زیر بایستی محقق گردد. اول آن که تا زمان t شمارشی اتفاق نیافتد و ثانیاً بعد از فاصله زمانی t در بازه dt شمارش بعدی اتفاق بیافتد، یعنی:

$$I_1(t) dt = P(0) \times r dt \quad (1-17)$$

تابع $P(0)$ مستقیماً از تابع توزیع احتمال پواسون بدست می‌آید. اگر مقدار x را در رابطه مربوط به توزیع پواسون برابر با صفر قرار داده شود، یعنی تا زمان t هیچ حادثه‌ای اتفاق نیفتاده باشد، با توجه به آن که آهنگ متوسط شمارش‌ها برابر با rt می‌باشد، خواهیم داشت:

$$P(0) = \frac{(rt)^0 e^{-rt}}{0!} = e^{-rt} \quad (1-18)$$

حال اگر نتیجه فوق را در رابطه (۱-۱۷) قرار دهیم داریم:

$$I(t) dt = e^{-rt} r dt \quad (1-19)$$

هم چنین با انتگرال گیری از تابع $I(t)$ خواهیم داشت:

$$H(t) = \int_0^t I(t) dt = \int_0^t e^{-rt} r dt = r \frac{-1}{r} e^{-rt} \Big|_0^t = 1 - e^{-rt} \quad (1-20)$$

تابع $H(t)$ احتمال آن است که در فاصله‌ی زمانی صفر الی t حادثه‌ای به وقوع بپیوندد. اگر در این رابطه t به سمت صفر میل کند، داریم:

$$\lim_{t \rightarrow 0} H(t) = 0 \quad (1-21)$$

به طور مشابه، حد $H(t)$ وقتی که t به سمت بی‌نهایت میل کند، عبارت است از:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} H(t) = 1 \quad (1-22)$$

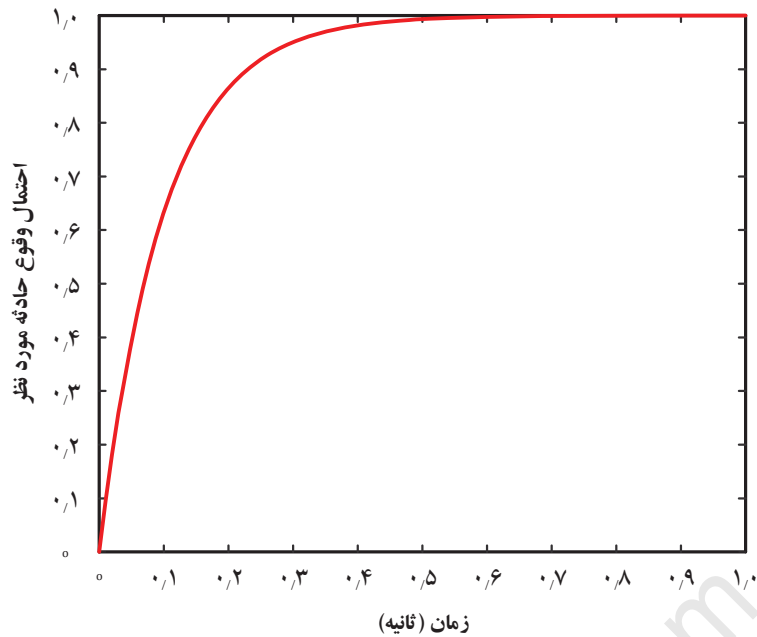
در نتیجه همان طوری که انتظار می‌رود، $H(t)$ محصور بین صفر و یک است، یعنی:

$$0 \leq H(t) \leq 1 \quad (1-23)$$

مثال (۴-۱): برنامه‌ای کامپیوتری بنویسید و توزیع فاصله‌زمانی بین وقایع برای توزیع پواسون با $r=10$ را ترسیم کنید.

حل: برنامه زیر را در محیط نرم‌افزار متلب اجرا کنید، شکل (۷-۱) ترسیم خواهد شد. چنان که مشهود است، محتمل‌ترین فاصله-زمانی بین وقایع متوالی، فاصله‌زمانی صفر است. قابل ذکر است اگر محور عمودی در مقیاس نمایی ترسیم شود، حاصل منحنی‌ای خطی خواهد بود.

```
r=10;
t=0: 0.01: 1;
y=1-exp(-r.*t);
plot(t,y,'-r','LineWidth',2)
xlabel('t')
ylabel('H(t)')
grid on
```

شکل (۱-۷) احتمال وقوع حادثه در زمان‌های مختلف در توزیع پواسون به ازای $r=10$.

مثال (۱-۵): با استفاده از اعداد تصادفی با توزیع احتمال یکنواخت، فاصله‌زمانی بین وقایع متوالی در خروجی آشکارسازی که در معرض چشمه‌ای از نوع واپاشی قرار گرفته است را شبیه‌سازی کنید. آهنگ وقایع مشاهده شده در خروجی آشکارساز برابر با ۱۰۰۰ واقعه در هر ثانیه است. ابتدا روابط ریاضی لازم را نوشته و در انتها با استفاده از برنامه‌نویسی کامپیوتری مسئله را به صورت عددی حل نموده و شبیه‌سازی نمایید. نتایج را در قالب گراف‌های مناسبی نمایش دهید.

حل: اگر پنجره‌زمانی که فرایند واپاشی نظاره می‌شود در مقایسه با نیم-عمر عنصر رادیواکتیو بسیار کوچک باشد، فرایند تصادفی حاصل دارای توزیع پواسون است. از قسمت قبل می‌دانیم تابع چگالی احتمال فاصله‌زمانی بین وقایع متوالی در توزیع پواسون توسط رابطه (۱-۱۹) بیان می‌شود. اگر t_p فاصله‌زمانی تا اولین واقعه بعدی باشد، در این صورت ξ که توسط انتگرال زیر توصیف می‌شود، مقداری بین صفر و یک را اختیار می‌کند. پارامتر ξ همان متغیر تصادفی با تابع توزیع احتمال یکنواخت است.

$$\xi = \int_0^{t_p} e^{-rt'} r dt' = 1 - e^{-rt_p} \quad (1-24)$$

اگر از رابطه فوق t_p را استخراج کنیم، خواهیم داشت:

$$t_p = \frac{1}{r} \ln\left(\frac{1}{1-\xi}\right) \quad (1-25)$$

با توجه به آن که ξ عددی تصادفی بین صفر و یک با توزیع یکنواخت است، $1-\xi$ نیز عددی تصادفی بین صفر و یک با توزیع یکنواخت است. از این رو برای کاهش تعداد عملیات‌های ریاضی و افزایش سرعت محاسبه‌های کامپیوتری می‌توان رابطه فوق را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$t_p = \frac{1}{r} \text{Ln} \left(\frac{1}{\xi} \right) \quad (1-26)$$

با استفاده از رابطه فوق، می توان با تولید اعداد تصادفی بین صفر و یک با توزیع یکنواخت (متغیر تصادفی ξ)، فاصله زمانی تا اولین واقعه با توزیع پواسون، را t_p تعیین نمود. برنامه زیر در محیط نرم افزار مهندسی متلب ۱۰ فاصله زمانی با توزیع پواسون را تولید می کند. خروجی برنامه فوق به همراه مقادیر متناظر ξ در جدول (۱-۲) آورده شده است.

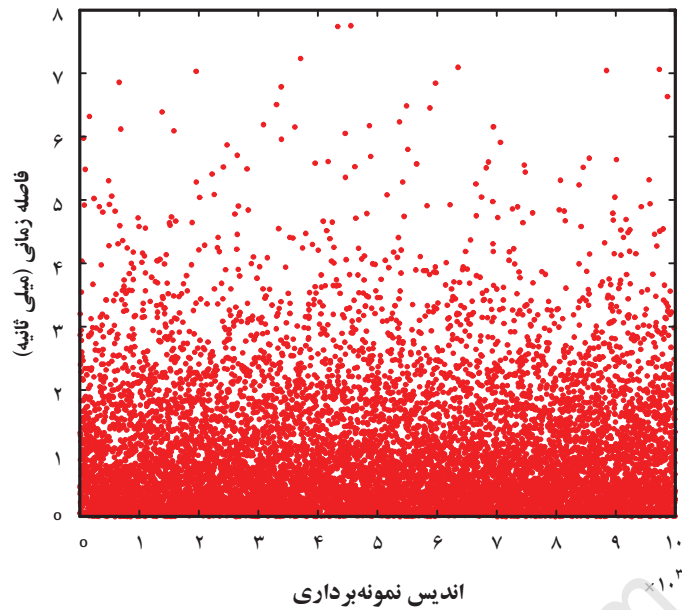
```
r=1000;
Kesi=rand(10,1);
tp=(1/r).*log(1./Kesi);
```

جدول (۱-۲) ده فاصله زمانی برای وقایع متوالی در توزیع پواسون.

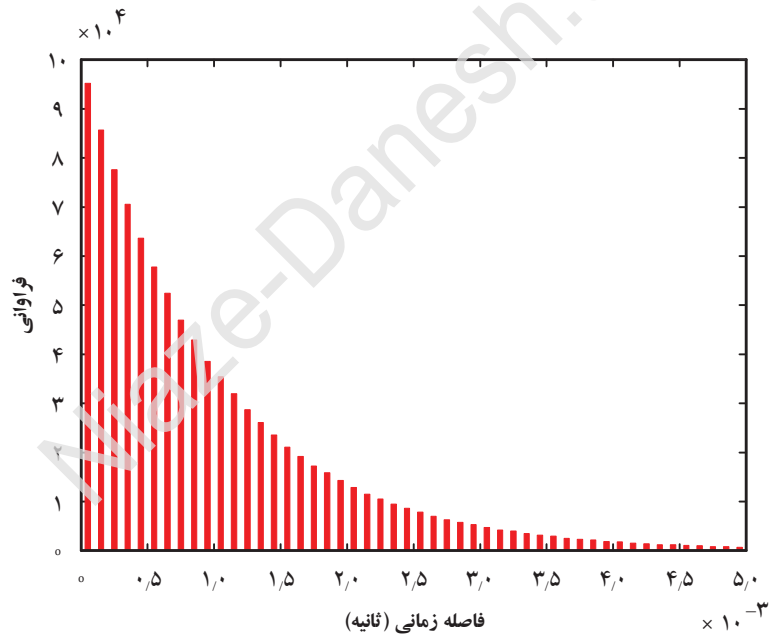
| متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت ξ | فاصله زمانی با توزیع پواسون ($r = 1000$) t_p |
|--|---|
| ۰٫۷۰۶۰۴۶۰۸۸۰۱۹۶۰۹ | ۰٫۰۰۳۴۸۰۷۴۷۶۳۱۳۸۵۴۱ |
| ۰٫۳۱۸۳۲۸۴۶۳۷۷۴۲۰۷ | ۰٫۰۰۳۴۴۷۲۵۶۱۷۳۲۴۹۴ |
| ۰٫۲۷۶۹۲۲۹۸۴۹۶۰۸۹۰ | ۰٫۰۰۱۲۸۴۰۱۵۸۴۴۰۸۵۲ |
| ۰٫۴۶۱۷۱۳۹۰۶۳۱۱۵۳۹ | ۰٫۰۰۳۰۷۵۳۹۶۲۳۱۱۷۰۹ |
| ۰٫۹۷۱۳۱۷۸۱۲۳۵۸۴۷۵ | ۰٫۰۰۲۳۳۱۶۸۶۶۵۳۰۵۷۵۰ |
| ۰٫۸۲۳۴۵۷۸۲۸۳۲۷۲۹۳ | ۰٫۰۰۱۹۴۲۴۲۹۴۰۹۶۴۳۸۹ |
| ۰٫۶۹۴۸۲۸۶۲۲۹۷۵۸۱۷ | ۰٫۰۰۳۶۴۰۹۰۰۴۹۴۷۰۸۹۱ |
| ۰٫۳۱۷۰۹۹۴۸۰۰۶۰۸۶۱ | ۰٫۰۰۱۱۴۸۵۳۹۷۳۷۱۰۸۴۹ |
| ۰٫۹۵۰۲۲۲۰۴۸۱۳۸۳۵۵ | $۵٫۱۰۵۹۵۸۶۰۸۰۱۴۳۵۹ \times 10^{-۱۰}$ |
| ۰٫۳۴۴۴۶۰۸۰۵۰۲۹۰۸۸ | ۰٫۰۰۳۳۶۸۳۶۰۰۶۱۴۹۵۶۴ |

حال یک میلیون فاصله زمانی با توزیع پواسون تولید می کنیم و هیستوگرام نتایج را نیز ترسیم می کنیم (شکل های (۱-۸) و (۱-۹)).

```
r=1000;
Kesi =rand(1e6, 1);
tp=(1/r). *log(1./Kesi);
figure(1)
plot(tp(1: 1e4), ' . k' )
figure(2)
Del T=1e-4;
[Y, X]=hist(tp, Del T/2: Del T: 10e-3);
bar(X, Y)
xlim([0 5e-3])
```



شکل (۱-۸) تعداد ۱۰۰۰۰ فاصله زمانی بین وقایع متوالی در توزیع پواسون.



شکل (۱-۹) هیستوگرام فاصله زمانی ها بین وقایع متوالی در توزیع پواسون که از تحلیل یک میلیون نمونه برداری بدست آمده است.

۲.۲.۱. توزیع گوسی

در تابع توزیع پواسون فرض شده که احتمال وقوع حادثه مورد نظر عددی ثابت و کوچک است. اگر فرض $\bar{X} \geq 20$ نیز علاوه بر فرض های فوق در نظر گرفته شود، توزیع حاصل توزیع گوسی خواهد بود که توسط رابطه زیر توصیف می شود.

$$f(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx \quad (1-27)$$

در این رابطه σ و \bar{x} به ترتیب انحراف از معیار استاندارد و مقدار چشم‌داشتی متغیر تصادفی X می‌باشند. مانند توزیع پواسون رابطه زیر نیز برای توزیع گوسی برقرار است:

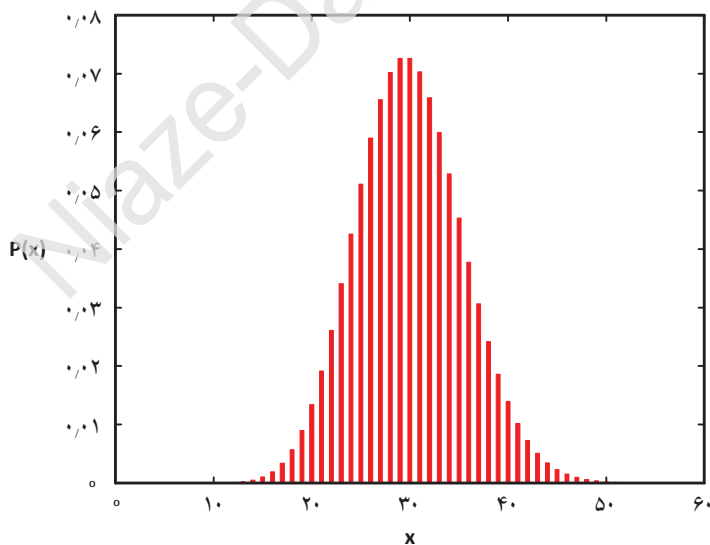
$$\sigma = \sqrt{\bar{x}} \quad (1-28)$$

نظر به ویژگی فوق، فقط با دانستن یکی از پارامترهای این توزیع، \bar{x} ، توزیع گوسی قابل ترسیم است. در ادامه به واسطه چند مثال مختلف، جنبه‌های متفاوتی از این توزیع شرح داده خواهد شد.

مثال (۱-۶): برنامه‌ای کامپیوتری بنویسید و تابع توزیع پواسون را به ازای $\bar{x} = 30$ و $0 < X < 60$ ترسیم کنید. انتظار می‌رود تابع توزیع پواسون به ازای $\bar{x} \geq 20$ به سمت توزیع گوسی میل کند.

حل: برنامه زیر در محیط نرم‌افزار متلب، توزیع پواسون نشان داده شده در شکل (۱-۱۰) را ترسیم می‌کند. این مسئله در مثال (۱-۳) به ازای $\bar{x} = 3/5$ حل شده است. از مقایسه نتایج بدست آمده از مثال (۱-۳) و مثال حاضر، به وضوح مشاهده می‌شود که اگر شرط $\bar{x} \geq 20$ برقرار باشد، تابع توزیع پواسون به سمت تابع توزیع گوسی میل می‌کند.

```
X=0: 1: 12;
Xave=30;
Px=(Xave) . ^X . *exp(-Xave) . /factorial (X);
bar(X, Px);
xlim([0 12]);
```

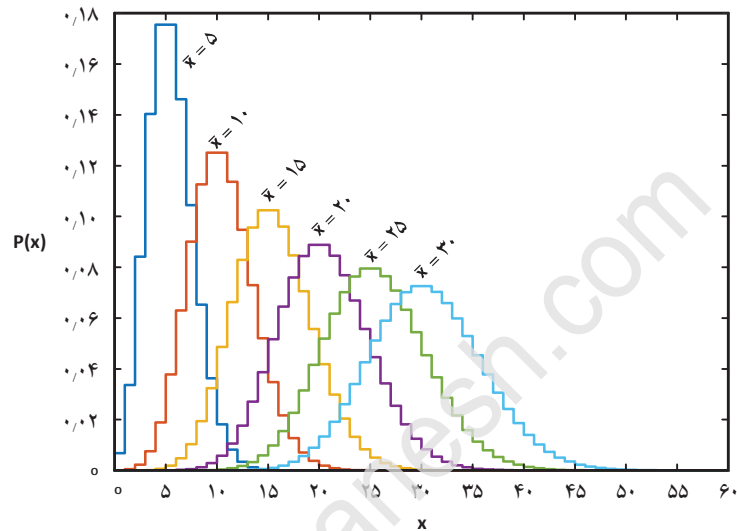


شکل (۱-۱۰) تابع توزیع احتمال پواسون به ازای $\bar{x} = 30$.

با اجرای برنامه زیر در محیط نرم‌افزار متلب، نتایج نشان داده شده در شکل (۱-۱۱) بدست خواهد آمد. در ترسیم این شکل، از دستور stairs استفاده شده و گراف‌ها به صورت پلکانی ترسیم شده‌اند. مقدار متوسط یا چشم‌داشتی متغیر تصادفی X ، شش مقدار

مختلف بین ۵ و ۳۰ اختیار شده است. همان طور که مشاهده می شود هر چقدر مقدار چشم‌داشتی متغیر تصادفی X بزرگ تر باشد، شکل توزیع حاصل متقارن تر شده و به سمت توزیع گوسی تمایل بیش تری پیدا می کند.

```
X=0: 1: 60;
figure(1)
for Xave=5: 5: 30
    Px=(Xave). ^X. *exp(-Xave). /factorial (X);
    stairs(X, Px, ' LineWidth', 2)
    hold on
end
xlim([0 60])
```

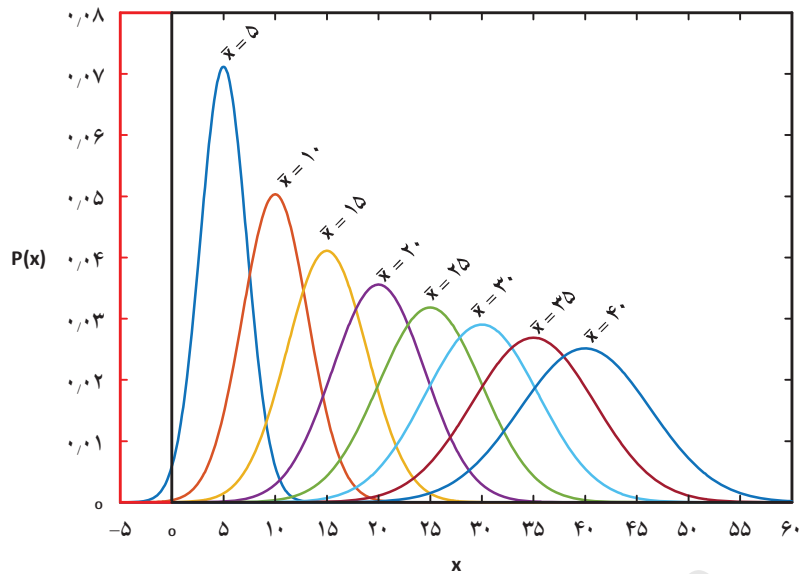


شکل (۱-۱۱) تابع توزیع احتمال پواسون به ازای مقادیر مختلفی از \bar{X} .

مثال (۱-۲): برنامه‌ای کامپیوتری بنویسید و تابع توزیع گوسی را به ازای $\bar{X} = 40$ ترسیم کنید. اگر مقادیر کوچک‌تر از ۴۰ برای \bar{X} اختیار شود، به طوری که فرض اصلی در نظر گرفته شده برای جای‌گزینی توزیع پواسون به جای توزیع گوسی نقض شود، آیا شکل توزیع حاصل حفظ خواهد شد. این مثال را به صورت ترسیمی و با استفاده از کامپیوتر حل کنید.

حل: تابع توزیع گوسی با مقدار چشم‌داشتی برابر با $\bar{X} = 40$ و مقادیر کوچک‌تر از آن توسط برنامه زیر در محیط نرم‌افزار متلب ترسیم شد. توزیع حاصل در شکل (۱-۱۲) آورده شده است. همان طوری که مشاهده می شود، به ازای مقادیر مختلفی از مقدار چشم‌داشتی متغیر X ، شکل توزیع حفظ می شود، اما توجه داشته باشید که در نزدیکی مبدا محور X ها، مقادیر منفی از متغیر X نیز به وضوح مشاهده می شود. در توزیع پواسون، شکل توزیع به ازای مقادیر کوچکی از \bar{X} نامتقارن است، اما در توزیع گوسی، در همه‌ی حالت‌ها شکل توزیع متقارن است.

```
X=-5: 0. 1: 80;
figure(1)
hold on
for Xave=5: 5: 40
    Px=(1/(2*pi *sqrt(Xave))). *exp(-((X-Xave). ^2). /(2. *Xave));
    plot(X, Px, ' LineWidth', 2)
end
xlim([-5 60])
```



شکل (۱-۱۲) توزیع گوسی به ازای مقادیر مختلفی از مقدار چشم‌داشتی متغیر تصادفی x .

۱.۲.۲.۱. توزیع نرمال^۱

حالت خاصی از توزیع گوسی که مقدار چشم‌داشتی و انحراف از معیار استاندارد در آن به ترتیب برابر صفر و یک است را توزیع نرمال یا توزیع گوسی استاندارد^۲ می‌نامند. توزیع گوسی با تغییر متغیر زیر به توزیع نرمال تبدیل می‌شود:

$$S = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (۱-۲۹)$$

با گرفتن دیفرانسیل از S نسبت به x و جای‌گذاری آن در رابطه (۱-۲۷)، رابطه زیر برای توزیع نرمال بدست می‌آید:

$$f(S) dS = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{S^2}{2}} dS \quad (۱-۳۰)$$

نظر به آن که مقدار چشم‌داشتی و انحراف از معیار استاندارد مقادیر ثابت و مشخص هستند، از این‌رو انجام عملیات‌های ریاضی، یا استفاده از جداول از پیش تهیه شده و یا امکان به‌کارگیری برنامه‌های کاربردی رایانه‌ای ممکن می‌باشد. قابل ذکر است برای تبدیل توزیع نرمال به توزیع گوسی دل‌خواه، کفایت $f(S)$ را در انحراف از معیار استاندارد ضرب و با مقدار چشم‌داشتی جمع کنید، یعنی:

$$f(x) = \bar{x} + \sigma f(S) \quad (۱-۳۱)$$

مثال (۱-۸): برنامه‌ای بنویسید که ابتدا ده میلیون عدد تصادفی با توزیع نرمال تولید نموده و سپس با استفاده از رابطه (۱-۳۱)، اعداد تصادفی تولید شده که دارای توزیع نرمال هستند را به اعداد تصادفی با توزیع گوسی با مقدار متوسط ۱۰۰ و انحراف از معیار استاندارد ۱۰ تبدیل نماید. نتایج را در قالب شکل‌هایی ترسیم نمایید.

حل: برنامه کامپیوتری زیر که در محیط نرم‌افزاری متلب نوشته شده است، ابتدا ده میلیون عدد تصادفی با توزیع نرمال تولید کرده و در متغیر S قرار می‌دهد. سپس هیستوگرام نتایج را در پنجره‌ای با نام figure 1 نمایش می‌دهد. در مرحله بعد توزیع نرمال

^۱ Normal Distribution

^۲ Standard Gaussian Distribution

بدست آمده را به توزیع گوسی با انحراف از معیار استاندارد ۱۰ و مقدار چشم‌داشتی ۱۰۰ تبدیل می‌کند. در انتها نیز نتایج در پنجره‌ای با نام figure 2 ترسیم می‌شود (شکل‌های (۱-۱۳) و (۱-۱۴)).

```

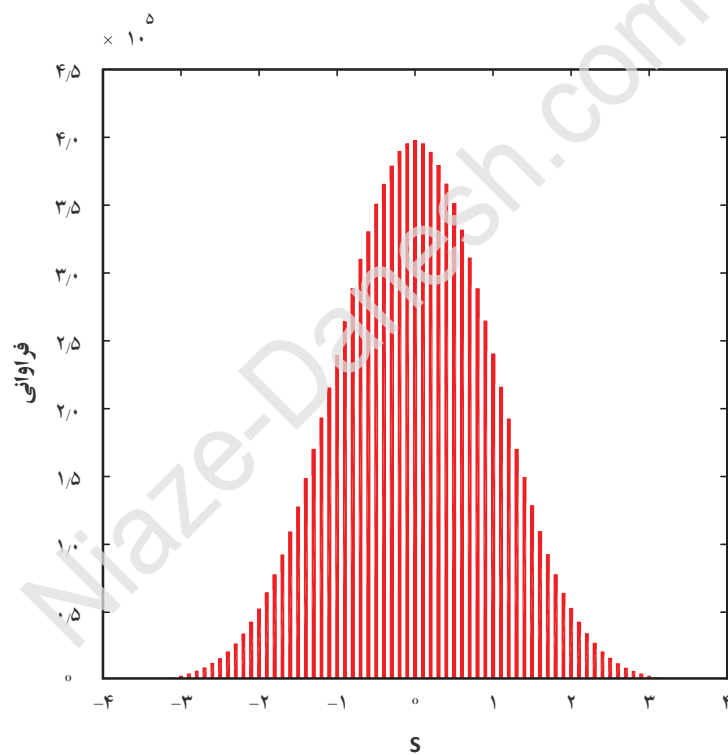
N=10e6;
s=randn(1, N);

figure(1)
hist(s, -5: 0.1: 5)
xlim([-4 4])
ylim([0 4.5e5])

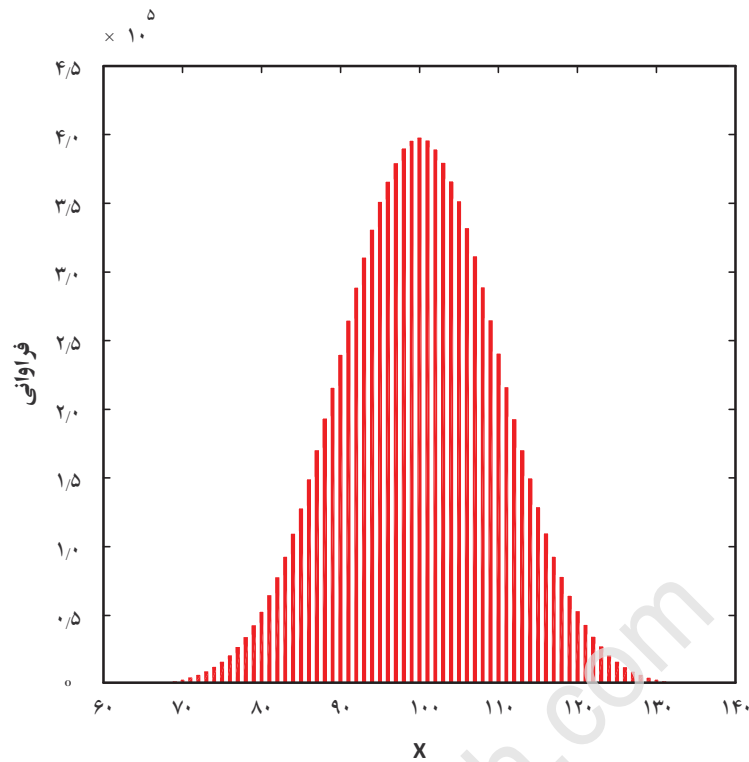
figure(2)
Xbar=100;
Sigma=10;

x=Sigma*s+Xbar;
hist(x, 40: 1: 160)
xlim([60 140])
ylim([0 4.5e5])

```



شکل (۱-۱۳) توزیع گوسی به ازای مقادیر $\bar{X}=0$ و $\sigma=1$.



شکل (۱-۱۴) توزیع گوسی به ازای مقادیر $\bar{X}=100$ و $\sigma=10$.

۳.۲.۱. سطح اطمینان^۱

در عمل امکان انجام تعداد نامتناهی از اندازه گیری‌ها وجود ندارد، در نتیجه نتایج بدست آمده دارای سطح اطمینان مختص به خود است. به طوری که نتایج حاصل در گستره به خصوصی با سطح اطمینان مشخصی گزارش می‌شود. هر چه گستره‌ای که احتمال می‌رود نتیجه درست در آن قرار داشته باشد وسیع تر انتخاب گردد، سطح اطمینان از نتایج گزارش شده نیز بالاتر می‌رود. معمولاً توزیع اندازه گیری شده، تقریبی از توزیع درست است. توزیع درست با انجام تعداد نامتناهی از آزمایش‌ها بدست می‌آید. فرض کنید به ترین تقریب از کمیت X برابر با \bar{X} است. اگر گستره‌ای که در آن این کمیت گزارش شده است از X_1 تا X_2 باشد، در این صورت X_1 و X_2 محدوده اطمینان^۲ و $X_2 - X_1$ را بازه اطمینان^۳ می‌نامند. اگر فرض کنیم $p(x)$ تابع توزیع احتمال برای پراکندگی کمیت X حول به ترین تقریب آن باشد (منظور از به ترین تقریب مقدار چشم‌داشتی یا همان متوسط کمیت X است) در این صورت α که دارای تعریفی به صورت زیر است، سطح اطمینان کمیت X می‌باشد.

$$\alpha = \int_{x_1}^{x_2} p(x') dx' \quad (1-32)$$

اگر حدود اطمینان متقارن باشند، در این صورت می‌توان رابطه فوق را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\alpha = \int_{\bar{x} - (x_2 - x_1)}^{\bar{x} + (x_2 - x_1)} p(x') dx' \quad (1-33)$$

¹ Confidence Level
² Confidence Limits
³ Confidence Interval

با فرض آن که تابع توزیع احتمال تجمعی^۱ کمیت x ، $P(x)$ است، در این صورت می توان رابطه فوق را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\alpha \equiv P\{x_1 < x \leq x_2\} = P(x_2) - P(x_1) \quad (1-34)$$

قابل ذکر است اگر توزیع $p(x)$ توزیعی گوسی باشد، در این صورت می توان با ترکیب روابط (۱-۲۷) و (۱-۳۳) به رابطه زیر دست یافت:

$$\alpha = \int_{\bar{x}-Z\sigma}^{\bar{x}+Z\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx \quad (1-35)$$

تمامی نمادهای به کار گرفته شده در این رابطه به جزء Z ، دارای تعریف های مشابه به آن چه در گذشته ارایه شده، هستند. در این رابطه پارامتر Z عددی صحیح است و با بازه اطمینان دارای رابطه ای به صورت زیر است:

$$x_2 - x_1 = 2Z\sigma \quad (1-36)$$

اگر Z برابر یک باشد، در اصطلاح بازه اطمینان را معیار یک سیگما می گویند. برای Z برابر با دو نیز معیار دو سیگما و به طور مشابه برای مقادیر بالاتر نیز به همین ترتیب. معمولاً سطح اطمینان علاوه بر نام گذاری فوق (معیار یک سیگما، دو سیگما، و...)، به صورت درصد نیز بیان می شود. در مثالی که در ادامه آورده شده است، انتگرال (۱-۳۵) برای Z برابر با یک به صورت عددی حل شده و در خروجی برنامه سطح اطمینان بر حسب درصد بیان شده است.

مثال (۱-۹): انتگرال (۱-۳۵) را با استفاده از برنامه نویسی کامپیوتری به صورت عددی برای $Z=1$ حل نمایید و مقدار α را بر حسب درصد بیان کنید. برنامه را برای مقادیر مختلفی از Z نیز اجرا نموده و نتایج را در جدولی گزارش نمایید.

حل: برنامه زیر در محیط نرم افزار متلب پاسخ این مثال است. در این برنامه مقدار \bar{x} برابر ۵۰۰ فرض شده که البته هر مقداری می تواند اختیار شود و بر نتیجه حاصل اثر گذار نمی باشد. انتگرال مربوطه نیز به صورت سمبولیک حل شده و در انتها با مقدار دهی به پارامترهای مربوطه نتایج محاسبه شده اند.

```
syms x Z Xbar Si gma
P=(1/(Si gma*sqrt(2*pi)))*exp(-(x-Xbar)^2/(2*Si gma^2));
di sp(' P = ')
pretty(P)
di sp(' ')
di sp(' ')
di sp(' ')
di sp(' ')
Al pha=int(P, (Xbar-Si gma*Z), (Xbar+Si gma*Z));
di sp(' Al pha = ')
pretty(Al pha)
di sp(' ')
di sp(' ')
di sp(' ')
Al pha=subs(Al pha, Z, 1);
Al pha=subs(Al pha, Si gma, 1);
```

^۱ PDF: Probabilty Density Function

di sp(['Al pha = ' num2str(doubl e(round(Al pha*1000000))/10000)])

اجرای برنامه فوق نتایج زیر را در پنجره Command Window نرم افزار متلب چاپ می کند. جدول (۳-۱) نشان دهنده درصد سطح اطمینان به ازای مقادیر مختلفی از پارامتر Z می باشد.

$$P = \frac{\exp\left[-\frac{(\bar{X} - x)^2}{2 \text{Si gma}^2}\right]}{5644425081792261 \text{ Si gma}}$$

$$\text{Al pha} = \frac{\sqrt{2} \text{Si gma} Z \sqrt{\frac{1}{\text{Si gma}^2}}}{\sqrt{2} \sqrt{\pi} \text{erf}\left[\frac{1}{2 \text{Si gma}}\right]} \frac{2251799813685248}{5644425081792261 \text{ Si gma} \sqrt{\frac{1}{\text{Si gma}^2}}}$$

Al pha = 68.2689

جدول (۳-۱) درصد سطح اطمینان به ازای مقادیر مختلفی از پارامتر Z.

| اصطلاح رایج | درصد سطح اطمینان | محدوده اطمینان | بازه اطمینان | پارامتر Z |
|------------------|------------------|-----------------------|---------------|-----------|
| معیار یک سیگما | ۶۸,۲۶۸۹ | $\bar{x} \pm \sigma$ | $\pm \sigma$ | ۱ |
| معیار دو سیگما | ۹۵,۴۵۰۰ | $\bar{x} \pm 2\sigma$ | $\pm 2\sigma$ | ۲ |
| معیار سه سیگما | ۹۹,۷۳۰۰ | $\bar{x} \pm 3\sigma$ | $\pm 3\sigma$ | ۳ |
| معیار چهار سیگما | ۹۹,۹۹۳۷ | $\bar{x} \pm 4\sigma$ | $\pm 4\sigma$ | ۴ |
| معیار پنج سیگما | ۹۹,۹۹۹۹ | $\bar{x} \pm 5\sigma$ | $\pm 5\sigma$ | ۵ |

۳.۱. بوازش منحنی^۱

تصور کنید قدرت رآکتوری هسته ای که دارای تغییرات سینوسی نسبت به زمان است در آزمایشی ثبت می شود. در این آزمایش، داده های تجربی با استفاده از سامانه جمع آوری اطلاعات به خصوصی در رایانه در بازه های زمانی ثابت ثبت و ذخیره می شود. سیگنالی که توسط سامانه فوق نمونه برداری می شود آغشته به نوفه با توزیع نرمال است. اگر نتیجه آزمایش فوق دامنه و بسامد علامت سینوسی فوق باشد، چگونه این اطلاعات از نتایج تجربی فوق استخراج شود. با فرض این که یک ثانیه از تغییرات قدرت رآکتور نمونه برداری شده است، در این صورت با ثبت داده ها در بازه های زمانی یک میلی ثانیه، ۱۰۰۰ داده تجربی در مدت یک ثانیه جمع آوری می شود. چگونگی تحلیل این داده ها برای استخراج نتایج مورد انتظار سوالی است که در این بخش به آن پاسخ

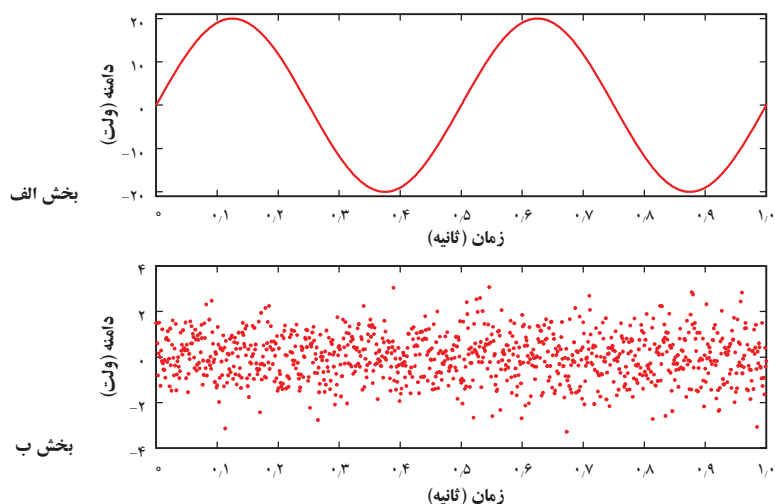
¹ Curve Fitting

داده می‌شود. در ادامه مثال‌هایی با کاربردهایی از نرم‌افزار مهندسی متلب آورده شده که علاوه بر آموزش بخش‌هایی از نرم‌افزار فوق که برای برازش منحنی استفاده می‌شود، به درک به‌تر مسئله فوق کمک شایان توجهی می‌نماید.

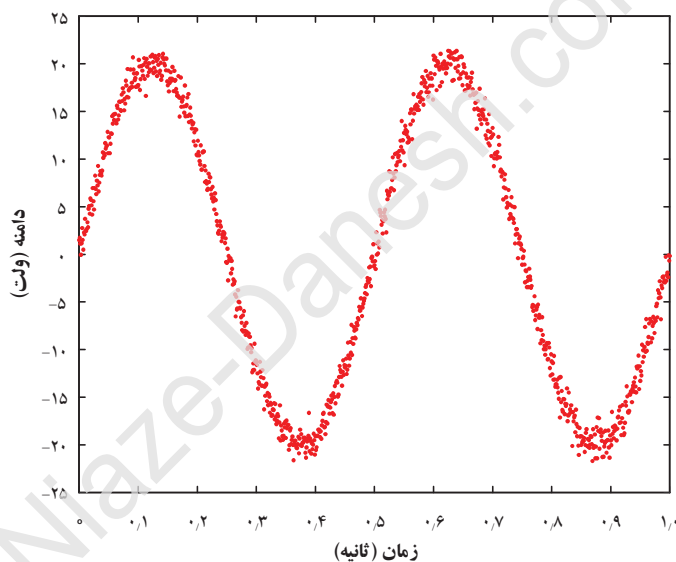
مثال (۱-۱۰): با استفاده از برنامه‌نویسی کامپیوتری، داده‌های آزمایشی را به صورت مصنوعی تولید کنید که دارای شرایطی به شرح آورده شده در ادامه باشد. علامتی که نماینده قدرت رآکتور است دارای بسامد دو هرتز و دامنه ۲۰ ولت است. این سیگنال به نوفه با توزیع نرمال آغشته است. سامانه جمع‌آوری اطلاعات دارای آهنگ نمونه‌برداری ۱۰۰۰ نمونه در هر ثانیه است.

حل: برنامه کامپیوتری زیر نتایج آزمایش فوق را شبیه‌سازی می‌کند. در خط اول، زمان در بازه‌های یک میلی‌ثانیه گسسته‌سازی شده است. متغیر f که نماینده بسامد می‌باشد برابر دو هرتز قرار داده شده و در نتیجه سیگنال سینوسی پایه که V_{Sine} نام گذاری شده به این ترتیب در خط چهارم تولید شده است. نوفه با توزیع نرمال در خط پنجم ایجاد شده و در نهایت سیگنال قدرت رآکتور در خط ششم از جمع نوفه و سیگنال سینوسی پایه بدست آمده است. مابقی دستورات، نتیجه فوق را ترسیم می‌کند. در شکل (۱-۱۵)، سیگنال سینوسی پایه، نوفه مصنوعی تولید شده و در شکل و (۱-۱۶) نیز سیگنال سینوسی آغشته به نوفه نشان داده شده است. معمولاً داده‌های تجربی به نوفه آغشته هستند. از این‌رو استخراج نتایج مورد انتظار به واسطه به‌کارگیری روش‌های برازش منحنی صورت می‌پذیرد. در مثال بعدی، با استفاده از نرم‌افزار متلب داده‌هایی که در این مثال به صورت مصنوعی تولید شد، تحلیل شده و دامنه و بسامد سیگنال سینوسی اصلی با استفاده از برازش منحنی استخراج می‌شود.

```
t=0: 0. 001: 1;
f=2;
w=2*pi *f;
V_Si ne=20. *si n(w*t);
Normal _Noi se=randn(1, length(t));
V=Normal _Noi se+V_Si ne;
figure(1)
subplot(2, 1, 1)
plot(t, V_Si ne, ' -r' , ' LineWidth', 2)
ylim([-21 21])
subplot(2, 1, 2)
plot(t, Normal _Noi se, ' -r')
ylim([-4 4])
figure(2)
plot(t, V, ' -r')
```



شکل (۱-۱۵) بخش الف از شکل فوق علامت سینوسی نماینده قدرت رآکتور هسته‌ای می‌باشد. در بخش ب از شکل فوق، نوفه با توزیع نرمال ترسیم شده است.



شکل (۱-۱۶) داده‌های آغشته به نوفه شبیه‌سازی شده.

مثال (۱-۱۱): برنامه‌ای کامپیوتری بنویسید که داده‌های تولید شده در مثال قبل را با استفاده از برازش منحنی تحلیل نموده و دامنه و بسامد سیگنال سینوسی اصلی را استخراج نماید.

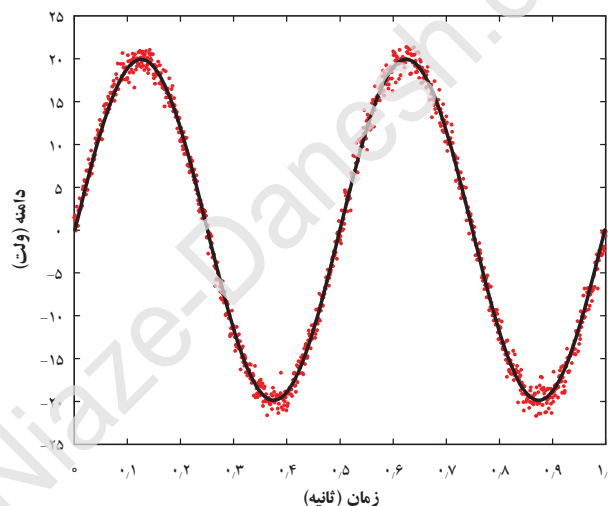
حل: یکی از قابلیت‌های مفید نرم‌افزار متلب، برازش منحنی است. برازش منحنی در نرم‌افزار متلب از دو طریق مختلف قابل انجام است، برنامه نویسی ساخت یافته یا در اصطلاح نوشتن m فایل و هم‌چنین از طریق رابط گرافیکی که cftool نام دارد قابل انجام است. برنامه زیر در محیط نرم‌افزار متلب با دریافت دو ماتریس ستونی زمان و علامت سینوسی آغشته به نوفه که در مثال قبل تولید شد، تابع $A \times \sin(\omega x)$ را بر آن برازش می‌نماید. پارامتر ω سرعت زاویه‌ای است که برابر با $2\pi f$ می‌باشد. قابل ذکر است، x پارامتر پیش فرض برای متغیر مستقل در نرم‌افزار متلب است، یعنی همان زمان یا t در مثال قبل. در خط اول از این برنامه،

در گزینه Fit_Options ویژگی‌های برازش مشخص شده است، که می‌توان به حد بالا، حد پایین، نقطه شروع یا حدس اولیه پارامترهای برازش منحنی^۱، و روشی که برای برازش مورد استفاده قرار می‌گیرد اشاره نمود. در دستور Fit_Type شکل یا ریخت منحنی که قرار است بر داده‌ها برازش شود به همراه نام Fit_Options به عنوان ویژگی‌های برازش به نرم‌افزار داده می‌شود. در نهایت توسط دستور بعدی، برازش منحنی بر داده‌های ماتریس‌های ستونی 't' و 'V' به ترتیب به عنوان متغیرهای مستقل و وابسته انجام می‌شود. حاصل تحلیل فوق در متغیرهای Fitting_Status و Parameters قرار داده می‌شود. دستورهای بعدی، منحنی برازش شده و علامت سینوسی آغشته به نوفه را ترسیم می‌نماید. در شکل (۱۷-۱) نتایج بدست آمده از برنامه فوق ترسیم شده است.

```
Fit_Options = fitoptions('Method','NonlinearLeastSquares',...
    'Lower',[0.1,0.1],...
    'Upper',[30,20],...
    'StartPoint',[20 10]);
Fit_Type = filetype('A*sin(W*x)', 'options', Fit_Options);
[Parameters, Fitting_Status] = fit(t',V',Fit_Type)
```

```
A=Parameters.A;
f=Parameters.W/(2*pi)
V_Fitted=A.*sin(2.*pi.*f.*t);
```

```
figure(3)
plot(t,V','r',t,V_Fitted,'-k','LineWidth',2)
```



شکل (۱۷-۱) داده‌های آغشته به نوفه شبیه‌سازی شده به همراه منحنی برازش شده بر آن‌ها.

حال اگر به Command Window نرم‌افزار متلب مراجعه کنید، نتایج زیر چاپ شده است. در نرم‌افزار متلب به طور پیش فرض نتایج با سطح اطمینان ۹۵ درصد چاپ می‌شوند. در جلوی پارامترهای برازش منحنی، پارامترهای A و ω ، اعداد آورده شده در پرانتزها، محدوده این پارامترها با سطح اطمینان ۹۵ درصد می‌باشد. هر چقدر منحنی برازش شده به داده‌های مورد نظر شباهت بیشتری داشته باشد، rsquare به یک نزدیک‌تر خواهد بود. در نتیجه این پارامتر نماینده وضعیت برازش^۲ یا خوبی برازش^۳ است. در این مثال، خوبی برازش برابر با ۰٫۹۹۵۲ می‌باشد. خواننده می‌تواند به راهنمای^۴ نرم‌افزار متلب برای کسب اطلاعات بیشتر

¹ Curve Fitting Parameters

² Fitting Status

³ Goodness of Fit

⁴ Help

مراجعه نماید. آخرین نتیجه چاپ شده بسامد سیگنال سینوسی اصلی است. به ترین تقریب از این پارامتر برابر با ۱,۹۹۹۷ هرتر از برازش منحنی بدست آمده است (مقدار درست این پارامتر از مثال قبل برابر با دو هرتر است).

Parameters =

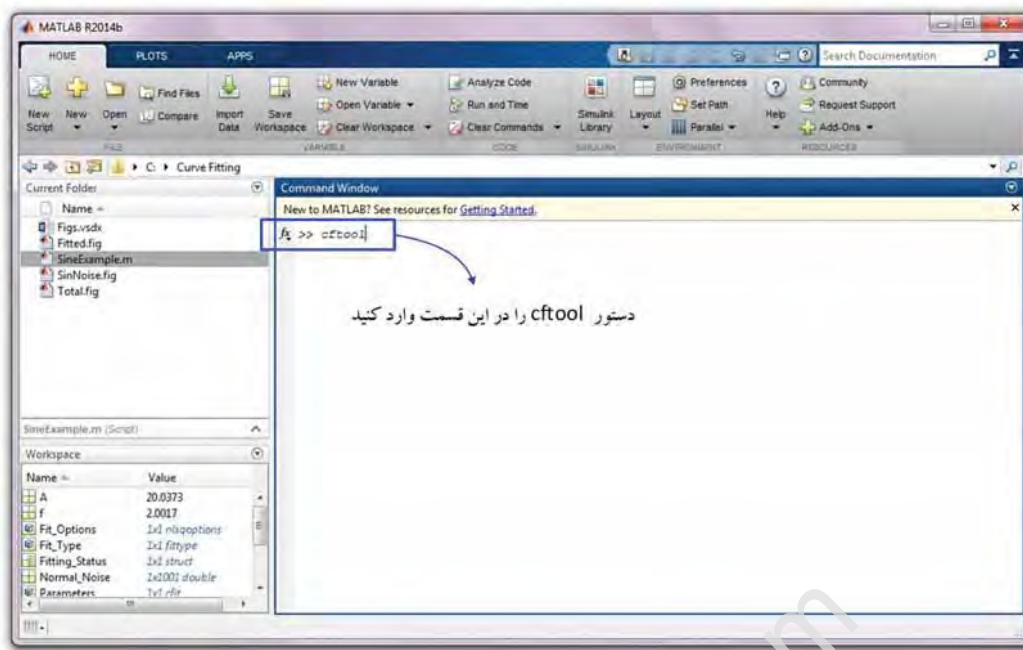
General model :
Parameters(x) = A*sin(W*x)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 19.96 (19.87, 20.04)
W = 12.56 (12.56, 12.57)

Fitting_Status =

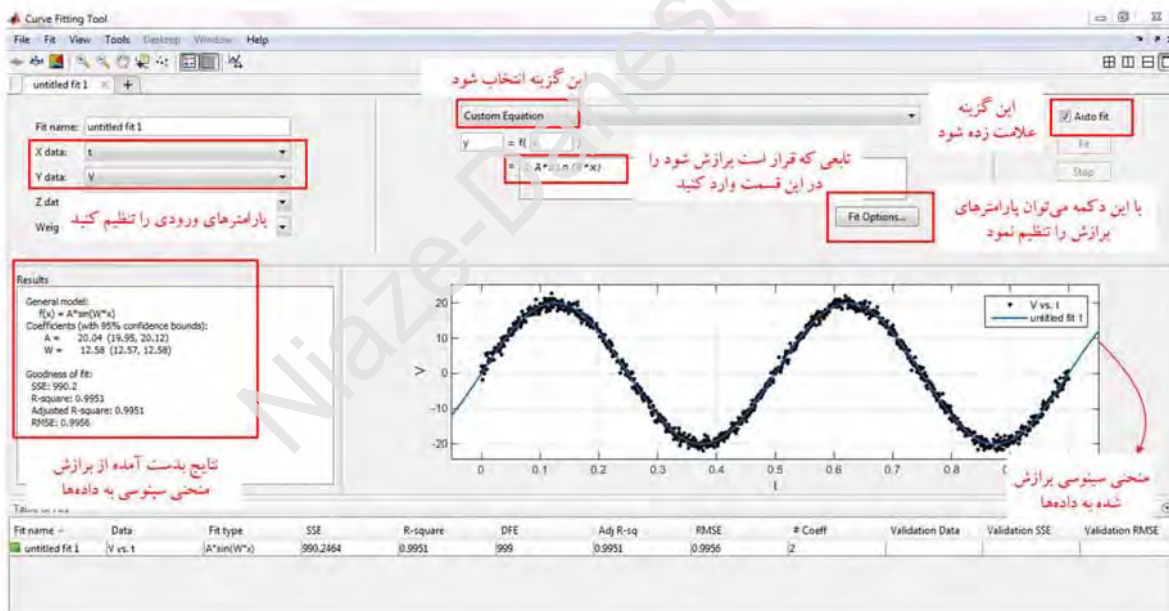
sse: 967.2304
rsquare: 0.9952
dfe: 999
adjrsquare: 0.9952
rmse: 0.9840

f =
1.9997

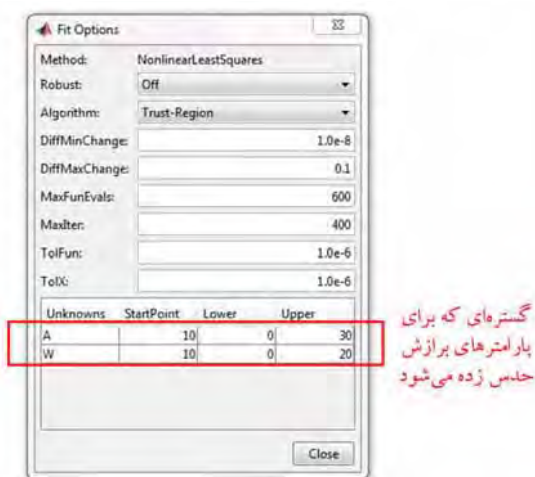
روش دوم برای برازش منحنی بر داده‌ای تجربی استفاده از ابزار cftool در محیط نرم‌افزار متلب می‌باشد. چنان‌که در شکل (۱۸-۱) نشان داده شده است، دستور cftool را در پنجره Command Window از نرم‌افزار متلب وارد کنید. با اجرای دستور فوق پنجره جدیدی با نام Curve Fitting Tool باز می‌شود. این پنجره در شکل (۱۹-۱) نشان داده شده است. داده‌های مورد نظر را در قسمت xdata و ydata انتخاب نمایید، در این مثال این داده‌ها به ترتیب t و V می‌باشند. سپس گزینه Custom Equation را انتخاب نموده و تابعی که بایستی برازش شود را نیز در قسمت مربوطه تایپ کنید. در این مثال متغیر مستقل پارامتر x می‌باشد. هر پارامتری به غیر از x به عنوان یکی از پارامترهای برازش تلمتی می‌شود. حال بر روی دکمه Fit Options کلیک نمایید و تنظیمات نشان داده شده در شکل (۲۰-۱) را در پنجره مربوطه وارد نمایید. اگر گزینه Auto Fit در پنجره قبل علامت زده شده باشد، با اعمال هر تغییر، عملیات برازش منحنی اجرا می‌شود. نتایج برازش نیز در بخش Results از پنجره Curve Fitting Tool به نمایش گذاشته می‌شود.



شکل (۱۸-۱) پنجره اصلی نرم افزار متلب. دستور cftool را در قسمت نشان داده شده وارد کنید تا پنجره Curve Fitting Tool نمایان شود.



شکل (۱۹-۱) پنجره cftool از نرم افزار متلب.



شکل (۲۰-۱) پنجره Fit Options از ابزار Cftool در نرم‌افزار متلب.

اولین مرحله در حل مسئله برازش منحنی انتخاب تابعی مناسب با توجه به فیزیک آزمایش مورد نظر است. در مثال قبل، تابعی سینوسی برای برازش منحنی انتخاب شد. دلیل انتخاب این تابع، نوسانی بودن داده‌های مورد نظر است. پس انتخاب تابع گامی مهم در برازش منحنی می‌باشد. فرض کنید آهنگ شمارش پرتوهای گاما که از چشمه‌ای که در حال واپاشی با نیم-عمر حدود یک ساعت است در مدت ۵ ساعت ثبت شود. انتظار می‌رود اگر واپاشی چشمه رادیواکتیو از یک مسیر باشد، کاهش آهنگ شمارش‌های در بازه‌زمانی مورد اندازه‌گیری به صورت نمایی باشد. از این رو تابع برازش^۱ نیز بایستی تابعی نمایی انتخاب شود. در مثالی دیگر می‌توان تغییرات جریان خروجی کانال اتاقک جبران شده^۲ در رآکتورهای هسته‌ای را نام برد. در مورد این سامانه در فصل سوم توضیحات کافی آورده شده است. این کانال فقط به نوترون‌ها حساس است و در حالت جریانی^۳ کار می‌کند. با توجه به آن که جمعیت نوترون‌ها با میزان قدرت حرارتی رآکتور متناسب است، از این رو رابطه‌ای خطی بین قدرت رآکتور و جریان خروجی از این کانال اندازه‌گیری قدرت برقرار است. پس چنانچه بخواهیم ارتباط بین قدرت رآکتور و جریان خروجی از آشکارساز را با استفاده از رابطه‌ای ریاضی نشان دهیم، بایستی تابعی خطی را برای برازش منحنی انتخاب کنیم. از جمله روش‌های معروف برای برازش منحنی، روش حداقل مربع‌های خطا^۴ می‌باشد. فرض کنید x_i مقادیری است که متغیر مستقل اختیار می‌کند. در این صورت مقادیر متناظر متغیر وابسته با $y(x_i)$ نشان داده می‌شود. اندیس i عددی صحیح بین ۱ الی n می‌باشد، یعنی تعداد n زوج داده برای متغیرهای وابسته و مستقل داده جمع‌آوری شده است. در این صورت S که به صورت زیر تعریف می‌شود، مجموع مربع‌های خطا از تابع $f(x_i)$ است. این تابع همان تابع برازش منحنی است.

$$S = \sum_{i=1}^n (f(x_i) - y(x_i))^2 \quad (۱-۳۷)$$

پس به این ترتیب مسئله برازش منحنی به یافتن تابع $f(x_i)$ محدود شده به نحوی که تابع S حداقل گردد، یعنی شرط زیر برقرار باشد:

¹ Fitting Function

² CIC: Compensated Ionization Chamber

³ Current Mode

⁴ Least Square Error Curve Fitting Method

$$\frac{\delta S}{\delta a_j} = 0 \quad (1-38)$$

در این رابطه a_j ها همان پارامترهای برازش می‌باشند ($j=1, 2, 3, \dots, m$). با فرض آن که $f(x_i)$ تابعی خطی است، یعنی:

$$f(x_i) = a_1 + a_2 x_i \quad (1-39)$$

در این رابطه دو پارامتر مجهول برای برازش وجود دارد (a_1, a_2). با جای‌گذاری رابطه (1-39) در رابطه (1-37) و انجام ساده‌سازی‌های ریاضی، روابط (1-40) و (1-41) برای پارامترهای برازش بدست می‌آید.

$$a_1 = \bar{f} - a_2 \bar{x} \quad (1-40)$$

$$a_2 = \frac{\sum_{i=1}^n f(x_i)(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n x_i(x_i - \bar{x})} \quad (1-41)$$

در روابط فوق \bar{x} و \bar{f} تعریف‌هایی به صورت زیر دارند:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-42)$$

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \quad (1-43)$$

مثال (1-12): فرض کنید که قدرت رآکتور در امتداد زمان به صورت خطی افزایش می‌یابد. جریان خروجی از یکی از کانال‌های اندازه‌گیری قدرت رآکتور توسط سامانه جمع‌آوری اطلاعات ثبت می‌شود. قدرت بین یک الی ۱٫۵ مگا وات تغییر می‌کند و جریان خروجی از کانال فوق از ۵ میکرو آمپر تا ۴۰ میکرو آمپر افزایش می‌یابد. جریان خروجی از آشکارساز به درستی در مقابل نوبه برق شهر محافظت نشده و علاوه بر نوبه با توزیع گوسی (با انحراف از معیار استاندارد ۱٫۵ میکرو آمپر) نوبه برق شهر نیز بر روی جریان حاصل اثر گذار است (موج سینوسی با دامنه ۳ میکرو آمپر و فرکانس ۵۰ هرتز). فرض کنید که در لحظه شروع آزمایش نوبه برق شهر در فاز ۳۰ درجه قرار دارد. سیگنال حاصل را شبیه‌سازی نموده و رابطه‌ای خطی بر آن برازش کنید. کل مدت آزمایش ۳۰۰ میلی ثانیه است و در هر ثانیه ۵۰۰۰ نمونه برداری انجام شده است.

حل: برنامه کامپیوتری زیر در محیط نرم‌افزار متلب داده‌های به شرایط شرح داده شده در مثال فوق را تولید نموده و ترسیم می‌نماید. خروجی این برنامه در شکل (1-21) ترسیم شده است.

```
t=0: (1/5000): 0.3;
Np=length(t);
V_Signal=5: ((40-5)/(Np-1)): 40;
Noise_Gaussian=1.5.*randn(1, Np);
Noise_Li=3.*sin(2.*pi.*50.*t+(pi/6));
```

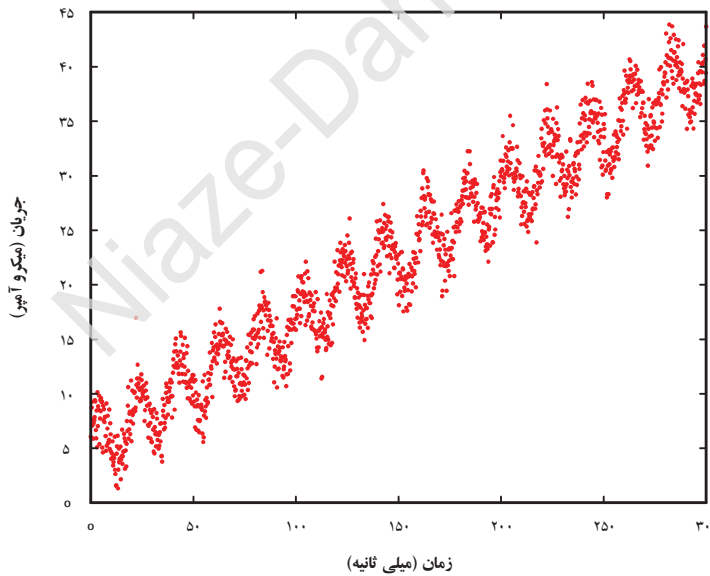
```
V=V_Signal+Noise_Gaussian+Noise_Linear;
plot(t, V, 'r')
save('Data.mat', 'V_Signal', 'Noise_Gaussian', 'Noise_Linear', 'V')
```

مانند مثال (۱۱-۱)، با استفاده از تابع کتابخانه‌ای fit در نرم‌افزار متلب می‌توان تابع‌های دل‌خواه را بر نتیجه‌های تجربی برازش نمود. برنامه کامپیوتری زیر تابعی خطی را بر متغیرهای t و V برازش نموده و علاوه بر نقاط تجربی خط برازش شده را نیز ترسیم می‌کند.

```
x=t;
f=V;
n=length(x);
Fit_Options = fitoptions('Method','NonlinearLeastSquares',...
    'Lower',[0,0],...
    'Upper',[10,200],...
    'StartPoint',[1 1]);
Fit_Type = fittype('A1+A2*x','options',Fit_Options);
[Parameters,Fitting_Status] = fit(x,f,Fit_Type);

A1=Parameters.A1;
A2=Parameters.A2;
f_Fitted=A1+A2.*x;

figure(2)
plot(x,f,'r',t,f_Fitted,'k','LineWidth',2)
```



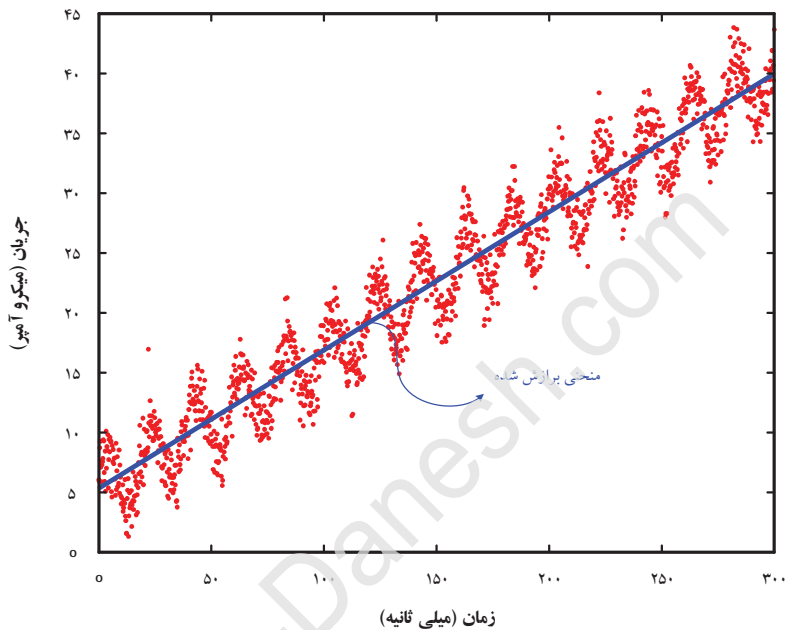
شکل (۲۱-۱) جریان شبیه‌سازی شده که شامل نوفه برق شهر، نوفه با توزیع گوسی و بخش متاثر از قدرت رآکتور است.

با اجرای برنامه فوق شکل (۲۲-۱) به همراه مقادیر عددی پارامترهای برازش به شرح ذیل در پنجره Command Window نرم‌افزار متلب چاپ می‌شود.

Parameters =

General model :
 Parameters(x) = A1+A2*x
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 A1 = 5.194 (4.931, 5.458)
 A2 = 115.7 (114.2, 117.2)

Fitting_Status =
 sse: 1.0149e+04
 rsquare: 0.9370
 dfe: 1499
 adjrsquare: 0.9369
 rmse: 2.6020



شکل (۱-۲۲) جریان شبیه‌سازی شده و خط برازش شده بر آن.

روش دیگری که می‌توان به کار گرفت استفاده از روابط (۱-۴۰) تا (۱-۴۳) می‌باشد. این روابط در محیط نرم‌افزار متلب به صورت زیر برای تعیین پارامترهای برازش به کار گرفته شدند.

```
xave=sum(x)/n
fave=sum(f)/n
a2=sum(f.*(x-xave))/sum(x.*(x-xave))
a1=fave-(a2*xave)
```

خروجی این برنامه عبارت است از:

```
tave =
    0.1500
Vave =
    22.5474
a2 =
    115.6868
a1 =
    5.1943
```

چنان‌که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج بدست آمده از دو روش شرح داده شده در فوق وجود دارد. مباحثی که در این بخش آورده شد، برای کاربردهای مورد نظر در آزمایش‌های این کتاب کافیت و خواننده می‌تواند با بهره‌گیری از آن نیازهای

احتمالی خود را برآورده کند. هرچند کتاب‌ها و مراجع مختلفی در این زمینه وجود دارد که جزییات بیش‌تر می‌تواند در آن مراجع یافت شود.

سوالات

(۱) فرض کنید فضای حافظه‌ی در دسترس محدود است. در اندازه‌گیری خاصی قرار است میلیون‌ها داده تجربی اندازه‌گیری و مقدار متوسط و انحراف از معیار آن‌ها محاسبه شود. متذکر می‌شود امکان جمع‌آوری و ذخیره‌ی همه‌ی داده‌ها در حافظه وجود ندارد. چه راه‌کاری برای مشکل فوق پیشنهاد می‌کنید.

مراجع

1. Knoll, G. F., Radiation detection and measurement: John Wiley & Sons, 1999.
2. M. Drogg, Dealing with Uncertainties: A Guide to Error Analysis, Springer, 2007.
3. Mathwroks, (2014). MATLAB reference guide.
4. Todreas. Neil E., Kazimi. Mujid S., Nuclear Systems II: Elements of Thermal Hydraulic Design, Hemisphere Publishing Corporation, 1990.

پیوست ب

| مقدار پایه (دیمانسیون) | واحدهای SI | | نماد ریاضی |
|------------------------|------------|--------------|------------|
| | واحد SI | نماد واحد SI | |
| طول | متر | m | L |
| جرم | کیلوگرم | kg | m |
| زمان | ثانیه | s | t |
| جریان الکتریکی | آمپر | A | I |
| دمای ترمودینامیکی | کلیون | K | T |
| میزان ماده | مول | mol | n |
| شدت روشنایی | کاندلا | cd | |
| زاویه صفحه‌ای | رادیان | rad | θ |
| زاویه فضایی | استرادیان | sr | Ω |

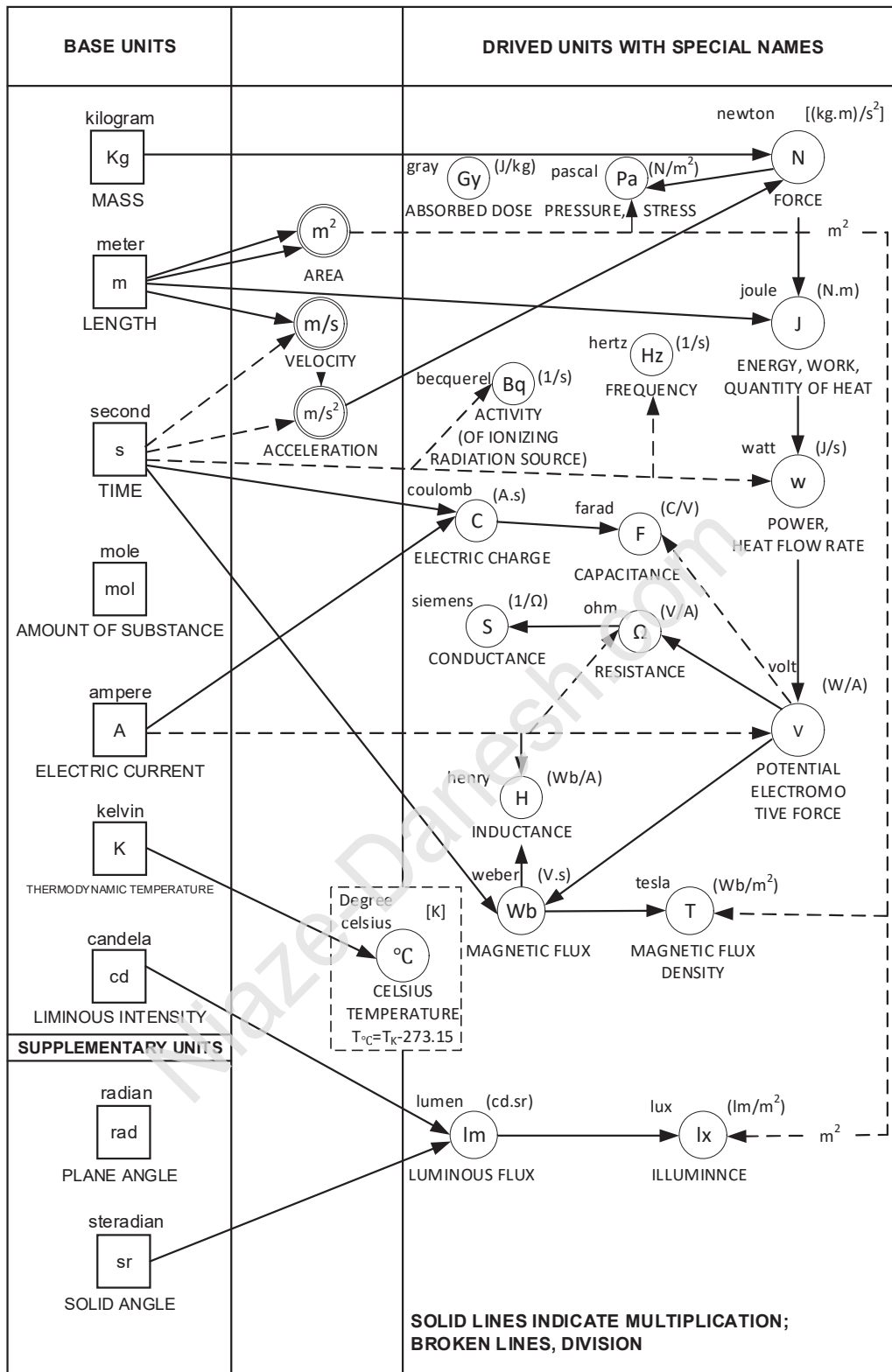
پیشوندهای SI

| Multiplication Factor | SI Prefix | SI Prefix symbol, Use Roman Type |
|---|-----------|-------------------------------------|
| $1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{18}$ | exa** | E |
| $1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{15}$ | peta** | P |
| $1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$ | tera | T |
| $1\ 000\ 000\ 000 = 10^9$ | giga | G |
| $1\ 000\ 000 = 10^6$ | mega | M |
| $1\ 000 = 10^3$ | kilo | k |
| $100 = 10^2$ | hecto‡ | h |
| $10 = 10$ | deka‡ | da |
| $0.1 = 10^{-1}$ | deci‡ | d |
| $0.01 = 10^{-2}$ | centi‡ | c |
| $0.001 = 10^{-3}$ | milli | m |
| $0.000\ 001 = 10^{-6}$ | micro | μ |
| $0.000\ 000\ 001 = 10^{-9}$ | nano | n |
| $0.000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-12}$ | pico | p |
| $0.000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-15}$ | femto | f |
| $0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-18}$ | atto | a |

برخی از واحدهای معروف SI

نماد واحد SI (مخفف)،

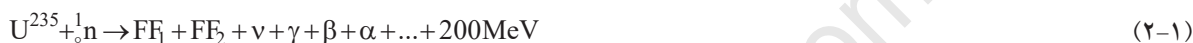
| کمیت | واحد | از نوع رومی | رابطه، از نوع رومی |
|-------------------------|-----------------------|-------------|---------------------|
| دز جذب شده | گری | Gy | J/kg |
| شتاب | متر بر مجذور ثانیه | ... | m/s ² |
| اکتیویته (رادیونوکلئید) | بکرل | Bq | 1/s |
| شتاب زاویه‌ای | رادیان بر مجذور ثانیه | .. | rad/s ² |
| سرعت زاویه‌ای | رادیان بر ثانیه | ... | rad/s |
| مساحت | مترمربع | ... | m ² |
| دمای سلسیوس | درجه سلسیوس | °C | k |
| چگالی | کیلوگرم بر مترمکعب | ... | kg/m ³ |
| معادل دز | سیورت | Sv | j/kg |
| بار الکتریکی | کولومب | C | a.s |
| هدایت الکتریکی | زیمنس | S | a/v |
| قدرت میدان الکتریکی | ولت بر متر | ... | v/m |
| اندوکتانس الکتریکی | هانری | H | V.s/A (=Wb/A) |
| پتانسیل الکتریکی | ولت | V | W/A |
| مقاومت الکتریکی | اهم | Ω | V/A |
| انرژی | ژول | J | N.m |
| آنتروپی | ژول بر کلوین | ... | J/K |
| نیرو | نیوتون | N | kg.m/s ² |
| فرکانس | هرتز | Hz | 1/s |
| قدرت میدان مغناطیسی | آمپر بر متر | ... | A/m |
| شار مغناطیسی | وبر | Wb | V.s |
| چگالی شار مغناطیسی | تسلا | T | Wb/m ² |
| اختلاف پتانسیل | ولت | V | W/A |
| قدرت | وات | W | J/s |
| فشار | پاسکال | Pa | N/m ² |
| مقدار گرما | ژول | J | N.m |
| گرمای ویژه | ژول بر کیلوگرم کلوین | ... | J/(kg.K) |
| استرس | پاسکال | Pa | N/m ² |
| هدایت گرمایی | وات بر متر کلوین | ... | W/(m.K) |
| سرعت | متر بر ثانیه | ... | m/s |
| ولتاژ | ولت | V | W/A |
| حجم | مترمربع | ... | m ² |
| کار | ژول | J | N.m |



فصل دوم: آشنایی با آشکارسازهای هسته‌ای

مقدمه

برای آشکارسازی ذرات رادیواکتیو، اولین مرحله انجام واکنش ذره مورد نظر با مواد حساس آشکارساز است. ذرات باردار علاوه بر امکان انجام واکنش‌های هسته‌ای، با محیط اطراف برخورد‌های کولنی نیز انجام داده و سبب یونیزاسیون اتم‌ها می‌شوند. برای پرتوهایی که از لحاظ بار الکتریکی خنثی هستند، مانند پرتوهای گاما و نوترون، برهم‌کنش کولنی در وحله‌ی اول ممکن نمی‌باشد. از این رو وابسته به انرژی و نوع ذره و اطلاعاتی که از آن مورد نیاز است، مواد حساس آشکارساز انتخاب می‌شود. پس به طور کلی در طراحی آشکارسازهای هسته‌ای مواد انتخابی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. انتخاب ماده مورد نظر به نوعی انتخاب نوع آشکارساز (از حیث ذره‌ای که قرار است آشکار شود) می‌باشد. با مشخص بودن نوع ماده و نوع ذره، خصوصیت‌های دیگری مانند نوع برهم‌کنش هسته‌ای، انرژی که از برهم‌کنش مورد نظر آزاد می‌شود و ذرات ثانویه حاصل از واکنش مشخص می‌شود. از جمله واکنش‌های هسته‌ای مناسب برای آشکارسازی نوترون می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:



هر سه نوع واکنش‌های فوق، از جمله واکنش‌هایی می‌باشند که در آشکارسازهای نوترون حرارتی، بسیار رایج هستند. در واکنش اول، نوترون جذب هسته‌ی اورانیوم شده و منجر به شکافت آن می‌شود. از ذرات ثانویه این واکنش پاره‌های شکافت^۱ هستند که حدود ۸۰ درصد کل انرژی آزاد شده را به صورت انرژی جنبشی از آن خود می‌کنند. این ذرات به شدت یونیزه می‌باشند، از این رو در مسافتی کوتاه تمام انرژی خود را در محیط بر جای می‌گذارند. در نتیجه یکی از خصوصیت‌های آشکارسازی که از ماده اورانیوم به عنوان ماده حساس بهره می‌برد، انرژی بالای آزاد شده به ازای آشکارسازی هر نوترون است. هر آشکارساز خصوصیت‌های دیگری نیز داراست، که از آن جمله می‌توان به بازده آشکارسازی اشاره نمود. این خصوصیت‌ها به ماده حساس درون آشکارساز، هندسه آشکارساز، گاز درون آن، مواد ساختاری و عوامل دیگری هم‌چون بایاس آشکارساز بستگی دارد. در این فصل شرح خلاصه‌ای از برخی از آشکارسازهایی که آشنایی با آن‌ها سبب درک به‌تر مطالب آورده شده در فصل‌های بعدی می‌شود، آورده شده است. در مورد هر یک از این آشکارسازها برخی از خصوصیت‌ها و ویژگی‌های مهم به‌طور خلاصه شرح داده شده است. در انتهای فصل نیز راجع به پدیده چرنکوف در سطح آشنایی خواننده مطالبی آورده شده است.

آشکارسازی نوترون

از آن‌جا که آشکارسازهایی که در طراحی رآکتور هسته‌ای به کار گرفته شده‌اند از نوع اتافکک یونش می‌باشند، از این رو در این کتاب بحث مربوط به آشکارسازی نوترون به آشکارسازهایی از این نوع محدود می‌شود. اتافکک یونش در حقیقت خازنی

¹ Fission Fragments

استوانه‌ای است که الکتروود مرکزی آن به قطب مثبت و بدنه به قطب منفی پتانسیل V_0 متصل شده است. عبور ذره باردار از محیطی که از گازی خنثی پر شده موجب یونیزاسیون اتم‌ها می‌شود. یون‌های به‌وجود آمده تحت تاثیر میدان الکتریکی شعاعی درون آشکارساز به سمت قطب‌های غیرهم‌نام شتاب می‌گیرند. وابسته به این که میزان ولتاژ اعمالی به آشکارساز چقدر است، ناحیه کاری آشکارساز متفاوت می‌باشد. در شکل (۱-۲) نواحی مختلف کار آشکارسازهای گازی بر حسب تغییرات ولتاژ اعمالی به اتاقک یونیزاسیون نشان داده شده است. اولین ناحیه، ناحیه باز ترکیب^۱ نام دارد. نظر به آن که در این ناحیه میدان بسیار ضعیف است، یون‌های مثبت و منفی تولیدی دوباره باز ترکیب شده و کسر کوچکی از آن‌ها جذب الکتروودهای غیر هم‌نام خود می‌شوند. با قوی‌تر شدن ولتاژ اعمالی به آشکارساز، محدوده ولتاژ V_0 تا V_1 ، میدان الکتریکی درون آشکارساز قوی‌تر می‌شود. از این رو همه یون‌های تولیدی قادر خواهند بود تا خود را به الکتروودهای غیرهم‌نام برسانند و جذب آن‌ها شوند. افزایش ولتاژ اعمالی به آشکارساز، محدوده ولتاژ V_1 تا V_2 ، سبب تغییر محسوسی در عمل کرد آشکارساز نمی‌شود. این ناحیه از نقطه کار آشکارساز یونیزاسیون را اشباع یونی^۲ می‌نامند. چنان‌که مشاهده می‌شود اگر ذرات دارای انرژی‌های مختلفی باشند، میزان باری که از طریق یونیزاسیون تولید می‌کنند نیز متفاوت بوده و با انرژی ذره فرودی (کسری که در حجم حساس آشکارساز بر جای گذاشته می‌شود) متناسب است. معمولاً آشکارسازهایی که برای اندازه‌گیری دز^۳ مطلق یا انرژی مطلق ذره به کار می‌روند در این ناحیه کار می‌کنند. ناحیه بعد، محدوده ولتاژ V_2 تا V_3 است. در این ناحیه یون‌های تولید شده تحت تاثیر میدان الکتریکی درون آشکارساز شتاب گرفته و انرژی زیادی کسب می‌کنند. انرژی یون‌های منفی، الکترون‌ها، در نزدیکی الکتروود مثبت مرکزی آن قدر افزایش می‌یابد که خود با برهم‌کنش‌های کوانتی الکترون‌های مقید به دیگر اتم‌ها را جدا کرده و سبب تقویت بار الکتریکی کل می‌شود. میزان تقویت یا تکثیر یون‌های ثانویه با ولتاژ اعمالی متناسب است. از این رو به این ناحیه، ناحیه تناسبی^۴ گفته می‌شود. محدوده ولتاژ V_3 تا V_4 ، ناحیه‌ای که رابطه بین بارهای تولیدی و ولتاژ اعمالی دیگر رابطه‌ای خطی و تناسبی نیست، ناحیه تناسبی محدود^۵ نامیده می‌شود. افزایش بیش‌تر ولتاژ اعمالی به آشکارساز میدان الکتریکی شعاعی درون اتاقک را چنان قوی می‌سازد که یون‌های منفی با شتاب مضاعفی به‌منی از یون‌ها را در حجم حساس آشکارساز به راه می‌اندازند. افزایش بیش‌تر ولتاژ سبب قوی‌تر شدن پالس خروجی از آشکارساز می‌شود، این ناحیه را ناحیه گایگر-مولر^۶ می‌نامند. در این ناحیه چنان‌که مشاهده می‌شود پالس‌های خروجی از آشکارساز اطلاعاتی راجع به انرژی ذره فرودی بدست نمی‌دهند و هر دو منحنی مربوط به ذرات با انرژی‌های مختلف دارای پاسخی یکسان هستند. در این ناحیه پالس خروجی از آشکارساز بسیار قوی بوده و نیازی به پیش‌تقویت‌کننده در بخش الکترونیک هسته‌ای نمی‌باشد. پالس‌های مشاهده شده صرف نظر از انرژی ذره فرودی دارای ارتفاع یکسانی هستند.

¹ Recombination Region

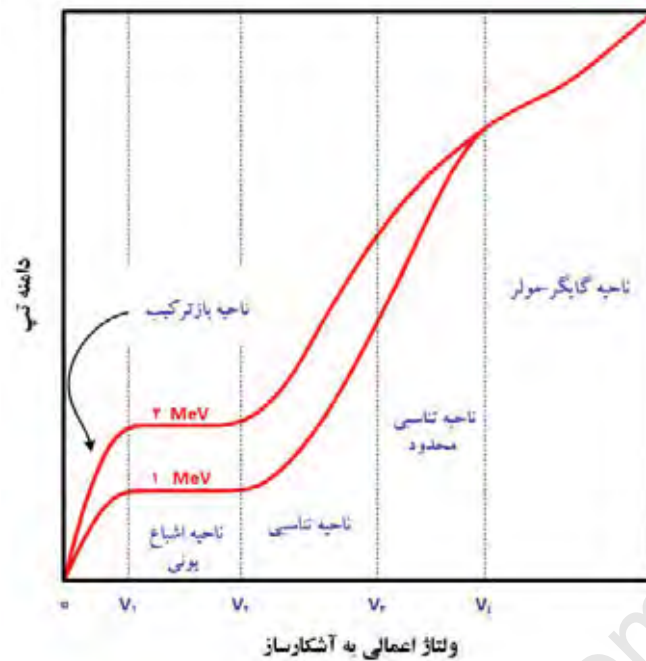
² Ion Saturation Region

³ Dose

⁴ Proportional Region

⁵ Limited Proportional Region

⁶ Geiger-Muller



شکل (۱-۲) نواحی مختلف کار آشکارساز اتاقک یونیزاسیون بر حسب تغییرات ولتاژ اعمالی به آن.

اولین مرحله در آشکارسازی نوترون، واکنشی است که با ماده حساس درون آشکارساز انجام می‌شود. نتیجه این واکنش آزاد شدن انرژی به صورت‌های مختلف از جمله انرژی جنبشی ذرات ثانویه است. ذرات ثانویه‌ی بارداری مانند پروتون و آلفا در حجم حساس آشکارساز زوج یون‌های مثبت و منفی تولید می‌کنند. اصولاً اولین مرحله در آشکارسازی ذرات رادیواکتیو برهم-کنش مناسب این ذرات با ماده حساس درون آشکارساز است. از این رو وابسته به این که نوع ذره فرودی چه باشد، ماده حساس آشکارساز نیز متفاوت خواهد بود. برای نوترون که ذره‌ای خنثی از لحاظ بار الکتریکی است، یکی از برهم‌کنش‌های مناسب، جذب نوترون و در نتیجه آن تولید ذرات ثانویه باردار است. سطح مقطع واکنش جذب برای نوترون کمیتی است که به انرژی ذره فرودی وابسته است. پس آشکارسازهای نوترون از حیث انرژی نوترون فرودی به دو دسته کلی آشکارسازهای نوترون‌های حرارتی^۱ و آشکارسازهای نوترون‌های سریع^۲ تقسیم‌بندی می‌شود. آنچه که در این کتاب مد نظر است تا به شرح آن پرداخته شود، آشکارسازی نوترون‌های حرارتی است. از این رو مطالبی که در ادامه آورده می‌شود، به معرفی این دسته از آشکارسازها می‌پردازد. در تقسیم‌بندی دیگری، گروهی از آشکارسازهای نوترون که قابل استفاده در کاربردهای مربوطه در رآکتورها هستند و از نوع اتاقک یونش می‌باشند، بر حسب نوع ماده حساس به کار گرفته شده در ساختمان آنها نام‌گذاری می‌شوند. معروف‌ترین این آشکارسازها، آشکارساز BF_۳، آشکارساز بور لایه نشانی شده^۳، آشکارساز He^۳ و آشکارساز اتاقک شکافت^۴ می‌باشند که در ادامه ساختمان و عمل کرد هر یک به‌طور خلاصه بررسی شده است.

آشکارسازی نوترون بر مبنای واکنش نوترون با بور

معروف‌ترین واکنش برای آشکارسازی نوترون‌های حرارتی، واکنش $B(n, \alpha)$ می‌باشد. جزییات این واکنش عبارتست از:

¹ Thermal Neutrons

² Fast Neutrons

³ Boron Lined

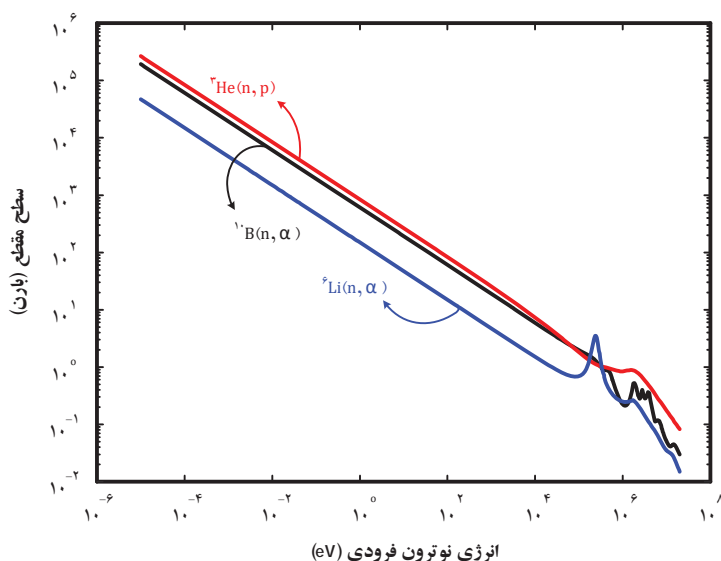
⁴ Fission Chamber

حدود ۹۶ درصد از واکنش‌های انجام شده منجر به حالتی می‌شود که ${}^7\text{Li}$ در حالت برانگیخته قرار می‌گیرد. نیم-عمر ذره ${}^7\text{Li}^*$ در حدود 10^{-13} ثانیه است. از این رو در لحظات کوتاهی پس از واکنش، انرژی برانگیختگی با گسیل یک پرتوی گاما با انرژی 0.48 MeV به حالت پایه باز می‌گردد. با توجه به احتمال ناچیز اندرکنش این فوتون با گاز درون آشکارساز، این فوتون از حجم حساس آشکارساز خارج شده و در شکل‌گیری پاسخ آشکارساز نقش چندانی ندارد. معمولاً میدان‌های نوترونی، آغشته به پرتوهای گاما می‌باشند. از نقطه نظر آشکارسازی نوترون، این پرتوها، پرتوهای مزاحم تلقی می‌شوند. پالس‌های تولیدی توسط پرتوهای گاما بایستی از پالس‌های تولیدی توسط نوترون‌ها تمیز داده شوند. نظر به آن که انرژی آزاد شده در واکنش با نوترون (که در مورد آشکارسازهای با ماده حساس بور بیش‌تر از 2 MeV است) بسیار بالاتر از انرژی است که ذرات گاما در آشکارساز برجای می‌گذارند. هم‌چنین نظر به آن که احتمال برهم‌کنش با پرتوهای گاما در انرژی‌های فوق که منجر به تولید پالس‌هایی با دامنه بزرگ و قابل مقایسه با واکنش فوق می‌شود کوچک است، آشکارسازهای با ماده حساس ${}^3\text{B}$ قابلیت خوبی برای شمارش نوترون‌ها در میدان‌هایی که آمیخته با پرتوهای گاما هستند دارا می‌باشند. قابل ذکر است با توجه به انرژی بالای حاصل از واکنش فوق، استخراج اطلاعات مربوط به انرژی نوترون فرودی امکان‌پذیر نمی‌باشد. هم‌چنین نظر به اثر کوچک تکانه نوترون فرودی، ذرات گسیل شده بعد از واکنش فوق با تقریب خوبی در جهت‌های مخالف از هم دور می‌شوند. سهم انرژی هر یک از این ذرات با توجه به اصل بقا انرژی و تکانه برابر خواهد بود با:

$$\begin{cases} E_{\text{Li}} + E_{\alpha} = 2.31 \text{ MeV} \\ m_{\text{Li}} v_{\text{Li}} = m_{\alpha} v_{\alpha} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_{\text{Li}} = 0.84 \text{ MeV} \\ E_{\alpha} = 1.47 \text{ MeV} \end{cases} \quad (2-4)$$

شکل (۲-۲) نشان‌دهنده سطح مقطع واکنش ${}^7\text{B}(n, \alpha)$ می‌باشد. چنان‌که مشاهده می‌شود، در انرژی‌های حرارتی سطح مقطع واکنش فوق 3840 بارن است. سطح مقطع دارای رابطه‌ای عکس با انرژی نوترون فرودی است. تقریباً در کل بازه نشان داده شده رفتاری به شکل $\frac{1}{v}$ (عکس سرعت نوترون) از خود نشان می‌دهد. قابل توجه است سطح مقطع در این واکنش برای ${}^7\text{B}(n, \alpha)$ به‌طور نسبی بزرگ بوده و به‌خصوص تابع ساده‌ای از انرژی نوترون فرودی است. مضاف بر این که ایزوتوپ ${}^7\text{B}$ در ترکیب ایزوتوپی طبیعی دارای فراوانی بالایی است (۱۹٫۸٪ فراوانی طبیعی). این خصوصیت‌ها واکنش ${}^7\text{B}(n, \alpha)$ را واکنش مناسبی برای آشکارسازی نوترون‌های حرارتی می‌نماید. البته در ساخت آشکارسازها از ایزوتوپ غنی شده ${}^7\text{B}$ استفاده می‌شود.

^۱ - در اکثر موارد، پرتوهای گاما جزیی از میدان‌های نوترونی هستند. این مطلب به‌خصوص در کاربرد مورد نظر در راکتور هسته‌ای از اهمیت خاصی برخوردار است. سوخت‌های مصرف شده که مولد پرتوهای گامای تاخیری هستند، به همراه پرتوهای گامای آنی ناشی از شکافت، زمینه قابل توجهی از پرتوهای گاما را ممکن است ایجاد کنند.



شکل (۲-۲) سطح مقطع $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ در انرژی‌های مختلف.

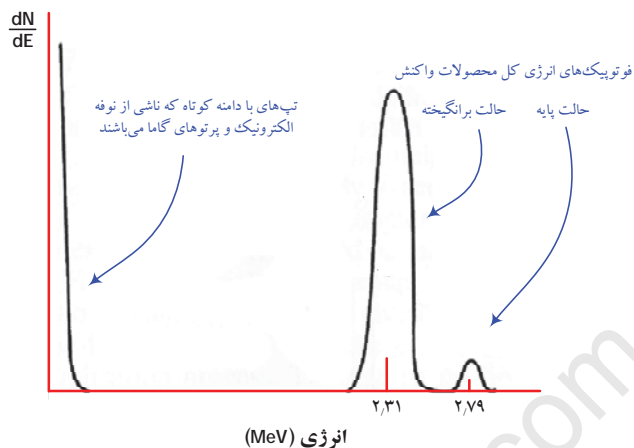
آشکارساز BF_3

در این آشکارساز، بور به صورت ترکیب گازی شکل BF_3 به عنوان گاز خنثی بین الکترودها، در حجم حساس آشکارساز تزریق می‌شود. انرژی آزاد شده طی واکنش $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ که توسط ذرات ثانویه ^4He و ^7Li به صورت انرژی جنبشی حمل می‌شود، سبب تولید زوج یون‌هایی درون آشکارساز می‌گردد. این زوج یون‌ها توسط میدان الکتریکی درون آشکارساز جمع-آوری شده و سبب تولید پالسی در خروجی آشکارساز می‌شود. در شرایط ایده‌آل، چنانچه فرض کنیم تمامی انرژی آزاد شده در واکنش فوق صرف تولید زوج یون‌ها می‌شود، توزیع طیفی ارتفاع پالس‌های خروجی آشکارساز از شکل (۲-۳) تبعیت می‌کند. در شرایط واقعی محتمل است یکی از ذرات گسیل شده با دیواره آشکارساز برخورد کند، از این رو به دلیل آن که همه انرژی آزاد شده طی واکنش فوق در آشکارساز برجای گذاشته نمی‌شود، پالس‌هایی با ارتفاع‌های کوچک‌تری نیز تولید می‌شود. به این اثر در اصطلاح اثر دیواره^۱ اطلاق می‌شود. نظر به آن که برد ذرات گسیل شده در گاز درون آشکارساز BF_3 ، در حدود یک سانتی‌متر است، پس تقریباً قطر تمامی آشکارسازهای از این نوع به اندازه کافی کوچک است و اثر دیواره در پاسخ بدست آمده، مشاهده می‌شود. شکل (۲-۴) نشان‌دهنده توزیع طیفی ارتفاع پالس‌های خروجی آشکارساز به همراه اثر دیواره است. با توجه به آن که ذرات ^4He و ^7Li در جهت‌های مخالف گسیل می‌شوند، از این رو چنانچه ذره α با دیواره برخورد کند، احتمال خیلی زیادی وجود دارد که ذره دیگر، ^7Li ، بتواند تمام انرژی خود را درون آشکارساز برجای گذارد. به طور عکس، برخورد ^7Li با دیواره و برجای گذاشته شدن انرژی ذره α درون آشکارساز نیز حالت دیگری است که ممکن است به وقوع بپیوندد. پس در نتیجه انرژی برجای گذاشته شده درون آشکارساز برای تولید زوج یون‌ها می‌تواند گستره‌ای از E_{Li} تا $E_{\text{Li}} + E_{\alpha}$ را پوشش دهد. قابل ذکر است سطح ولتاژ تمیز دهنده^۲ بایستی در سطح A ، نشان داده شده در شکل (۲-۴) تنظیم گردد. سطح ولتاژ A ، کوچک‌ترین ارتفاع پالسی است که آشکارسازی نوترون می‌تواند سبب ایجاد آن شود، از این رو پایین‌تر از این سطح، پالس‌های با منشاء برهم کنش پرتوهای گاما، نوفه سامانه الکترونیک، و دیگر وقایع ممکن می‌باشد.

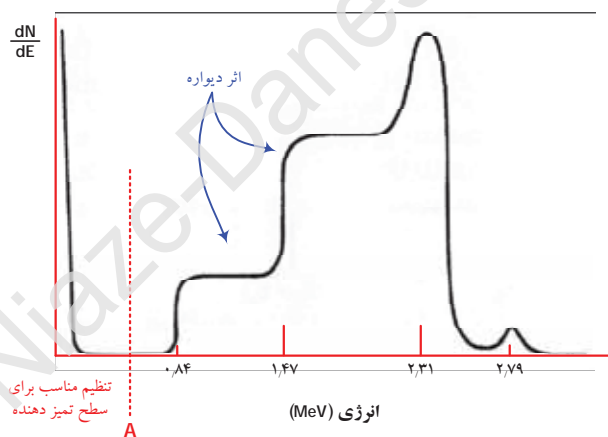
¹ Wall Effect

² Discrimination Level

بازده آشکارساز BF_3 به طول فعال آن، L و سطح مقطع واکنش ${}^1_0B(n, \alpha)$ که تابعی از انرژی نوترون فرودی نیز می‌باشد و با نماد $\Sigma_a(E)$ نشان داده می‌شود، بستگی دارد. چنانچه فرض کنیم نوترون فرودی در امتداد محور استوانه آشکارساز حرکت کرده و وارد آشکارساز شود، در این صورت بازده آشکارساز می‌تواند توسط رابطه (۲-۵) توصیف شود.



شکل (۲-۳) طیف ارتفاع پالس‌های خروجی آشکارساز BF_3 در حالت ایده‌آل.



شکل (۲-۴) طیف ارتفاع پالس‌های خروجی آشکارساز BF_3 متأثر از اثر دیواره.

$$\varepsilon = 1 - e^{-L \Sigma_a} \quad (2-5)$$

برای آشکارسازی نوعی، به طول ۳۰ سانتی‌متر که 1_0B در آن تا ۹۶ درصد غنی شده است و گاز درون آن نیز در فشار ۶۰۰ torr می‌باشد، بازده برای نوترون‌های حرارتی با انرژی 0.025 eV برابر با 91.5% و برای نوترون‌های با انرژی 100 eV برابر با 3.8% می‌باشد.

آشکارساز بور لایه نشانی شده^۱

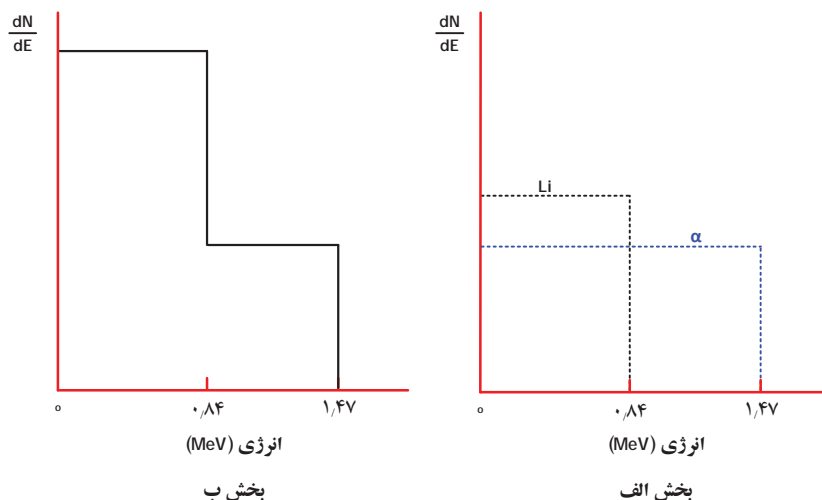
شکل دیگری از کاربرد بور به عنوان ماده حساس برای آشکارسازی نوترون، لایه نشانی آن بر روی دیواره داخلی بدنه استوانه‌ای اتاقک یونیزاسیون است. در سطوح بالایی از تابش پرتوهای گاما، گاز BF_3 دچار تنزل^۲ و تخریب می‌شود. به دلیل آن که در آشکارساز بور لایه نشانی شده، ترکیب گازی شکل بور استفاده نمی‌شود، نقطه ضعف فوق می‌تواند با انتخاب گازی مناسب مرتفع گردد. به این ترتیب با انتخاب گاز مناسب، پایداری و دوام بیش‌تر در مقابل پرتوهای گامایی که آشکارساز در معرض آن قرار می‌گیرد، حاصل خواهد شد.

یکی از مواردی که در طراحی مناسب این آشکارساز بایستی لحاظ شود، ضخامت مناسب لایه‌ی بور است. با توجه به برد کوتاه ذره آلفا گسیل شده طی واکنش (۲-۲)، ضخامت بهینه‌ای از لایه‌ی بور بایستی در نظر گرفته شود. افزایش این ضخامت به معنی وقوع واکنش با نوترون در فواصل دورتری از گاز درون آشکارساز و در نتیجه توقف ذرات ثانویه در خود لایه‌ی بور می‌باشد. به این ترتیب افزایش بیش از حد ضخامت سبب کاهش بازده آشکارسازی نوترون می‌شود.

نظر به آن که تنها یکی از ذرات ثانویه واکنش (۲-۲) شانس ورود به حجم گاز درون آشکارساز و در نتیجه آن انجام یونیزاسون را دارد، از این رو طیف ارتفاع پالس‌های خروجی از آشکارساز حداکثر برابر انرژی 1.47 MeV ، انرژی جنبشی ذره آلفا، می‌باشد. نظر به آن که در ضخامت‌های مختلفی از لایه‌ی بور، واکنش (۲-۴) روی می‌دهد، پس کسری از انرژی ذره آلفا ممکن است در خود این لایه برجای گذاشته شود. از این رو طیف ارتفاع پالس‌های مشاهده شده تک انرژی نبوده و تا انرژی صفر ادامه دارد. مانند آن چه که برای ذره آلفا شرح داده شد، ارتفاع پالس‌های ناشی از ذره لیتیوم نیز شرایط مشابهی را دارا می‌باشد، با این تفاوت که انرژی حداکثری این ذره در واکنش (۲-۴) برابر 0.84 MeV است. طیف ارتفاع پالس‌ها در خروجی آشکارساز جمع آثار ارتفاع پالس‌هایی است که از هر دو نوع ذره مختلف فوق حاصل می‌شود. شکل (۲-۵) نشان‌دهنده طیف ارتفاع پالس‌ها در خروجی این آشکارساز است. اگر طیف نشان داده شده در شکل (۲-۵) با طیف نشان داده شده در شکل (۲-۴) (برای آشکارساز BF_3) مقایسه شود، در می‌یابیم که آشکارساز BF_3 از حیث جداسازی پرتوهای گاما و نوترون دارای شرایط بهینه‌تری است. در آشکارساز BF_3 در انرژی‌های کم‌تر از 0.84 MeV هیچ‌گونه پالسی مشاهده نمی‌شود. این درحالیست که در آشکارساز بور لایه نشانی شده، طیف ارتفاع پالس‌ها تا انرژی صفر نیز ادامه می‌یابد.

¹ Boron-Lined Neutron Detector

² Degradation



شکل (۵-۲) در بخش الف، طیف ارتفاع پالس‌ها در خروجی آشکارساز بور لایه نشانی شده به تفکیک نوع ذره مورد نظر آورده شده است. در بخش ب از شکل فوق، طیف ارتفاع پالس‌ها در خروجی آشکارساز ناشی از هر دو ذره آلفا و لیتیم ترسیم شده است.

آشکارساز ${}^3\text{He}$

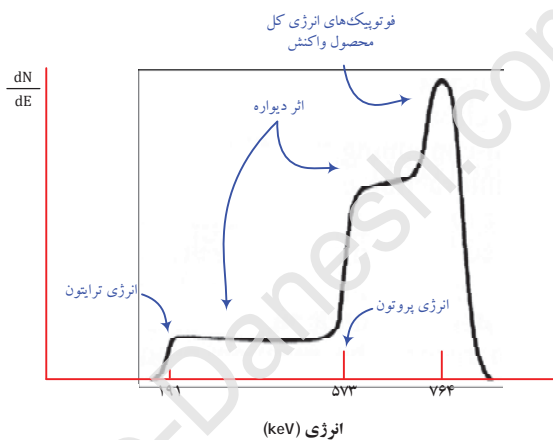
واکنش ${}^3\text{He} (n,p)$ با سطح مقطعی بزرگ‌تر از واکنش بور با نوترون، گزینه خوبی برای آشکارسازی نوترون حرارتی است. نظر به آن که گاز ${}^3\text{He}$ یکی از گازهای نجیب است، امکان ساخت حالت جامد این ماده وجود ندارد، از این رو فقط حالت گازی شکل آن در دسترس است. واکنش ${}^3\text{He} (n,p)$ منجر به آزادسازی 764 keV انرژی می‌شود که از این مقدار 573 keV سهم ذره پروتون و 191 keV مابقی سهم ذره تریتون می‌شود. قابل ذکر است کل انرژی آزاد شده در این واکنش به صورت انرژی جنبشی ذرات ثانویه پدیدار می‌شود. جزییات این واکنش در رابطه (۳-۲) نشان داده شده است.

از آنجا که گستره نفوذ ذرات ثانویه واکنش فوق در قیاس با ابعاد آشکارساز قابل مقایسه است، اثرات دیواره شبیه آنچه که برای آشکارساز BF_3 بیان شد، برای این نوع از شمارنده‌های تناسبی نیز قابل توجه است. طیف ارتفاع پالس‌ها برای آشکارساز نوعی ${}^3\text{He}$ در شکل (۶-۲) آورده شده است. سطح انرژی 573 keV مربوط به انرژی پروتون و سطح انرژی 191 keV مربوط به انرژی ذره تریتون است. یکی از روش‌های کاهش اثر دیواره در طراحی آشکارساز ${}^3\text{He}$ ، افزایش قطر آشکارساز است. بدین ترتیب اکثر واکنش‌ها در جایی دور از دیواره اتفاق می‌افتند. هم‌چنین افزایش فشار گاز درون آشکارساز و اضافه کردن مقدار کمی از گازهای سنگین به گاز ${}^3\text{He}$ ، سبب کاهش گستره نفوذ ذرات پروتون و تریتون می‌شود.

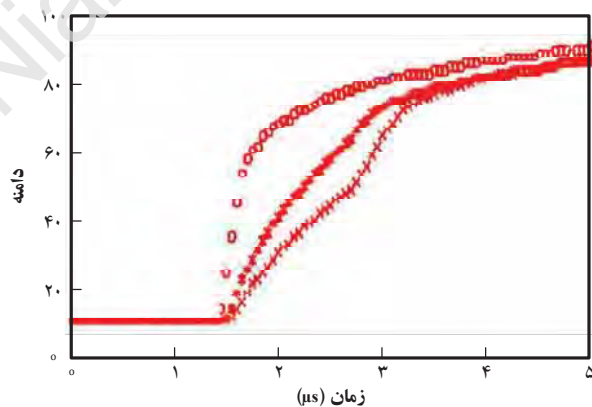
مانند آشکارساز BF_3 ، شکل پالس خروجی آشکارساز ${}^3\text{He}$ نیز به موقعیت مکانی و جهت مسیر حرکت ذرات باردار ثانویه که از واکنش ${}^3\text{He} (n,p)$ ایجاد می‌شوند بستگی دارد. از آنجا که هر دوی این متغیرها به صورت تصادفی هستند، انتظار می‌رود تفاوت‌های اساسی در زمان خیزش پالس‌های خروجی از آشکارساز مشاهده شود. در شکل (۷-۲) چند نمونه از پالس‌های خروجی آشکارساز نوعی ${}^3\text{He}$ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، زمان مورد نیاز برای رسیدن به 80% از ارتفاع نهایی پالس خروجی، بین 0.3 تا 1.6 میکروثانیه متغیر است. اکثر بار الکتریکی که سبب شکل‌گیری پالس خروجی می‌شود، تنها در بهمن ایجاد شده در اطراف الکتروود آند تکثیر می‌شود. اگر همه الکترون‌ها دارای زمان جابجایی یکسانی باشند، تکثیرهای الکترونی یکسانی نیز به وقوع می‌پیوندد. قابل ذکر است قسمتی از پالس خروجی که دارای تغییرات آهسته و کندی است مربوط به یون‌های مثبتی است که بایستی از نزدیکی الکتروود آند دور شده و جذب الکتروود کاتد شوند. سرعت تحرک پایین یون‌های

مثبت سبب افزایش زمان خیزش کامل تا حدود ۵۰ میکروثانیه می‌شود. به همین دلیل بایستی زمان شکل‌دهی^۱ مناسبی برای سامانه آشکارسازی انتخاب نمود تا از تجمع پالس‌ها^۲ و تاثیر تصادفی بودن زمان خیزش پالس‌ها بر روی طیف ارتفاع پالس‌ها جلوگیری شود.

در مقایسه با تیوب‌های BF_3 ، شمارنده‌های 3He می‌توانند در فشارهای بالاتری با رفتاری قابل قبول برای تکثیر گازی، مورد استفاده قرار گیرند. از این رو در کاربردهایی که به بازده بالایی برای سامانه آشکارسازی نیاز است، استفاده از آشکارسازهای 3He ترجیح داده می‌شوند. از آن‌جا که انرژی آزاد شده در واکنش $^3He(n,p)$ نسبتاً پایین است، از این رو جداسازی نوترون و گاما در مقایسه با آشکارساز BF_3 مشابه مشکل‌تر می‌باشد. هنگامی که نرخ تابش پرتوهای گاما بالا است، اثر تجمع پالس‌ها می‌تواند باعث هم‌پوشانی زمانی پالس‌ها شود. بدین ترتیب دیگر امکان جداسازی وجود نخواهد داشت. کاهش زمان شکل‌دهی سامانه آشکارسازی می‌تواند باعث تخفیف اثر تجمع پالس‌ها شود. از این رو در برخی از انواع آشکارسازهای 3He برای افزایش سرعت سوق الکترون‌ها از گازهای افزودنی مانند CO_2 و Ar به گاز 3He استفاده می‌شود.



شکل (۶-۲) طیف ارتفاع پالس‌ها در آشکارساز 3He نوعی.



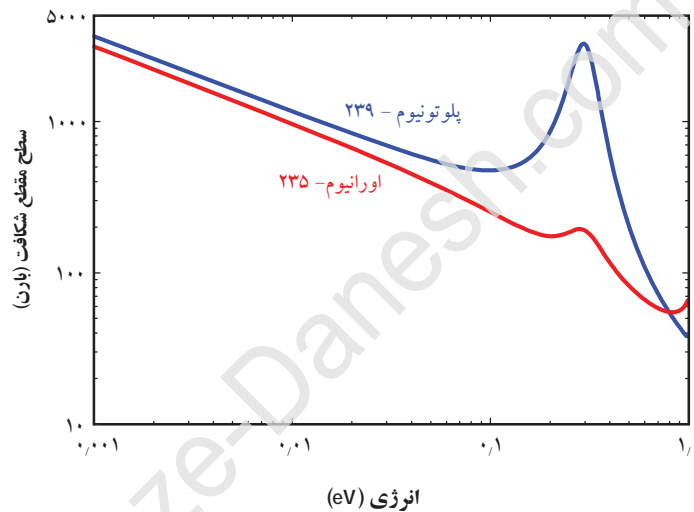
شکل (۷-۲) زمان خیزش پالس‌ها در آشکارساز 3He نوعی. علاوه بر زمان خیزش شکل پالس‌ها نیز تصادفی می‌باشد.

¹ Shaping Time

² Pulse Pile-up

آشکارساز اتاقک شکافت^۱

سطح مقطع شکافت عناصری مانند ^{233}U ، ^{235}U و ^{239}Pu به طور نسبی در انرژی‌های حرارتی بزرگ است. از این رو این مواد می‌توانند جهت ساخت آشکارسازهای نوترون‌های حرارتی استفاده شوند. یکی از خصوصیت‌های ویژه‌ی واکنش شکافت، آزادسازی انرژی بالا (حدود ۲۰۰ MeV) است. در نتیجه ارتفاع پالس‌های تولیدی ناشی از شکافت با نوترون‌های حرارتی در مقایسه با واکنش‌های مزاحم با منشاء پرتوهای گامای زمینه، بسیار بزرگ‌تر است. از این رو، جداسازی پالس‌های ناشی از نوترون‌ها و پرتوهای گامای زمینه به نحو مطلوبی امکان‌پذیر می‌باشد. شکل (۸-۲) نشان‌دهنده سطح مقطع شکافت برای دو ایزوتوپ ^{235}U و ^{239}Pu در انرژی‌های مختلف است. تقریباً تمامی مواد شکافان به صورت آلفایی و شکافت خودبخودی^۲ واپاشی می‌کنند. در نتیجه، پس‌زمینه‌ای از شمارش‌ها در سیگنال^۳ خروجی آشکارساز حتی در عدم حضور میدان نوترونی، مشاهده می‌گردد. نظر به خصوصیت‌های فیزیکی و شیمیایی ترکیب گازی شکل عناصر شکافان، امکان استفاده از حالت گازی شکل این مواد در ساخت آشکارسازهایی از این نوع وجود ندارد.



شکل (۸-۲) سطح مقطع شکافت برای ^{239}Pu و ^{235}U .

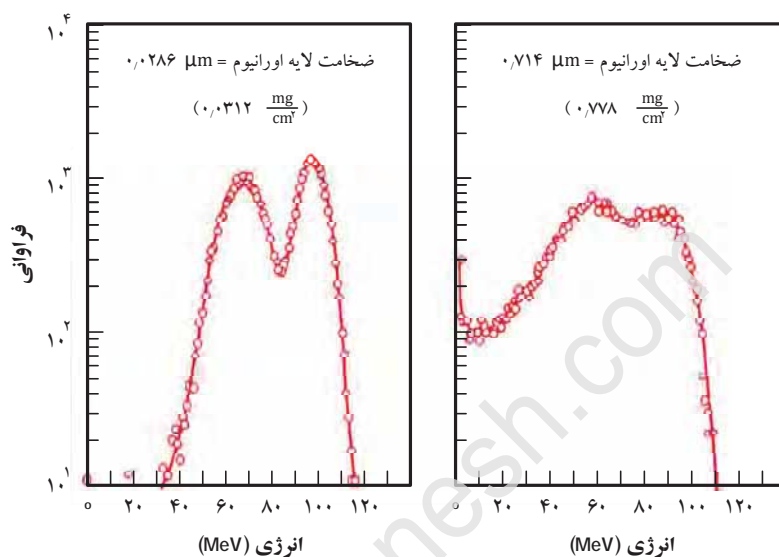
طیف ارتفاع پالس‌های خروجی آشکارساز اتاقک شکافت در وحله اول به ضخامت و شرایط هندسی لایه‌ای از عنصر شکافان که درون استوانه آشکارساز لایه‌نشانی می‌شود بستگی دارد. در واقع این شرایط نحوه رسیدن پاره‌های شکافت از محل جذب منجر به شکافت نوترون در عنصر شکافان به گاز درون آشکارساز را مشخص می‌کند. در حالتی که ضخامت لایه عنصر شکافان در مقایسه با گستره نفوذ پاره‌های شکافت کوچک است، شکل دو کوهان برای طیف ارتفاع پالس‌ها مشاهده می‌گردد. قابل ذکر است قله مربوط به پاره‌های شکافت سنگین‌تر در حدود انرژی ۷۰ MeV و قله مربوط به پاره‌های شکافت سبک‌تر در حدود انرژی ۱۰۰ MeV است. چنانچه ضخامت لایه عنصر شکافان جهت افزایش بازده آشکارسازی بیش‌تر شود، متوسط انرژی ذرات رسیده به گاز جهت ایجاد یونیزاسیون کاهش یافته و شکل توزیع بدست آمده دچار اعوجاج خواهد شد. شکل (۹-۲) نشان‌دهنده طیف ارتفاع پالس‌های بدست آمده برای دو نوع آشکارساز اتاقک شکافت با ضخامت‌های مختلفی از لایه عنصر شکافان می‌باشد.

¹ Fission Chamber

² Spontaneous Fission

³ Signal

به همین دلیل، حداکثر ضخامت عملی برای لایه عنصر شکافان به حدود دو الی سه میلی گرم در واحد سطح $\left(\frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}\right)$ محدود می‌شود. برای آشکارسازی که ماده شکافان در آن تا درصد بالایی غنی شده است، در انرژی‌های حرارتی، بازده آشکارساز حدود ۰/۵٪ می‌باشد. این مقدار در انرژی ۰/۵ eV به ۰/۱٪ کاهش می‌یابد. نظر به آن که برد پاره‌های شکافت کوتاه و در حدود چند سانتی متر در گاز درون آشکارساز است، از این رو چنانچه قطر اتاقک شکافت در حدود این مقدار و بزرگ‌تر از آن باشد، تمامی انرژی این ذرات می‌تواند در حجم حساس آشکارساز جهت تولید زوج یون‌ها صرف شود.



شکل (۹-۲) طیف ارتفاع پالس‌های خروجی آشکارساز اتاقک شکافت برای دو ضخامت مختلف از لایه‌ی عنصر شکافان. شکل سمت راست دارای ضخامت بیش‌تری از عنصر شکافان می‌باشد، از این رو شکل طیف بدست آمده دچار اعوجاج شده است.

اثر دما بر سامانه‌های آشکارسازی نوترون

تغییرات دما در رآکتور ممکن است با تغییر در توزیع انرژی نوترون‌ها همراه باشد. اگر دمای رآکتور به قدر کافی تغییر کند که باعث کاهش چگالی در کندکننده^۱ شود، واضح است که تعداد نوترون‌های سریع و حرارتی که به آشکارساز می‌رسند به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. بنابراین، دما می‌تواند سبب افزایش و یا کاهش تعداد ذراتی شود که به آشکارساز می‌رسند. به علاوه تغییر دما سبب تغییر در سطح مقطع‌های هسته‌های محیط شده، در نتیجه پراکندگی، جذب پرتوزا، و یا آهنگ شکافت را نیز تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. هم‌چنین تغییر دما ممکن است حتی در شار ثابت نوترون، مستقیماً روی خود سامانه اثر گذاشته و سبب انحراف پاسخ مشاهده شده شود. تغییر دما سبب تغییر کمیت‌های الکترونیکی و در نتیجه تغییر نقطه کار سامانه آشکارسازی می‌شود. به این ترتیب با تغییر ولتاژ بایاس آشکارساز، تغییر بهره تقویت‌کننده، تغییر در خصوصیت‌های خطوط انتقال سیگنال‌های الکتریکی (مانند تغییر ظرفیت خازنی کابل‌های کواکسیال)، و حتی تغییر در رسانش هوایی که سامانه‌های آشکارسازی با آن در تماس هستند نیز سبب تغییر پاسخ کل سامانه آشکارسازی می‌شود. معمولاً طراحی ادوات الکترونیکی و سامانه‌های آشکارسازی به گونه‌ای است که پاسخ مشاهده شده در مقابل عوامل محیطی مانند تغییرات دما مقاوم است. به هر

¹ Moderator

حال دما یکی از عوامل محیطی اثر گذار است و معمولاً در برهه‌های داده^۱ سامانه‌های آشکارسازی، حساسیت به آن گزارش می‌شود.

اثر تابش گاما بر پاسخ آشکارسازهای نوترون

یکی از اجزاء جدایی‌ناپذیر میدان‌های نوترونی، پرتوهای گاما هستند. هر جا که سخن از آشکارسازی نوترون است، بحث جداسازی پالس‌های گاما و نوترون نیز مطرح می‌شود. همه آشکارسازهای نوترون که تا به این جا در رابطه با آن‌ها بحث شد، از نوع اتاقک یونش هستند. در نتیجه به پرتوهای گاما نیز حساس بوده و برخی از پالس‌های خروجی از آن‌ها دارای منشاء پرتوهای گاما هستند. در بحث مربوط به آشکارسازی نوترون‌ها، پرتوهای گاما به عنوان پرتوهای مزاحم محسوب می‌شوند. معمولاً آشکارسازی نوترون به واسطه برهم‌کنشی صورت می‌گیرد که انرژی قابل توجهی را آزاد می‌کند. هر چقدر که مقدار انرژی آزاد شده بیش‌تر باشد، آشکارساز مورد نظر در مقابل پرتوهای گاما از مصونیت بیش‌تری نیز برخوردار است. بر همین اساس به‌ترین آشکارساز نوترون از حیث مصونیت در مقابل تداخل پرتوهای گاما، آشکارسازهای اتاقک شکافت (با 80 MeV انرژی سهم هر پاره شکافت)، آشکارساز BF_3 (با انرژی $1,47 \text{ MeV}$ سهم ذره آلفا و $0,84 \text{ MeV}$ سهم ذره ${}^6\text{Li}$) و آشکارساز ${}^3\text{He}$ (با $0,747 \text{ MeV}$ کل انرژی آزاد شده) به ترتیب دارای بیش‌ترین انرژی آزاد شده در برهم‌کنش با نوترون فرودی می‌باشند. چنان‌که در فصل سوم این کتاب آورده شده است، یکی از روش‌های حذف اثر پرتوهای گاما، استفاده از دو آشکارساز یونیزاسیون با مشخصه‌های کاملاً یکسان است که یکی فقط حساس به پرتوهای گاما و دیگری هم حساس به پرتوهای گاما و هم حساس به نوترون (به واسطه‌غشایی از بور که درون محفظه آشکارساز لایه نشانی شده است) می‌باشد. به این آشکارساز در اصطلاح اتاقک یونیزاسون جبران شده^۲ می‌گویند.

آشکارسازی فوتون

وقتی صحبت از آشکارسازی فوتون به میان می‌آید، منظور نور مرئی است. آشکارسازهای نور را می‌توان به دو دسته کلی زیر تقسیم‌بندی نمود:

- ✓ آشکارسازهایی که جریان الکتریکی خروجی از آن‌ها متناسب و دارای رابطه‌ای خطی با شدت نوری است که تحت تابش آن قرار گرفته‌اند.
 - ✓ دسته‌ای از آشکارسازها دارای حساسیت فوق‌العاده‌ای بوده و قادرند تک فوتون‌های نور فرودی به سطح حساس آشکارساز را شمارش نمایند. در اصطلاح این نوع از آشکارسازها شمارنده فوتون نیز نامیده می‌شوند.
- از حیث ساختار کلی آشکارساز، این‌که از نیمه‌هادی ساخته شده باشند و یا به شکل تیوبی شیشه‌ای باشند (مانند آشکارساز تیوب تکثیر کننده فوتونی^۳) خود نوعی تقسیم‌بندی دیگری است که برای این نوع از آشکارسازها در نظر گرفته می‌شود.

¹ Datasheet

² CIC: Compensated Ionization Technology

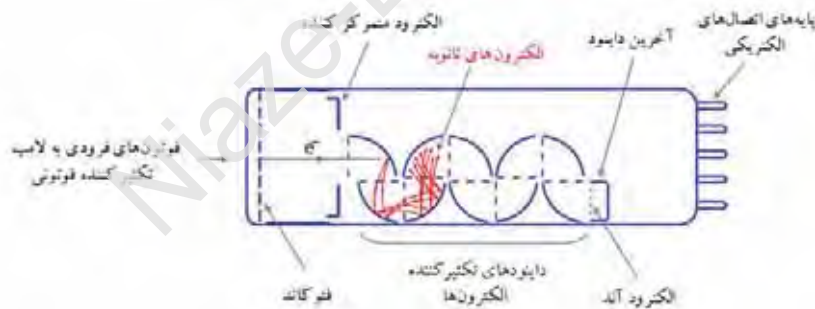
³ PMT: Photomultiplier Tube

تیوب تکثیر کننده فوتونی

تیوب تکثیر کننده فوتونی یکی از آشکارسازهای مهم فوتون است که در سال ۱۹۱۹ توسط جوزف اسلپین^۱ اختراع شد و در سال ۱۹۳۵ توسط ایمز و سلزبرگ^۲ ثابت شد که تیوب های تکثیر کننده فوتونی توانایی بی نظیری در آشکارسازی تک فوتون ها را دارند. علاوه بر سرعت پاسخ خوب و نوفه کم می توان تیوب های تکثیر کننده فوتونی را در ابعاد و شکل های متفاوتی متناسب با کاربردهای مورد نظر ساخت. اجزاء اصلی تیوب تکثیر کننده فوتونی در شکل (۱۰-۲) نشان داده شده است. قسمت های تشکیل دهنده تیوب های تکثیر کننده فوتونی را می توان به صورت زیر تقسیم بندی نمود:

- (i) فوتوکاتد: فوتون هایی که با سطح فوتوکاتد برخورد می کنند، با برهم کنش فوتوالکتریک، منجر به تولید فوتوالکترون ها می شوند.
- (ii) اپتیک الکترونی: قسمت متمرکز کننده و شتاب دهنده فوتوالکترون های صفحه فوتوکاتد روی اولین دایند می باشد.
- (iii) دایندها: دایندها وظیفه تکثیر الکترون ها و در نتیجه تقویت جریان را بر عهده دارند.
- (iv) الکتروود آند: الکتروود آند وظیفه جمع آوری الکترون ها را از آخرین دایند بر عهده دارد.

نمونه هایی از تیوب های تکثیر کننده فوتونی در ابعاد و شکل های مختلف در شکل (۱۱-۲) آورده شده است. بحث مربوط به تیوب تکثیر کننده فوتونی بسیار مفصل بوده و در این کتاب از شرح بسیاری از موارد مرتبط با آن مانند انتخاب مواد فوتوکاتد، فیلترهای اپتیکی پنجره ورودی نور، مشخصه های طیفی، حساسیت تابشی، مشخصات دایندها و انواع آن ها، بهره تقویت و بازده جمع آوری الکترون ها، مشخصه های پاسخ زمانی، خطی بودن آند، یک نواختی پاسخ نسبت به موقعیت آشکارساز، پایداری، گرم شدن^۳، و کهنگی^۴، بازگشت پذیری^۵ و تولید پس پالس^۶ صرف نظر شده است. در ادامه راجع به برخی از خصوصیت ها و ویژگی های تیوب های تکثیر کننده فوتونی به اختصار مطالبی آورده شده است.



شکل (۱۰-۲) تیوب تکثیر کننده فوتونی و اجزاء تشکیل دهنده آن.

¹ Joseph Slepian
² Iams and Salzberg
³ Warm-up
⁴ Aging
⁵ Hysteresis
⁶ Afterpulsing



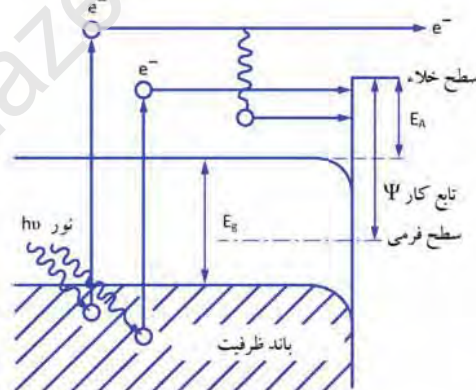
شکل (۲-۱۱) تیوب‌های تکثیرکننده فوتونی در ابعاد و شکل‌های متفاوت.

فوتوکاتد

تولید الکترون‌ها توسط فوتوکاتد در سه مرحله زیر صورت می‌گیرد:

- (i) جذب فوتون و تولید فوتوالکترون
- (ii) حرکت فوتوالکترون‌ها به طرف سطح فوتوکاتد
- (iii) انتشار فوتوالکترون‌ها از سطح فوتوکاتد به خلاء

شکل (۲-۱۲) نشان‌دهنده سطوح انرژی الکترون‌ها در ماده فوتوکاتد است، باندهای هدایت و ظرفیت با E_g جدا شده‌اند و سطح خلاء نشان‌دهنده حداقل انرژی الکترون جهت ترک سطح فوتوکاتد می‌باشد.



شکل (۲-۱۲) سطوح انرژی الکترون‌ها در ماده فوتوکاتد.

در مرحله اول، فوتون‌های فرودی به فوتوالکترون‌ها تبدیل می‌شوند، سپس مقداری از انرژی فوتوالکترون‌ها در هنگام جابجایی به سطح، توسط فرایند برخورد با الکترون‌های مقید اتم‌ها از دست می‌رود. در مرحله آخر فوتوالکترون‌ها باید انرژی کافی برای غلبه بر سد پتانسیل خلاء که همیشه بین مرز ماده و خلاء وجود دارد را داشته باشند. پس فوتوکاتدها جهت انتشار فوتوالکترون‌ها دارای آستانه انرژی برای فوتون‌های فرودی می‌باشند. این آستانه انرژی با توجه به شکل (۲-۱۲) برابر است با:

$$h\nu \geq E_g + E_A$$

(۲-۶)

در این رابطه داریم:

E_g : انرژی که باید به الکترون داده شود تا از باند ظرفیت به باند هدایت برود.

E_A : انرژی که باید به الکترون در باند هدایت داده شود تا خود را به سطح فوتوکاتد برساند.

جریان تاریک^۱

پارامتری مهم در تیوب‌های تکثیرکننده فوتونی، میزان جریان خروجی در تاریکی است. وابستگی جریان تاریک به دما برای چند نمونه از تیوب‌های تکثیرکننده فوتونی در شکل (۱۳-۲) نشان داده شده است. جریانی که در عدم حضور نور مشاهده می‌شود را جریان تاریک می‌نامند و با نماد I_{dc} نشان می‌دهند. جریان تاریک در تیوب تکثیرکننده فوتونی ناشی از عوامل اصلی زیر می‌باشد:

(i) جریان ناشی: عایق‌های مورد استفاده بین الکترودها ایده آل نمی‌باشند و امیدانس بی‌نهایت از خود نشان نمی‌دهند.

(ii) اثرات مربوط به مواد با رادیواکتیویته طبیعی که در ساختار خود تیوب وجود دارند. مهم‌ترین عنصر رادیواکتیو، پتاسیم ۴۰ و توریموم موجود در شیشه است. هم‌چنین به دلیل یونیزاسیون گاز باقیمانده در تیوب تکثیرکننده فوتونی به وسیله تابش پس‌زمینه محیط، کسری از جریان تاریک نیز توسط این نوع از تابش‌های محیطی که دارای منشأ مربوط به عناصر سازنده آشکارساز نمی‌باشند، تولید می‌گردد.

(iii) جریان ناشی از جدا شدن الکترون‌ها از سطح داینودها در اثر میدان الکتریکی قوی بین داینودها: شتاب الکترون‌ها در خلاء بین داینودها به واسطه میدان الکتریکی صورت می‌گیرد که توسط ولتاژ بالای اعمالی به تیوب تامین می‌شود. اگر ولتاژ اعمالی به آشکارساز بیش از حد باشد، میدان بین داینودها نیز به حدی قوی خواهد بود که سبب جدا شدن برخی از الکترون‌ها از داینودها می‌گردد. چنین شرایطی عمر مفید تیوب را نیز کاهش می‌دهد. وابستگی جریان تاریک به ولتاژ اعمالی به تیوب تکثیرکننده فوتونی در شکل (۱۴-۲) نشان داده شده است.

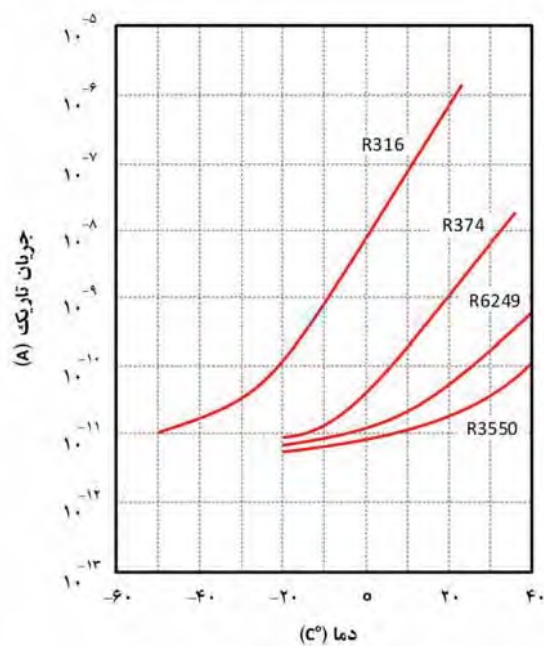
(iv) سوسوزنی بدنه شیشه‌ای تیوب تکثیرکننده فوتونی به واسطه الکترون‌هایی که از مسیر خود منحرف می‌شوند نیز خود یکی دیگر از منابع تولید جریان تاریک است.

(v) انتشار الکترون‌های حرارتی: کسر اعظم جریان تاریک ناشی از الکترون‌هایی است که پس از جذب انرژی گرمایی به وسیله فوتوکاتد گسیل می‌شوند. این فرایند به گسیل گرما یونی معروف است. رابطه‌ی ریچاردسون^۲ (رابطه‌ی (۲-۷)) مقدار تولید جریان گرما یونی را از فوتوکاتد بیان می‌کند:

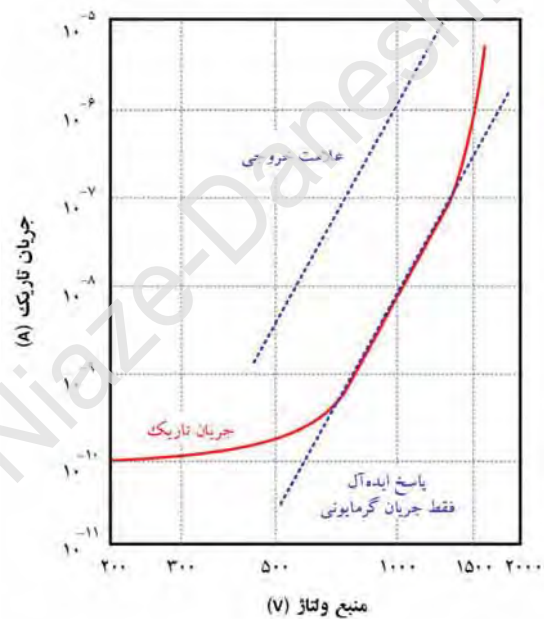
$$i_s = AT^{5/4} \exp\left(-\frac{e\psi}{KT}\right) \quad (2-7)$$

¹ Dark Current

² Richardson



شکل (۲-۱۳) وابستگی جریان تاریک به دما برای چند نمونه از تیوب‌های تکثیرکننده فوتونی شرکت .



شکل (۲-۱۴) وابستگی جریان تاریک به ولتاژ اعمالی به آشکارساز برای چند نمونه از تیوب‌های تکثیرکننده فوتونی.

در این رابطه داریم:

A : عدد ثابت

T : دمای مطلق

۱۷: تابع کار^۱

K: ثابت بولتزمن^۲

e: بار الکترون (C) 1.6×10^{-19}

رابطه‌ی (۷-۲) نشان می‌دهد که با خنک کردن تیوب تکثیرکننده فوتونی جریان تاریک کاهش می‌یابد و در نتیجه گستره‌ای که آشکارساز دارای پاسخی خطی است نیز افزایش می‌یابد.

معمولاً تیوب‌های تکثیرکننده فوتونی توسط خود شرکت سازنده مورد آزمون قرار گرفته و داده‌های تجربی مربوط به پارامترهای آشکارساز از جمله جریان تاریک در برهه‌های داده‌ای که به همراه محصول مورد نظر در اختیار طراح یا استفاده کننده قرار می‌گیرد، گزارش می‌شود. یکی از این پارامترها جریان تاریک معادل است و بیان کننده میزان شدت نوری است که اگر تیوب در معرض آن قرار گیرد، جریانی برابر با جریان تاریک را در پایانه آند جاری می‌سازد. این پارامتر ورودی معادل با جریان تاریک آند^۳ نیز خوانده می‌شود و برابر است با نسبت جریان تاریک به حساسیت نسبی تیوب در شدت نور مورد نظر که عبارتست از:

$$EADCI (Im) = \frac{\text{جریان تاریک}}{\text{حساسیت تابشی آند } \left(\frac{A}{lm}\right)} \quad (2-8)$$

در شکل (۱۵-۲) نمونه‌ای از داده‌های تجربی گزارش شده برای پارامتر فوق از طرف شرکت سازنده برای نمونه‌ای از تیوب‌های تکثیرکننده فوتونی آورده شده است.

جریان تاریک می‌تواند به صورت نوسانی نیز مشاهده شود. از این رو این خصوصیت از تیوب‌های تکثیرکننده فوتونی به دو دسته جریان تاریک مستقیم (DC) و جریان تاریک متناوب یا نوسانی (AC) تقسیم‌بندی می‌شود. هر آن چه که در مورد جریان تاریک در بخش‌های قبلی بیان شد، مربوط به جریان تاریک مستقیم بود. در کاربردهایی که لازم است تا شدت‌های بسیار ضعیف نور با استفاده از تیوب‌های تکثیرکننده فوتونی آشکار شود، بخش متناوب جریان تاریک، موجب اختلال در نتایج شده و سبب کاهش کارایی آشکارساز می‌شود. از این رو جریان تاریک متناوب یا به عبارتی همان نوفه^۴ که سیگنال خروجی از تیوب به آن آغشته است، خصوصیت مهمی از تیوب‌های تکثیرکننده فوتونی است. این خصوصیت با نام نوفه معادل ورودی^۴ در برهه‌های داده تیوب‌های تکثیرکننده فوتونی از طرف شرکت سازنده گزارش می‌شود. پارامتر نوفه معادل ورودی بیان کننده شدت نوری است که جریانی معادل با جریان نوفه (یا همان جریان تاریک متناوب) در خروجی آشکارساز تولید می‌کند. این پارامتر می‌تواند در واحد وات (W) در طول موج حداکثر بازدهی کوانتومی^۵ و یا در طولی موجی دلخواه توسط شرکت سازنده تیوب تکثیرکننده فوتونی گزارش شود. رابطه ریاضی زیر توصیف کننده نوفه معادل ورودی است:

$$ENI = \frac{\sqrt{yeI_d \mu BW}}{S} \quad (2-9)$$

که در آن:

^۱ Work Function: تابع کار فوتوکاتد اختلاف انرژی بین سطح انرژی فرمی و سطح انرژی خلاء می‌باشد.

^۲ Boltzmann Constant

^۳ EADCI: Equivalent Anode Dark Current Input

^۴ ENI: Equivalent Noise Input

^۵ تعریف بازده کوانتومی برای لامپ‌های تکثیرکننده فوتونی عبارت است از نسبت تعداد الکترون‌های گسیل شده از فوتوکاتد به تعداد فوتون‌هایی که با سطح فوتوکاتد برخورد کرده‌اند. این نسبت در طول موجی مشخص به حداکثر خود می‌رسد. این طول موج را طول موج حداکثر بازدهی کوانتومی می‌نامند.

e: بار الکترون ($C = 10^{-19} \times 1.6$)

I_d : جریان تاریک الکتروند آند

μ : ضریب تقویت جریان

BW: پهنای باند بسامدی مدار (هرتز)

S: حساسیت تابشی الکتروند آند (A/W)

در شکل (۱۶-۲) پاسخ تیوب تکثیرکننده فوتونی نمونه به ازای دو پهنای باند بسامدی متفاوت مشاهده می‌شود. چنان که مشهود است، پاسخ مداری که دارای پهنای باند بسامدی بالاتری است دارای لبه‌های تیزتری از پالس مشاهده شده می‌باشد. این در حالیست که نوفه در مقایسه با ارتفاع پالس ایجاد شده به طور نسبی بزرگ‌تر شده است. چنان که در رابطه (۹-۲) نیز مشاهده می‌شود، پارامتر نوفه معادل ورودی با مجذور پهنای باند بسامدی مدار رابطه مستقیمی دارد. همان‌طور که در شکل (۱۶-۲) نیز مشاهده می‌شود، ارتفاع پالس‌ها در خروجی آشکارساز به مدار طراحی شده و در نتیجه به پهنای باند بسامدی وابسته است. از این رو تعریف به‌تری از نوفه وجود دارد که نسبت سیگنال به نوفه^۱ نامیده می‌شود و عبارتست از:

$$SNR = \frac{I_p}{i_{p+d}} \quad (2-10)$$

در این رابطه داریم:

I_p : متوسط جریانی است که توسط فوتون‌ها ایجاد می‌شود

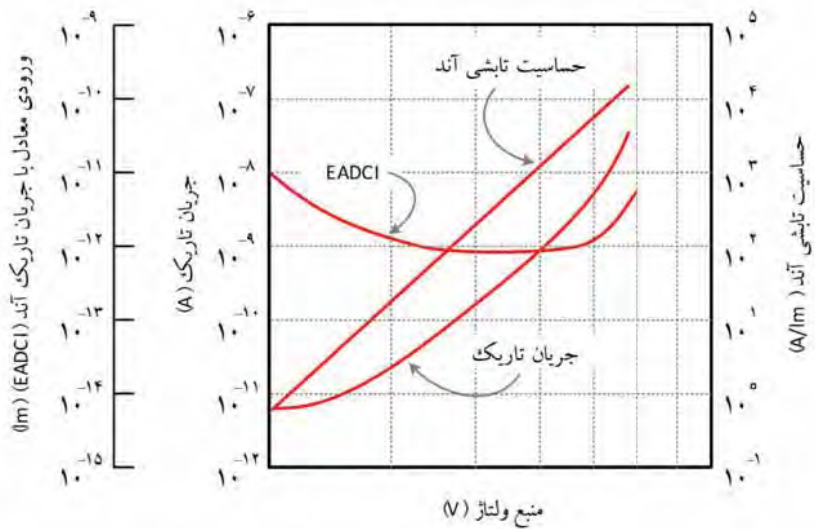
i_{p+d} : مجموع مقادیر موثر جریان تاریک متناوب و جریان فوتونی متناوب

اگر فرض کنیم بخش جریان تاریک مستقیم در مقایسه با کل جریان (I_{p+d}) مشاهده شده کوچک باشد، در این صورت می‌توان از تقریب زیر برای محاسبه نسبت سیگنال به نوفه استفاده نمود:

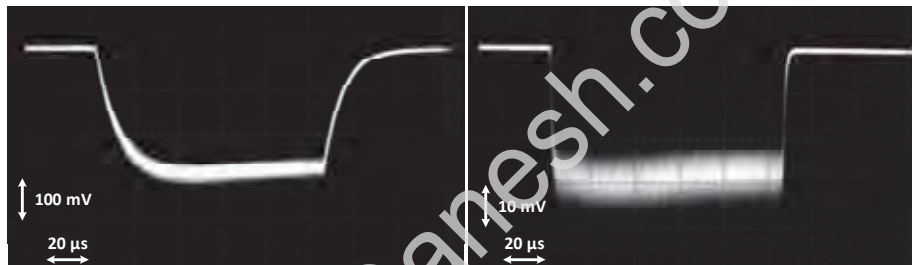
$$SNR = \frac{I_p}{i_p} \quad (2-11)$$

در این رابطه I_p مقدار متوسط و i_p بخش موثر و متناوب جریان فوتونی مشاهده شده در خروجی آشکارساز است. در شکل (۱۷-۲) به صورت مصور بخش‌های مختلف سیگنال خروجی مشاهده شده در پایانه آند تیوب تکثیرکننده فوتونی به تصویر کشیده شده است. خاطر نشان می‌سازد، I_d متوسط جریان تاریک و I_d مقدار موثر جریان تاریک متناوب هستند. نظر به آن که جریان خروجی توسط جاری شدن الکترون‌ها در پایانه آند برقرار می‌شود (چشمه بار منفی) پالس خروجی مشاهده شده نیز دارای منفی می‌باشد.

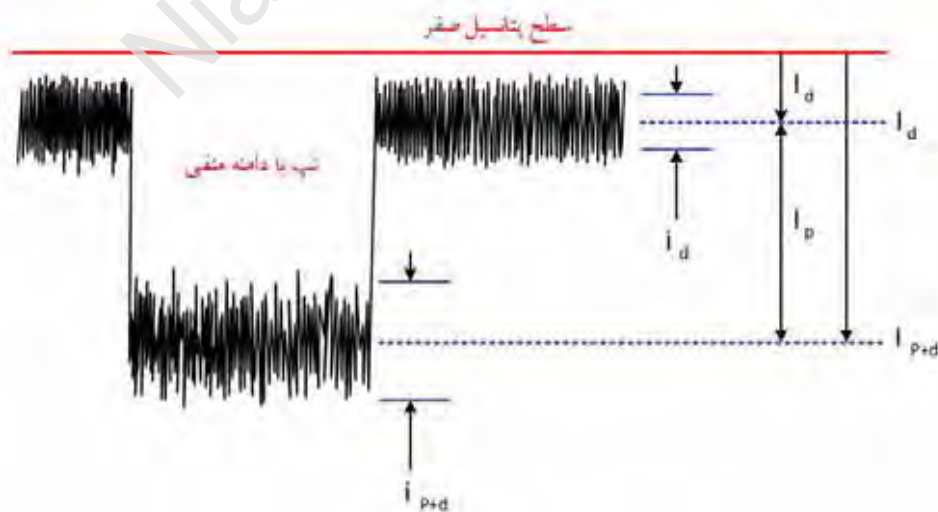
¹ SNR: Signal to Noise Ratio



شکل (۲-۱۵) نمونه‌ای از ورودی معادل با جریان تاریک آند.



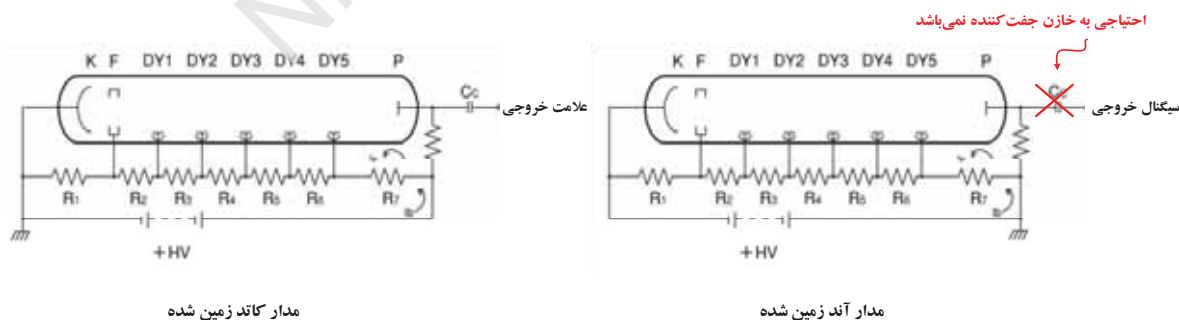
شکل (۲-۱۶) نوبه در سیگنال خروجی از یک نمونه خوب تکثیر کننده فوتونی. در شکل سمت راست، پهنای باند مدار مربوطه ۱۰ برابر نسبت به مدار شکل سمت چپ بزرگ تر شده است.



شکل (۲-۱۷) بخش‌های مختلف سیگنال خروجی مشاهده شده در خروجی پایانه آند تیوب تکثیر کننده فوتونی.

تقسیم کننده ولتاژ

یکی از موارد ضروری برای به کارگیری تیوب تکثیر کننده فوتونی، پایه^۱ مناسب تیوب یا آشکارساز است. پایه‌ی آشکارساز که توسط رابط‌های^۲ خاص به آشکارساز متصل می‌شود، وظیفه تامین ولتاژ تک‌تک داینودها را نیز برعهده دارد. منبع ولتاژ خارجی باید به گونه‌ای به تیوب تکثیر کننده فوتون متصل شود که فوتوکاتد و داینودهای آن در سطح ولتاژ مناسبی نسبت به یکدیگر قرار گیرند. از آنجا که الکترون‌ها باید توسط داینودها جذب شوند، اولین داینود باید در ولتاژی مثبت نسبت به فوتوکاتد قرار داشته باشد. در نتیجه هر داینود متوالی نیز باید در سطح پتانسیل مثبتی نسبت به داینود قبل از خود قرار داشته باشد. برای جمع آوری به‌تر الکترون‌ها، معمولاً ولتاژ بین اولین داینود و فوتوکاتد بزرگ‌تر از اختلاف پتانسیل بین داینودها است. تقریباً در اکثر موارد ایجاد پتانسیل‌های مختلف با تقسیم کننده مقاومتی به انجام می‌رسد. تیوب تکثیر کننده فوتونی به دو صورت کلی آند زمین شده^۳ و یا کاتد زمین شده^۴ بایاس می‌شود که هر یک مزایا و معایب خود را داراست. در مدار آند زمین شده (بخش سمت راست از شکل (۱۸-۲))، احتیاجی به خازن جفت کننده^۵ نمی‌باشد. جریان خروجی از آند می‌تواند به صورت مستقیم به مدارهای ثانویه (مانند مبدل جریان به ولتاژ با استفاده از تقویت کننده‌های عملیاتی) متصل شود. این نوع از بایاس کاربرد وسیع تری به دلیل سادگی آن داراست. ولی به دلیل آن که بدنه شیشه‌ای آشکارساز از بیرون در مقابل میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی عایق می‌گردد (عایق بیرونی در پتانسیل زمین قرار می‌گیرد) مشکلاتی را ممکن است سبب شود. الکترون‌ها تحت تاثیر پتانسیل مثبت عایق بیرونی از مسیر خود منحرف می‌شوند و در بدنه شیشه‌ای تولید تابش‌های سوسوزنی می‌کنند. به علاوه ممکن است جریان‌های کوچکی از فوتوکاتد از طریق برخی از قسمت‌های بدنه شیشه‌ای نشت کرده و منجر به آسیب آشکارساز شود. برای جلوگیری از این مسئله، بدنه آشکارساز را با رنگ^۶ مشکی و مخصوصی که عایق هم هست پوشش می‌دهند، به این نوع پوشش، پوشش HA^۶ گفته می‌شود. نحوه دیگر اتصال مدار بایاس آشکارساز، در بخش سمت چپ از شکل (۱۸-۲) نشان داده شده است. در این نوع اتصال که معمولاً در آشکارسازهای سوسوزن گاما استفاده می‌شود، کاتد در پتانسیل زمین قرار دارد و به خازن جفت کننده برای جداسازی سطح DC ولتاژ بالا از سیگنال خروجی از آشکارساز نیاز است. در آهنگی بالا از شمارش فوتون‌ها، جابجایی سطح پتانسیل DC سیگنال خروجی که ناشی از وجود خازن جفت کننده است، یکی از نگرانی‌های استفاده از چنین مدار می‌تواند باشد.

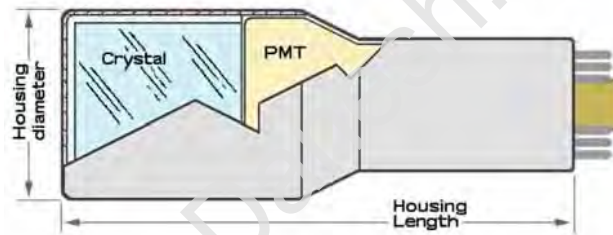


شکل (۱۸-۲) تقسیم کننده مقاومتی پتانسیل الکتریکی و نحوه اتصال آن به تیوب تکثیر کننده فوتونی.

- ¹ Base
- ² Connectors
- ³ Anode Grounding
- ⁴ Cathode Grounding
- ⁵ Coupling Capacitance
- ⁶ HA Coating

آشکارساز سوسوزن^۱

در این آشکارساز از ماده‌ای به نام سوسوزن استفاده می‌شود. سوسوزن‌ها موادی هستند جامد، مایع و یا گاز که وقتی تابش یوننده از آن‌ها می‌گذرد تولید جرقه یا نور می‌کنند. از جمله موادی که دارای این خصوصیت هستند می‌توان به LiI، CsI، NaI و ... اشاره نمود. مقدار نوری که در سوسوزن تولید می‌شود بسیار اندک است. بنابراین پیش از این که بتوان آن را به صورت یک پالس یا هر روش دیگری نگاشت، بایستی تقویت شود. تقویت نور سوسوزن با وسیله‌ای به نام تیوب تکثیرکننده فوتونی انجام می‌شود. اگر چه این نوع شمارنده عمومیت گسترده‌ای به عنوان سامانه مطلوب آزمایشگاهی به دست آورده، اما هنوز به عنوان وسیله‌ای برای کنترل رآکتور هسته‌ای به کار گرفته نشده است. دلیل اصلی آن است که اکثر کریستال‌های سوسوزن و یا مایعاتی که به نوترون حساس هستند به گاما نیز حساسند. هم‌چنین قسمت تکثیرکننده آشکارساز بسیار به دما حساس است. این حساسیت به نحویست که میزان نوفه تیوب تا حد زیادی با افزایش دما، افزایش می‌یابد. از آن‌جا که دمای اطراف قلب در اکثر رآکتورهای قدرت بالا است، این شمارنده برای نمایش قدرت رآکتور مناسب نیست. اما به هر حال شمارنده‌های سوسوزن به عنوان آشکارسازهای گاما در رآکتورهای با قدرت پایین و در آزمایشگاه‌های فیزیک هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل (۱۹-۲) نمایی از آشکارساز سوسوزن نوعی آورده شده است. بخش‌های کریستال، لامپ تکثیرکننده فوتونی و اتصال‌های الکتریکی آشکارساز بر روی شکل نشان داده شده است.



شکل (۱۹-۲) نمایی از آشکارساز سوسوزن با کریستال NaI.

آشکارسازهای نیمه‌هادی نور

ویژگی‌هایی هم‌چون جریان تاریکی کوچک (حساسیت خوب)، قابلیت تحرک خوب حامل‌های بار و در نتیجه سرعت پاسخ مناسب، نیمه‌هادی‌ها را ادواتی منحصر به فرد برای آشکارسازی نور ساخته است. اساس آشکارسازی نور در نیمه‌هادی‌ها اثر فوتوالکتریک است. سه مرحله در فرایند آشکارسازی نور توسط این آشکارسازها وجود دارد که عبارتند از:

- ✓ جذب فوتون در نیمه‌هادی و در نتیجه آن تولید حامل‌های بار الکتریکی
- ✓ جابجایی حامل‌های بار الکتریکی در اثر میدان الکتریکی مناسب داخلی
- ✓ جمع‌آوری حامل‌های بار در پایانه‌های قطعه نیمه‌هادی

آستانه فوتوالکتریک^۲ که انرژی لازم جهت تولید یک زوج الکترون - حفره در نیمه‌هادی می‌باشد، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$h\nu \geq E_g \Rightarrow \frac{hc}{\lambda} \geq E_g \Rightarrow \lambda \leq \frac{hc}{E_g} \quad (۱۲-۲)$$

¹ Scintillation Counter

² Photo-electric Threshold Energy

در این روابط λ حداکثر طول موج فوتون فرودی است (هر چه طول موج نور فرودی افزایش یابد انرژی فوتون کاهش می‌یابد)، E_g انرژی لازم جهت تولید یک زوج الکترون-حفره، h ثابت پلانک و C ثابت سرعت نور در خلاء است. رابطه فوق بیان می‌کند که فوتون‌های فرودی به آشکارساز بایستی دارای حداقل انرژی مورد نیاز برای جدا کردن یک الکترون مقید به اتم مقید خود باشند. بنابراین، طول موج بلند قطع در پاسخ طیفی به دلیل وجود آستانه انرژی E_g و طول موج کوتاه قطع نیز در نمودار پاسخ طیفی به علت کوچک شدن سطح مقطع واکنش فوتوالکتریک در طول موج‌های کوتاه است. مزایای آشکارسازهای نیمه‌هادی نور در مقایسه با دیگر آشکارسازها عبارتند از:

- ✓ ابعاد کوچک
- ✓ ولتاژ بایاس پایین (حتی می‌تواند در ولتاژ بایاس صفر هم مورد استفاده قرار گیرد)
- ✓ گستره طیفی پهن که طیف طول موجی UV تا IR دور را نیز می‌توان با تنظیم غلظت‌های مختلف ناخالصی در نیمه‌هادی‌ها بدست آورد.
- ✓ حداکثر بازده کوانتومی بالا
- ✓ مستحکم بودن قطعه و مقارم در برابر استرس‌های مکانیکی
- ✓ گستره وسیع دمای کاری
- ✓ متوسط زمان خرابی خوب¹
- ✓ قیمت پایین

انواع آشکارسازهای نیمه‌هادی عبارتند از نور رساناها²، دیو‌دهای نوری پیوندی³، دیو‌دهای نوری بهمنی⁴. دیود نوری پیوندی رایج‌ترین قطعه آشکارسازی است که در بسیاری از کاربردهای معمول یا اختصاصی استفاده می‌شود. مبنای اصلی عمل کرد دیود نوری پیوندی بسیار ساده است. دیود تحت بایاس معکوس کار می‌کند و در این حالت لایه تخلیه کاملاً عریض است و جریان تاریک کوچکی، جریان اشباع معکوس، در قطعه جریان دارد. فوتون‌ها عمدتاً در نواحی خنثی روی سطح فوقانی که نور بر آن فرود می‌آید جذب می‌شوند. فوتون‌های جذب شده زوج‌های الکترون-حفره را تولید می‌کنند. این حامل‌های تولید شده در لایه تخلیه به علت وجود گرانش معکوس در خلاف جهت یکدیگر شتاب می‌گیرند و جریان نوری را تولید می‌کنند. دامنه این جریان به بازدهی کوانتومی بستگی دارد. به‌طور کلی اگر هر فوتون یک زوج الکترون-حفره تولید کند بازدهی کوانتومی درونی، صد در صد خواهد بود. بنابراین فوتون‌های نور، در جریان معکوس دیود نوری پیوندی آشکار می‌شوند. این نوع قطعه عموماً دیود نوری با لایه تخلیه‌ای نامیده می‌شود. واضح است که لایه تخلیه عریض امکان جذب فوتون‌های بیش‌تری را فراهم می‌آورد و تعداد زوج‌های الکترون-حفره تولیدی را نیز افزایش می‌دهد، هرچند زمان گذر حامل‌ها در این ناحیه افزایش می‌یابد. در نتیجه زمان پاسخ دیود نیز افزایش یافته و عمل کرد سرعت بالای دیود افت می‌کند. پهنای باند به زمان گذر حامل‌ها، ظرفیت پیوند و مقاومت دیود بستگی دارد.

¹ MTF : Mean Time to Failure

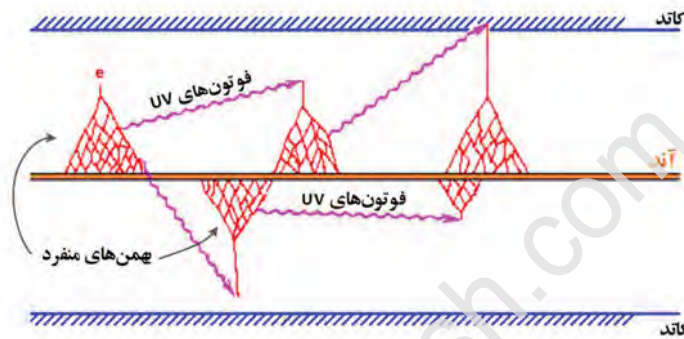
² Photoconductors

³ Junction Photodiodes

⁴ Avalanche Photodiodes

آشکارساز گایگر-مولر

در بین آشکارسازهای هسته‌ای، آشکارساز گایگر-مولر یکی از پر کاربردترین ابزارهای آشکارسازی در بخش‌های مختلف صنعت هسته‌ای است. ساختار این آشکارساز به گونه‌ای است که با برهم کنش ذره فرودی (که می‌تواند ذرات آلفا، بتا، و یا گاما باشد) و ایجاد الکترون اولیه، بهمنی از الکترون‌ها در حجم حساس آشکارساز به راه بیافتند. دو قطعه هادی به نام‌های آند و کاتد برای اتصال به مدارهای الکترونیک خارجی و منبع تغذیه ولتاژ بالا به آشکارساز متصل می‌باشند. قابل ذکر است که ولتاژ اعمالی به آشکارساز در حدی باید باشد که بتواند میدان الکتریکی با شدت مناسبی برای ایجاد بهمن فراهم کند. شکل (۲۰-۲) نشان‌دهنده چگونگی انتشار بهمن در امتداد تیوپ آشکارساز گایگر-مولر است.



شکل (۲۰-۲) نحوه شکل‌گیری بهمن الکترونی در حجم حساس آشکارساز گایگر-مولر.

بعد از هر بهمن الکترونی و گسترش آن در کل حجم حساس آشکارساز، تجمع یون‌های تولیدی سبب تضعیف میدان الکتریکی درون آشکارساز می‌شود. در نتیجه میدان حاصل ضعیف‌تر از میدانی خواهد بود که ذرات فرودی ثانویه قادر به ایجاد بهمنی جدید در آشکارساز باشند. به این ترتیب آشکارساز تا مدتی که بارهای تولیدی توسط الکترودهای با قطب مخالف جمع‌آوری می‌شوند غیر فعال می‌شود. این مدت زمان اصطلاحاً زمان مرده آشکارساز گایگر-مولر نامیده می‌شود. از آشکارسازهای گایگر-مولر معمولاً در رآکتور هسته‌ای برای اندازه‌گیری و پایش دز محیطی استفاده می‌شود. هم‌چنین این آشکارسازها در دزی‌مترهای قابل حمل^۱ محیطی و پرسنلی به فراوانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بازده آشکارسازی

می‌دانیم تنها کسری از ذراتی که از چشمه گسیل می‌شوند خود را به آشکارساز می‌رسانند. از طرفی ذراتی که به آشکارساز نیز می‌رسند در صورتی آشکار می‌شوند که با آشکارساز برهم کنش کرده و ایجاد یون‌های مثبت و منفی کنند. به این ترتیب بازده آشکارسازی به صورت ذیل تعریف می‌گردد:

$$\varepsilon_{\text{abs}} = \varepsilon_{\text{g}} \times \varepsilon_{\text{int}} \quad (۲-۱۳)$$

در رابطه‌ی فوق ε بازده آشکارسازی نامیده می‌شود که عبارتست از نسبت تعداد ذرات آشکارشده توسط آشکارساز به تعداد ذرات گسیل شده از چشمه. پارامترهای ε_{abs} و ε_{int} نیز به ترتیب بازده ذاتی و بازده هندسی نامیده می‌شوند. در ادامه هر یک از این پارامترها توصیف شده‌اند.

^۱ Portable

بازده هندسی: نسبت تعداد ذراتی که با آشکارساز برخورد کرده‌اند به تعداد ذرات گسیل شده از چشمه است. بازده هندسی توسط رابطه‌ی زیر توصیف می‌شود:

$$\varepsilon_g = \frac{\text{تعداد ذراتی که با آشکارساز برخورد کرده‌اند}}{\text{تعداد ذرات گسیل شده از چشمه}} \quad (2-14)$$

بازده ذاتی: نسبت تعداد ذرات ثبت شده توسط آشکارساز به تعداد ذراتی است که با آشکارساز برخورد کرده‌اند. بازده ذاتی توسط رابطه‌ی زیر توصیف می‌شود:

$$\varepsilon_{int} = \frac{\text{تعداد ذرات ثبت شده}}{\text{تعداد ذراتی که با آشکارساز برخورد کرده‌اند}} \quad (2-15)$$

مثال: چشمه‌ای نقطه‌ای را در نظر بگیرید. اگر صفحه‌ای دایره‌ای به قطر a در فاصله‌ی d از این چشمه قرار داشته باشد، بازده هندسی را برای آشکارساز فوق محاسبه کنید.

حل: اگر فرض کنیم بر دایره‌ی فوق (که نماینده‌ی سطح روبروی آشکارساز است) عرق چینی با شعاع r قرار دارد در این صورت داریم:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{a}{d} \quad (2-16)$$

$$ds = r d\theta r \sin\theta d\phi \quad (2-17)$$

در رابطه‌ی فوق ds المان دیفرانسیلی سطح عرق چینی است. می‌دانیم سطح کره‌ی کامل برابر با $4\pi r^2$ می‌باشد. در نتیجه بازده هندسی از رابطه‌ی ذیل بدست می‌آید:

$$\varepsilon_g = \int \frac{ds}{4\pi r^2} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{\sqrt{a^2 + d^2}} \right) \quad (2-18)$$

۵.۲.۲. پرتوچرنکوف

در اوایل سال ۱۹۳۴ دو مقاله مهم توسط سرگی ایوانوویچ واولوو^۱ و پاول الکسویچ چرنکوف^۲ در رابطه با پرتو جدیدی با نام پرتو چرنکوف یا پرتو واولوو-چرنکوف منتشر شد. در ادامه این فصل، این پرتو با نام پرتو چرنکوف خوانده خواهد شد. در این مقاله‌ها نشان داده شد که پرتوهای گامای گسیل شده از رادیوم، علاوه بر این که باعث لومینسنس^۳ می‌شوند، نور ضعیف دیگری نیز در مواد شفاف تولید می‌کنند که منشاء آن پدیده‌ی لومینسنس نمی‌باشد. با آزمایش‌های بیش‌تر ثابت شد که این نور مستقیماً توسط پرتوهای گاما به وجود نمی‌آید، بلکه از طریق الکترون‌های کامپتون با سرعت بالا تولید می‌شود. مشاهده‌های اولیه این تابش، که تابش چرنکوف^۴ نام گرفت، در زمانی انجام شد که تئوری الکترومغناطیسی تابش نور متبلور شده بود. بنابراین پیش‌زمینه تئوری مورد نیاز برای مطالعه این پدیده پیش‌تر فراهم شده بود. تأخیر در مطالعه این پدیده ناشی از چند دلیل اصلی بود. تا قبل از کشف پرتو چرنکوف، مطالعه‌های زیادی در زمینه خواص فلورسان^۵ و فسفرسان^۶ موادی که با نور ماوراء بنفش، پرتو ایکس^۷ و نیز پرتو گاما گسیل شده از مواد رادیواکتیو که تحت تابش قرار گرفته‌اند انجام شد. پدیده‌های گوناگون و نسبتاً پیچیده‌ای که

¹ Sergey Ivanovich Vavilov

² Pavel Alekseyevich Cherenkov

³ Luminescence

⁴ Cherenkov Radiation

⁵ Fluorescence

⁶ Phosphorescence

⁷ X-Ray

باعث به تأخیر افتادن کشف پرتو چرنکوف شد. شدت بسیار ضعیف پرتو چرنکوف در مقایسه با دیگر پرتوها و هم‌چنین در دسترس نبودن آشکارسازی با حساسیت بالا در ناحیه طول موجی پرتو چرنکوف، در به تأخیر انداختن شناخت این پدیده تا اواسط دهه ۴۰ میلادی نقشی اساسی ایفا کرد.

۱.۵.۲.۲. شناخت پدیده چرنکوف

حرکت ذره‌ای باردار در محیطی مادی و شفاف با سرعتی بیش‌تر از سرعت نور در آن محیط، سبب گسیل پرتو چرنکوف می‌شود. این پدیده مشابه شکست دیوار صوتی توسط پرتابه‌ای در هوا است. با این تفاوت که سرعت پرتابه نسبت به سرعت صوت در هوا سنجیده می‌شود. سرعت یک ماخ در سیال هوا، برابر سرعت حرکت صوت در آن محیط است. از آن‌جا که سرعت صوت در هوا وابسته به دما، رطوبت، ارتفاع از سطح دریا و یا دیگر عوامل محیطی است، یک ماخ سرعت نیز می‌تواند تحت شرایط فوق تغییر کند. شکل (۲۱-۲) نشان‌دهنده لحظه‌ای است که هواپیمایی نظامی در حال شکستن دیوار صوتی است. مخروطی که مشاهده می‌کنید، به علت بخار آب موجود در هوا تحت تاثیر موج‌های همدوس صوت می‌باشد. در سرعت‌های کم‌تر از یک ماخ، امواج صوتی در همه‌ی جهت‌ها منتشر می‌شوند، اما در حالتی که سرعت پرتابه بیش‌تر از سرعت صوت در محیط است (سرعت بیش‌تر از یک ماخ) امواج به صورت مخروطی که مشاهده می‌شود همدوس شده و در زاویه خاصی یکدیگر را تقویت می‌کنند. به این ترتیب امواج صوتی در یک جهت خاص متمرکز می‌شوند و در نتیجه یکدیگر را



شکل (۲۱-۲) لحظه شکسته شدن دیوار صوتی توسط هواپیمایی نظامی.

تقویت می‌کنند. هم‌خانواده دیگری از این پدیده حرکت قایقی بر روی سطح آب با سرعتی بیش‌تر از سرعت حرکت امواج سطحی است. در این حالت نیز امواج در جهت‌های خاصی همدوس و یا غیرهمدوس می‌شوند. ظاهراً باید مسئله‌ی حرکت ذرات باردار در ماده با سرعتی بیش‌تر از سرعت نور در آن محیط به دلیل عدم تطابق با تئوری نسبیت فراموش می‌شد، اما این مسئله بدون هیچ تضادی با تئوری نسبیت می‌تواند اتفاق بیفتد. این واقعیت این‌گونه بیان می‌شود که سرعت انتشار امواج نوری در یک ماده با سرعت نور در محیط خلا در یک عامل n متفاوت است، که n ضریب شکست محیطی است که نور در آن حرکت می‌کند. به عبارت دیگر سرعت انتشار امواج نوری در ماده برابر با C/n و از سرعت نور در خلا، C

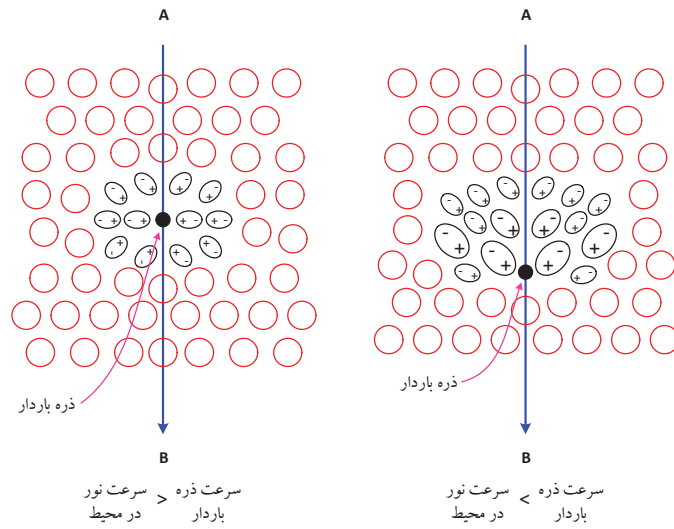
کوچک تر است. بنابراین بیش تر بودن سرعت ذرات متحرک در یک محیط از سرعت نور در آن محیط هیچ تضادی با تئوری نسبیت ندارد.

محیط شفافی را تصور کنید که ذره باردار الکترون در آن در حال حرکت است. هر یک از اتم‌های محیط از لحاظ بار الکتریکی خنثی هستند، اما تحت تاثیر میدان الکتریکی اطراف ذره باردار متحرک، اتم‌های محیط قطبیده می‌شوند. به تصویر سمت چپ از شکل (۲۲-۲) توجه کنید. ذره باردار نشان داده شده دارای سرعتی کم تر از سرعت نور در محیط است. در نتیجه توزیع اتم‌های قطبیده اطراف آن، توزیعی متقارن در جهت‌های مختلف است. به دلیل توزیع متقارن دوقطبی‌های تشکیل شده، در فاصله‌ای نسبتاً دور از ذره باردار هیچ میدانی وجود ندارد و در نتیجه تابشی نیز گسیل نمی‌شود. حال به تصویر سمت راست از این شکل توجه کنید. در این شکل، ذره باردار دارای سرعتی سریع تر از سرعت حرکت نور در محیط است. در نتیجه توزیع اتم‌های قطبیده اطراف ذره باردار، دارای توزیع نامتقارنی است. در این حالت میدان در همه جهت‌ها صفر نمی‌باشد. هر یک از اتم‌های قطبیده، در برگشت به حالت پایه تابشی گسیل می‌کند که در برخی از جهت‌ها با دیگر تابش‌ها تداخل مخرب و در جهتی خاص تداخل سازنده خواهد داشت.

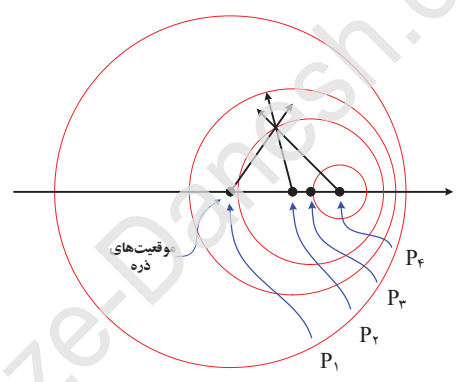
در شکل (۲۳-۲) امواجی نشان داده شده است که از ذره‌ای باردار و در حال حرکت با سرعتی کم تر از سرعت نور (یا انتشار امواج) گسیل شده‌اند. تمامی امواج به صورت شعاعی یا دایروی در حال انتشار هستند. در این حالت همیشه موجک‌ها از ذره جلوتر می‌باشند. هر نقطه‌ای از امواج منتشر شده را اگر در نظر بگیریم، تداخل‌های مخرب در همه جهت‌ها، از تابش الکترومغناطیسی جلوگیری می‌کند.

در مسیر حرکت ذره در محیط، هر نقطه‌ای در امتداد مسیر به ترتیب برانگیخته می‌شود و آن را می‌توان به عنوان یک چشمه همگن از امواج نوری کروی در نظر گرفت. همان‌طور که در شکل (۲۳-۲) مشاهده می‌شود، وقتی سرعت ذره از سرعت نور در محیط کم تر است، موجک‌های منتشر شده از تمام قسمت‌های مسیر با یکدیگر تداخل ویران‌گر می‌کنند، چون همدوس^۱ نیستند و در نتیجه اثر اپتیکی خالصی ندارند. اما وقتی سرعت ذره از سرعت نور در آن محیط بیش تر است، شکل (۲۴-۲)، این امکان برای موجک‌های تمام قسمت‌های مسیر وجود دارد که در فازی یکسان با یکدیگر تداخل سازنده داشته باشند. یعنی یک سطح مماسی برای تمام جبهه‌های موج وجود دارد که روی آن همه جبهه‌های موج، فاز مشابهی دارند، به عبارت دیگر تداخلی سازنده روی می‌دهد و در نتیجه جبهه موج همدوس که با زاویه θ نسبت به جهت حرکت ذره حرکت می‌کند، تولید می‌شود. این پرتو چرنکوف است که به صورت مخروط نوری با نیم زاویه θ به طرف جلو حرکت می‌کند.

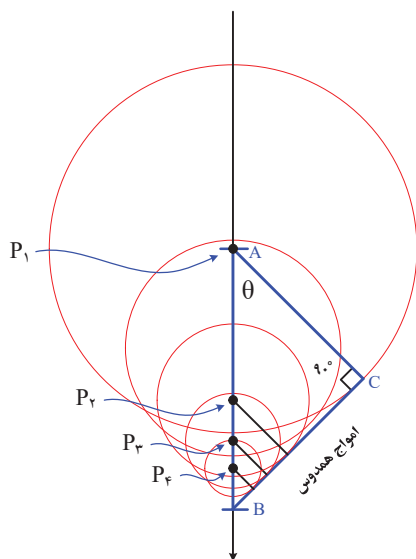
¹ Coherent



شکل (۲-۲۲) حرکت ذره باردار از بین اتم‌ها در محیطی شفاف و مادی.



شکل (۲-۲۳) حرکت ذره باردار با سرعتی کم‌تر از سرعت انتشار نور در محیط. همیشه ذره از موجک‌های منتشر شده عقب‌تر می‌باشد.



شکل (۲-۲۴) حرکت ذره باردار با سرعتی بیش تر از سرعت انتشار نور در محیط. همیشه ذره از موجک‌های منتشر شده جلوتر می‌باشد.

پرتو چرنکوف فقط در زاویه بخصوصی، θ ، نسبت به مسیر ذره مشاهده می‌شود. این مطلب را می‌توان بر اساس اصل هویگنس^۱ و با توجه به شکل (۲-۲۴) به صورت زیر بیان نمود. موجک‌ها از نقاط دل‌خواهی نظیر P_1 ، P_2 ، P_3 و P_4 با هم ترکیب می‌شوند تا جبهه موج تخت BC تشکیل شود. این همدوسی وقتی اتفاق می‌افتد که مدت زمانی که ذره مسیر AB را طی می‌کند با زمانی که نور مسیر AC را طی می‌کند، یکسان باشد. همان‌طور که در شکل (۲-۲۴) نشان داده شده است، ذره باردار در محیط شفاف از نقطه A به نقطه B با سرعتی بیش تر از سرعت نور در آن محیط حرکت می‌کند. فوتون‌های چرنکوف تحت زاویه θ نسبت به امتداد حرکت ذره گسیل شده و در هر لحظه از زمان، مماس بر خط BC می‌باشند. در این صورت از حساب مثلثات داریم:

$$AC = AB \times \cos \theta \quad (2-19)$$

اگر τ بازه زمانی باشد که در آن نور در محیط مادی مورد نظر مسافت AC را طی می‌کند، در این صورت داریم:

$$AC = \frac{C}{n} \times \tau \quad (2-20)$$

در این رابطه C سرعت نور در خلاء و n شاخص انکسار نور در محیط است. به‌طور مشابه، با فرض آن که سرعت ذره در این بازه زمانی ثابت و برابر با V است، داریم:

$$AB = V \times \tau \quad (2-21)$$

با ترکیب روابط (۲-۱۹) الی (۲-۲۱) به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\frac{AC}{AB} = \frac{C/n}{V} = \frac{1}{n\beta} = \cos \theta \quad (2-22)$$

یعنی:

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (2-23)$$

هم‌چنین می‌دانیم:

¹ Huygens Principle

$$\beta = \frac{V}{C} \quad (2-24)$$

در انرژی آستانه تولید پرتو چرنکوف، زاویه تابش θ ، برابر صفر است، پس:

$$\beta_{\min} = \frac{1}{n} \quad (2-25)$$

این رابطه نشان می‌دهد که:

- عکس ضریب انکسار نور در محیط مادی، معیاری از آستانه انرژی جنبشی ذره باردار برای تولید پرتو چرنکوف در محیط است.
- برای ذره‌ای فرانسیتی^۱ که نسبت سرعت آن به سرعت نور در خلاء نزدیک به یک است، زاویه حداکثری گسیل پرتو چرنکوف با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\theta_{\max} = \text{Cos}^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \quad (2-26)$$

۲.۵.۲.۲. تولید پرتو چرنکوف در محیط آب سبک

فرض کنید انرژی آستانه برای تولید پرتو چرنکوف برابر است با $E_{e_{\text{Th}}}$. در این صورت تفاضل انرژی کل و انرژی جرم در حال سکون الکترون برابر با این انرژی خواهد بود. از این رو داریم:

$$E_{e_{\text{Th}}} = m C^2 - m_0 C^2 = \frac{m_0 C^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0 C^2 = m_0 C^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \quad (2-27)$$

با جای گذاری رابطه (۲-۲۵) در این رابطه خواهیم داشت:

$$E_{e_{\text{Th}}} = m_0 C^2 \left(\frac{n}{\sqrt{n^2-1}} - 1 \right) \quad (2-28)$$

مقدار $E_{e_{\text{Th}}}$ در محیط آب سبک با شاخص انکسار $n = 1,334$ برای الکترون برابر با $0,26 \text{ MeV}$ است. از آنجا که الکترون‌ها (پرتوهای β) عمدتاً در داخل بافت کریستالی سوخت یا پوشش سوخت به دام افتاده و فقط کسر کوچکی امکان ورود به آب را پیدا می‌کنند، چشمه اصلی الکترون‌ها، فوتون‌های گاما می‌باشد. رآکتور تریگا نشان داده شده در شکل (۲-۲۵) را در نظر بگیرید، در محیط آب استخر این رآکتور منابع اصلی پرتو چرنکوف عبارتند از:

- ۱) پرتوهای گامای تولید شده در حین فرایند شکافت (پرتوهای گامای آبی)
- ۲) پرتوهای گامای ناشی از گیراندازی نوترون‌ها (در آب، در ساختار قلب رآکتور و ...)
- ۳) پرتوهای گاما و بتای ناشی از واپاشی محصولات شکافت
- ۴) واپاشی عناصر فعال شده در ساختار قلب رآکتور

پرتوهای گامای آبی با آب استخر رآکتور برهم کنش می‌کنند. محتمل‌ترین برهم کنش فوتون با ماده در گستره انرژی متوسط پرتوهای گامای آبی، 1 MeV ، برخورد کامپتون است. در برهم کنش کامپتون با زاویه پراکندگی برابر $\theta_{\text{Compton}} = \pi$ ، حداقل انرژی فوتون فرودی جهت تولید الکترون کامپتون با انرژی بیش‌تر از انرژی آستانه تولید پرتو چرنکوف در آب، برابر $0,423 \text{ MeV}$ است. با توجه به منابع نور چرنکوف در قلب رآکتور، شدت مشاهده شده تابع پرتوهای گامای آبی و تأخیری است.

¹ Ultra Relativeistic

در این ارتباط رابطه زیر نشان‌دهنده‌ی شدت کل پرتوهای گامای منتشره از قلب رآکتور نسبت به گذشت زمان بعد از شروع به کار رآکتور است.

$$\gamma(t) = \gamma_p \left(1 + K_{\gamma\infty} \left(1 - \sum_i \alpha_{\gamma_i} e^{-\lambda_{\gamma_i} t} \right) \right) \quad (2-29)$$

که در آن:

$\gamma(t)$: شدت کل فوتون‌های گاما

t : زمان پس از روشن شدن رآکتور

γ_p : شدت فوتون‌های گامای آبی در لحظه $t=0$

$K_{\gamma\infty}$: ضریب ثابت

α_{γ_i} : ضریب ثابت

i : اندیس گروه‌های تاخیری فوتون‌های گاما

λ_{γ_i} : ثابت واپاشی هر یک از گروه‌های تاخیری

شکل (2-25) نشان‌دهنده پرتو چرنکوف تولیدی در آب استخر رآکتور تریگا¹ نمونه است.



شکل (2-25) پرتو چرنکوف تولیدی در آب استخر رآکتور تریگا نمونه.

آشکارسازی پرتو چرنکوف

یکی از روش‌های مرسوم برای اندازه‌گیری شدت پرتو چرنکوف استفاده از لامپ‌های تکثیرکننده فوتونی است. از جمله مزیت‌های اساسی لامپ‌های تکثیرکننده فوتونی سطح بزرگ حساس به نور آنها است. به علاوه این آشکارسازها می‌توانند برای اندازه‌گیری شدت‌های خیلی کوچک و حتی شمارش تک فوتون‌ها نیز به کار گرفته شوند. امروزه ادوات فوتومتری بهینه‌تری

¹ TRIGA Reactor

نیز در دسترس هستند، مانند آشکارسازهای نیمه هادی نور که شرح مختصری از آن‌ها در بخش‌های قبلی آورده شد. پرتو چرنکوف در ناحیه نور بنفش و ماوراء بنفش از لحاظ طول موج فوتون‌های گسیل شده قرار دارد. از این رو بخشی از طیف طول موجی پرتو چرنکوف در ناحیه مرئی قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های اندازه‌گیری قدرت در رآکتور هسته‌ای اندازه‌گیری شدت پرتو چرنکوف تولیدی در آب استخر رآکتور است. در مورد خصوصیت‌های سامانه فوق در فصل سوم به طور مبسوط مطالبی آورده شده است. آشکارسازی پرتو چرنکوف بر اساس استفاده از آشکارسازهای نیمه هادی پیوندی می‌تواند صورت پذیرد. نظر به آن که این ادوات نیمه هادی قابلیت آرایه شدن را دارند، آرایه‌ای از این حس‌گرها برای بالا بردن سطح حساس به نور و در نتیجه تقویت نسبت سیگنال به نوفه استفاده می‌شود.

زمان مرده در سامانه‌های آشکارسازی

سامانه‌های آشکارسازی که در اندازه‌گیری‌های هسته‌ای به کار گرفته می‌شوند، معمولاً در حالت پالسی کار می‌کنند. یعنی زمان گسسته هستند. بر همین اساس به واسطه هر حادثه‌ای^۱ که اتفاق می‌افتد و یا هر ذره‌ای که آشکار می‌شود، در بازه کوچکی از زمان، سامانه آشکارسازی درگیر فرایندی^۲ می‌شود که هم وابسته به ساختار آشکارساز مربوطه و هم وابسته به مدارهای الکترونیک به کار گرفته شده است. مادامی که سامانه آشکارسازی درگیر فرایند آشکارسازی ذره قبلی است، چنانچه ذره فرودی جدیدی با آشکارساز واکنش انجام دهد، این ذره شمارش نشده و در نتیجه ثبت هم نمی‌شود. به این اثر اصطلاحاً اثر زمان مرده در سامانه‌های آشکارسازی اطلاق می‌شود. اثر زمان مرده سبب غیر خطی شدن و در نتیجه بروز خطای سیستماتیک در شدت‌های بالای تابش و متناظر آن در آهنگ‌های بالای شمارش می‌شود. برای کاهش اثر زمان مرده، مدل‌های مختلفی ارایه شده که می‌توان با استفاده از آن‌ها شمارش‌های ثبت شده را اصلاح نمود. در ادامه شرح کوتاهی از این مدل‌ها آورده شده است. لازم به ذکر است که در سامانه‌های زمان پیوسته (مانند سامانه‌های آشکارسازی که در حالت جریانی کار می‌کنند) اثر زمان مرده به صورت تاخیر زمانی بر رفتار سامانه مورد نظر خود را نمایان می‌سازد.

مدل فلج‌شونده^۳

در نمودار الف از شکل (۲۶-۲) به صورت مصور مدل فلج‌شونده به تصویر کشیده شده است. τ_p در این شکل، زمان مرده فلج‌شونده و پارامتری ثابت در نظر گرفته شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود در مجموع دو حالت ممکن می‌تواند حادث شود. در حالت اول، پرتویی با آشکارساز برهم‌کنش کرده و شمارش می‌شود. در حالت دوم، مادامی که آشکارساز درگیر شمارش قبلی است، چنانچه پرتو جدیدی با حجم حساس آشکارساز واکنش انجام دهد، زمان مرده سامانه آشکارسازی به اندازه τ_p تمدید می‌گردد. در واقع از بین سه برهم‌کنش، دو برهم‌کنش منجر به تولید پالس در خروجی آشکارساز شده‌اند. این مطلب در شکل فوق به صورت دو پالس جداگانه دیده می‌شود. در مدل فلج‌شونده زمانی که آشکارساز ذره‌ای را آشکار می‌کند، اگر در این بازه زمانی، ذره‌ی دیگری برهم‌کنش انجام دهد، پهنای پالس در امتداد زمان گسترش می‌یابد و به صورت پالس واحدی نمایان می‌شود. رابطه‌ی تحلیلی‌ای که برای این مدل ارایه شده است عبارتست از:

$$m = ne^{-n\tau_p} \quad (۲-۳۰)$$

در این رابطه، m ، آهنگ شمارش مشاهده شده و n ، آهنگ شمارش صحیح آشکارساز است.

¹ Event

² Process

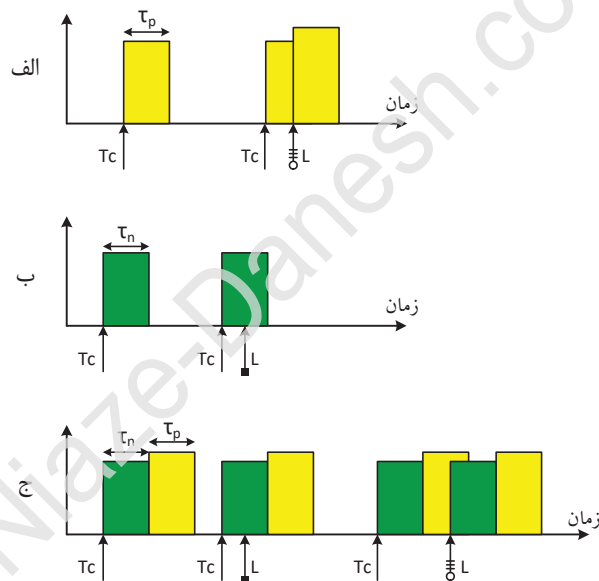
³ Paralizable Model

مدل غیر فلج شونده^۱

در بخش ب از شکل (۲-۲۶) مدل غیر فلج شونده نشان داده شده است. پالسی با پهنای زمانی ثابت τ_n برای نشان دادن هر روی داد در آشکارساز، در نظر گرفته شده است که در واقع همان زمان مرده در مدل غیر فلج شونده است. هر اتفاقی که در بازه زمانی τ_n در آشکارساز به وقوع بپیوندد، در نتیجه آن هیچ پاسخی در خروجی آشکارساز ظاهر نمی شود. چنان که مشاهده می شود، دو حالت ممکن وجود دارد. آشکارساز مادامی که درگیر شمارش ذره قبلی است، به طور کامل غیر فعال شده و قادر به آشکارسازی پرتوهای فرودی جدید نیست. در واقع از بین سه برهم کنشی که توسط ذرات در آشکارساز انجام شده، دو برهم کنش شمارش شده اند. این مطلب در شکل به صورت دو پالس جداگانه نمایش داده شده است. رابطه تحلیلی که برای این مدل ارائه شده است عبارتست از:

$$n = \frac{m}{1 - m\tau_n} \quad (۲-۳۱)$$

در این رابطه، τ_n ، زمان مرده غیر فلج شونده است. دیگر پارامترهای این رابطه دارای تعریف های مشابهی با رابطه (۲-۳۰) هستند.



شکل (۲-۲۶) مدل های مختلف زمان مرده و فرض های در نظر گرفته شده برای هر یک از آنها.

الف) مدل فلج شونده

ب) مدل غیر فلج شونده

ج) مدل ترکیبی

مدل ترکیبی^۲ زمان مرده

¹ Non-Paralizable Model

² Hybrid Model

مدل‌های فلج‌شونده و غیرفلج‌شونده دو حالت مختلف هستند که برای مدل کردن زمان‌مرده آشکارساز ارایه شده‌اند. در واقع کارکرد واقعی آشکارساز بین این دو حالت حدی است. از این‌رو مدل ترکیبی با دو درجه آزادی برای تنظیم پارامترهای زمان-مرده، دارای تطابق به‌تری با رفتار واقعی سامانه آشکارساز است. پاسخ مدل‌های فلج‌شوند و غیرفلج‌شونده در برخی از سامانه‌های آشکارسازی به‌قدر کافی به پاسخ واقعی نزدیک نمی‌باشد. از این‌رو مدل ترکیبی در چنین سامانه‌هایی که رفتار آن‌ها بین دو حالت حدی فلج‌شونده و غیرفلج‌شونده است، دارای سازگاری و تطابق بیش‌تری است.

در نمودار ج از شکل (۲۶-۲)، مدل ترکیبی نشان داده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود در مجموع سه حالت ممکن می‌تواند حادث شود. آشکارساز مادامی که درگیر شمارش قبلی است، چنان‌چه پرتو جدیدی با حجم حساس آشکارساز واکنش انجام دهد، اگر در بازه‌زمانی τ_n باشد، شمارش نمی‌شود. اما اگر در بازه‌زمانی τ_p باشد، کل فرایند زمان‌مرده آشکارساز به‌طور کامل تمدید می‌گردد. در نمودار ج از شکل (۲۶-۲)، از بین پنج برهم‌کنشی که در آشکارساز رخ داده، تنها سه پالس در خروجی ظاهر شده است. رابطه تحلیلی ارایه شده برای این مدل عبارتست از:

$$m = \frac{ne^{-n\tau_p}}{1+n\tau_n} \quad (۲-۳۲)$$

تمامی پارامترهای این رابطه دارای تعریف‌های مشابهی با پارامترهای آورده شده در روابط (۲-۳۰) و (۲-۳۱) هستند.

فرایند زمان‌مرده در آشکارسازهای گایگرمولر

در هر بار شمارشی که توسط آشکارسازهای گایگرمولر انجام می‌شود، کل حجم حساس آشکارساز در واکنش تکثیر بهمنی یون‌ها شرکت می‌کند. بر همین اساس برای مدت کوتاهی بعد از هر شمارش میدان الکتریکی درون آشکارساز توسط توده زوج‌یون‌های تولیدی تضعیف می‌گردد. از این‌رو آشکارساز در این بازه‌زمانی دیگر قادر به آشکارسازی پرتوهای فرودی جدید نخواهد بود. پس رفتار این آشکارساز به ازای شدت‌های بالای شمارش رفتاری غیر خطی است و شمارشی که انجام می‌شود نیز به تصحیح نیاز دارد. شکل (۲۷-۲) نشان‌دهنده نحوه رشد پالس‌های آشکارساز گایگرمولر است. به اولین پالس تولیدی توجه کنید، وقتی که از آخرین بهمن یون‌ها زمان زیادی سپری شده باشد، میدان درون آشکارساز برای تولید بهمنی کامل، آماده است. پس برهم‌کنش ذرات فرودی با آشکارساز سبب تولید پالسی با دامنه‌ی بزرگ می‌شود. درست بعد از وقوع بهمن در آشکارساز گایگرمولر، میدان الکتریکی به‌واسطه تجمع یون‌های مثبت در حجم آشکارساز تضعیف شده و اندازه آن به مقداری کم‌تر از مقدار بحرانی^۱ می‌رسد. اگر ذرات ثانویه‌ی دیگری در این شرایط با آشکارساز برهم‌کنش انجام دهند، با توجه به آن که بهمن به‌واسطه تضعیف میدان متوقف شده است، ذره فرودی آشکار نمی‌شود و تولید پالس جدیدی نیز صورت نمی‌پذیرد. در این بازه‌زمانی اصطلاحاً آشکارساز "مرده" است و قادر به آشکارسازی نمی‌باشد. چنان‌که در شکل (۲۷-۲) نیز نشان داده شده است، زمان‌مرده آشکارساز گایگرمولر به بازه‌زمانی اطلاق می‌شود که برای جبران میدان الکتریکی درون آشکارساز و در نتیجه فراهم آمدن امکان وقوع بهمنی جدید مورد نیاز است. بعد از سپری شدن بازه‌زمانی τ_n ، میدان الکتریکی درون آشکارساز رفته‌رفته بازسازی شده و شدت آن از شدت آستانه ایجاد بهمن الکترونی بیش‌تر می‌شود. از این‌رو چنان‌که مشاهده می‌شود هر چه زمان بیش‌تری سپری گردد، دامنه پالس‌های تولیدی نیز بزرگ‌تر می‌شود. مدت‌زمانی که بایستی سپری شود تا آشکارساز قادر به تولید پالس‌هایی با حداکثر دامنه شود را زمان بازیابی^۲ می‌نامند. در سامانه الکترونیک شمارنده، برای حذف نوفه‌های تداخلی، سیگنال

^۱ در آشکارسازهای گایگرمولر، شدت میدان الکتریکی درون آشکارساز دارای آستانه‌ای برای ایجاد بهمن است. منظور از کلمه بحرانی اشاره به این آستانه برای شدت میدان الکتریکی است.

خروجی آشکارساز را از مدار تمیزدهنده^۱ عبور می‌دهند. سطح تمیزدهنده در شکل (۲۷-۲) با خط چین قرمز رنگ نشان داده شده است. ثبت ذره‌ای که با آشکارساز برهم کنش انجام داده، صرف نظر از ارتفاع پالس تولید شده، مستلزم قطع سطح تمیزدهنده توسط پالس تولیدی می‌باشد. از این رو زمان مرده در سامانه آشکارسازی مدت زمانی بین زمان مرده آشکارساز و زمان بازیابی است. زمان مرده از جمله خصوصیت‌های فیزیکی آشکارساز گایگرمولر می‌باشد، درحالی‌که زمان مرده سامانه آشکارسازی علاوه بر آن که به خصوصیت‌های فیزیکی آشکارساز وابسته است به تنظیم‌های^۲ سامانه الکترونیک مربوطه نیز وابسته است. از این رو زمان مرده در آشکارساز گایگرمولر ترکیبی از عوامل مختلف است. برای مدل کردن زمان مرده در این آشکارساز، تحقیق‌های گوناگونی صورت گرفته که منجر به ارائه مدل‌های مختلفی نیز شده است. هر مدل با در نظر گرفتن فرضیه‌های متفاوت، سعی در ارائه رابطه‌ای ریاضی برای تصحیح خطای ناشی از زمان مرده دارد.



شکل (۲۷-۲) پالس‌های متوالی و با دامنه منفی و اثر زمان مرده در آشکارساز گایگرمولر.

روش‌های اندازه‌گیری زمان مرده

وابسته به این که آشکارساز مورد استفاده از چه نوعی باشد و یا مدل زمان مرده استفاده شده چه مدلی باشد، برای اندازه‌گیری زمان مرده سامانه آشکارسازی، معمولاً از بین روش‌های موجود یکی بنا بر نیازمندی‌های مسئله انتخاب می‌گردد. روش‌های معروف برای اندازه‌گیری زمان مرده در سامانه‌های آشکارسازی عبارتند از:

- روش واپاشی چشمه
- روش دو چشمه
- روش خیزش قدرت رآکتور^۳
- روش توزیع فاصله زمانی^۴

¹ Discrimination Circuit

² Set-up or Adjustments

³ Power Rising Experiment

⁴ Time Interval Distribution Method

دو روش اول معمولاً برای آشکارسازهایی غیر از آشکارسازهای نوترون و روش سوم فقط برای آشکارسازهای نوترون مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش آخر، روش توزیع فاصله زمانی، برای همه انواع آشکارسازها قابل استفاده است. روش‌های خیزش قدرت رآکتور و روش توزیع فاصله زمانی در فصل چهارم از این کتاب شرح داده شده‌اند.

مراجع

1. Arkani, M., Raisali, G., (2015). Measurement of dead time by time interval distribution method, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 774, 151-158.
2. Arkani, M., (2014) Measurement of Tehran and Esfahan Research Reactors Kinetic Parameters using Reactor Noise Diagnostic Methods, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnique), Nuclear Physics Department, Ph.D. Thesis.
3. Arkani, M., Khalafi, H., Vosoughi, N., (2013). A flexible multichannel digital random pulse generator based on FPGA, World Journal of Nuclear Science and Technology, 3(4), 109-116.
4. Arkani, Massome, Khalafi, H., Arkani, Mohammad (2013). An improved formula for dead time correction of GM detectors, Nukluinika, 58(4): 533-536.
5. Arkani, Massome, Khalafi, H., Arkani, Mohammad (2013). Efficient dead time correction of G-M counters using feed forward artificial neural network, Nukluinika, 58(2):317-321.
6. Hamamtsu, Photomultiplier Tubes: Basics and Applications (Third Edition), 2006.
7. Jelley J. V., Cerenkov Radiation and its Applications, United Kingdom Atomic Energy Authority, 1958.
8. Knoll, G. F., Radiation detection and measurement: John Wiley & Sons, 1999.
9. Donati S., Photodetectors: Devices, Circuits and Applications, Prentice Hall PTR, 2000.

فصل سوم: معرفی رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی

در این فصل با موارد زیر آشنا می‌شوید

- (۱) آشنایی با رآکتور تحقیقاتی تهران و سامانه‌های جانبی یک رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی
- (۲) آشنایی با نحوه راه‌اندازی^۱ رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی
- (۳) آشنایی با کانال‌های اندازه‌گیری قدرت در رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی

مقدمه

ساخت رآکتور تحقیقاتی تهران در سال ۱۳۴۰ توسط شرکت AMF^۲ در منطقه امیرآباد آغاز شد. عملیات ساختمانی و سوخت‌گذاری شش سال به طول انجامید و سرانجام در روز ۲۰ آبان ماه سال ۱۳۴۶ این رآکتور بحرانی شد. رآکتور تحقیقاتی تهران ابتدا زیر نظر دانشکده علوم دانشگاه تهران بود و از سال ۱۳۵۳ و با تأسیس سازمان انرژی اتمی ایران، اداره و بهره‌برداری از آن به سازمان انرژی اتمی ایران منتقل شد. سوخت این رآکتور از نوع MTR^۳ می‌باشد. شکل (۱-۳) نمای بیرونی رآکتور تحقیقاتی تهران را نشان می‌دهد.

مشخصات عمومی رآکتور تحقیقاتی تهران

رآکتور تحقیقاتی تهران با اهداف زیر مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد:

- (۱) کاربری‌های رآکتورهای تحقیقاتی از قبیل تولید رادیو ایزوتوپ‌هایی که کاربردهای صنعتی، کشاورزی و پزشکی دارند، نوترون رادیوگرافی، دیفرکتور متری، و ...
- (۲) برآورده کردن نیازهای محققین هسته‌ای کشور و در اختیار گذاردن منبع نوترونی قوی برای طیف وسیعی از فعالیت‌های پژوهشی.
- (۳) آموزش نیروی انسانی متخصص برای بخش‌های مختلف صنعت هسته‌ای کشور.

این رآکتور از نوع استخری^۴ و غیرهمگن بوده و برای حداکثر قدرت حرارتی ۵ مگاوات طراحی شده است. آب سبک در این رآکتور نقش خنک‌کننده، کندکننده و حفاظ بیولوژیکی را برعهده دارد. استخر از سیمان و بتون آرمه ساخته شده که لایه داخلی آن از فلز استیل پوشانیده شده است. استخر رآکتور دارای دو بخش مرتبط با هم می‌باشد که قلب رآکتور^۵ در هر کدام از آنها می‌تواند قرار گیرد. در یک بخش، تسهیلاتی جهت آزمایش‌های پرتودهی مانند لوله‌های پرتودهی^۶ تعبیه شده است، که این بخش را ناحیه بسته^۷ می‌نامند. از بخش دوم که فضای اطراف قلب فقط محتوی آب می‌باشد می‌توان جهت مطالعات مربوط به اندازه‌گیری میزان پرتو و دیگر کاربردها استفاده کرد. این بخش ناحیه باز^۸ نامیده می‌شود. در شکل (۲-۳) تصویر سه بعدی استخر رآکتور و ملحقات آن دیده می‌شود. شکل (۳-۳) نشان‌دهنده نمای فوقانی استخر رآکتور تحقیقاتی

-
- 1- Reactor Start-up
 - 2- American Machine & Foundry Co.
 - 3- Material Testing Reactor
 - 4- Pool Type
 - 5- Reactor Core
 - 6- Beam Tubes
 - 7- Stall End
 - 8- Open Pool

MTR نوعی می‌باشد و قسمت‌های Stall End و Open Pool به ترتیب با نام‌های Core Position و Core Position No.1 نشان داده شده‌اند. ساختمان محفظه ایمنی رآکتور به شکل گنبدی و استوانه قائم می‌باشد. جهت جریان هوا مادامی که در زیر گنبد رآکتور فشار هوا منفی است از سمت بیرون به درون گنبد رآکتور می‌باشد. از این رو با این طراحی نشست مواد رادیواکتیو به بیرون بدون عبور از سامانه تهویه هوای رآکتور^۱ امکان پذیر نمی‌باشد. در بخش‌های بعدی راجع به سامانه تهویه هوای گنبد رآکتور اطلاعات بیش تری آورده شده است.



شکل (۳-۱) نمای بیرونی از رآکتور تحقیقاتی تهران.

جدول (۳-۱) برخی از مشخصات و ویژگی‌های مهم رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی.

| | |
|------------------------------------|--|
| استخری از نوع MTR | نوع رآکتور |
| ۵ مگاوات | قدرت نامی |
| ۱۰ متر | عمق تقریبی استخر |
| U_3O_8Al | آلیاژ سوخت |
| صفحه‌ای | نوع سوخت |
| تقریباً $7,1 \times 8,1$ سانتی‌متر | گام شبکه قلب رآکتور |
| ۵ | تعداد بسته‌های سوخت کنترلی |
| ۱۹ | تعداد صفحات سوخت در هر بسته سوخت استاندارد |
| ۱۴ | تعداد صفحات سوخت در هر بسته سوخت کنترلی |
| ۲۰ درصد | درصد غنای سوخت |

مشخصات قلب و سوخت رآکتور

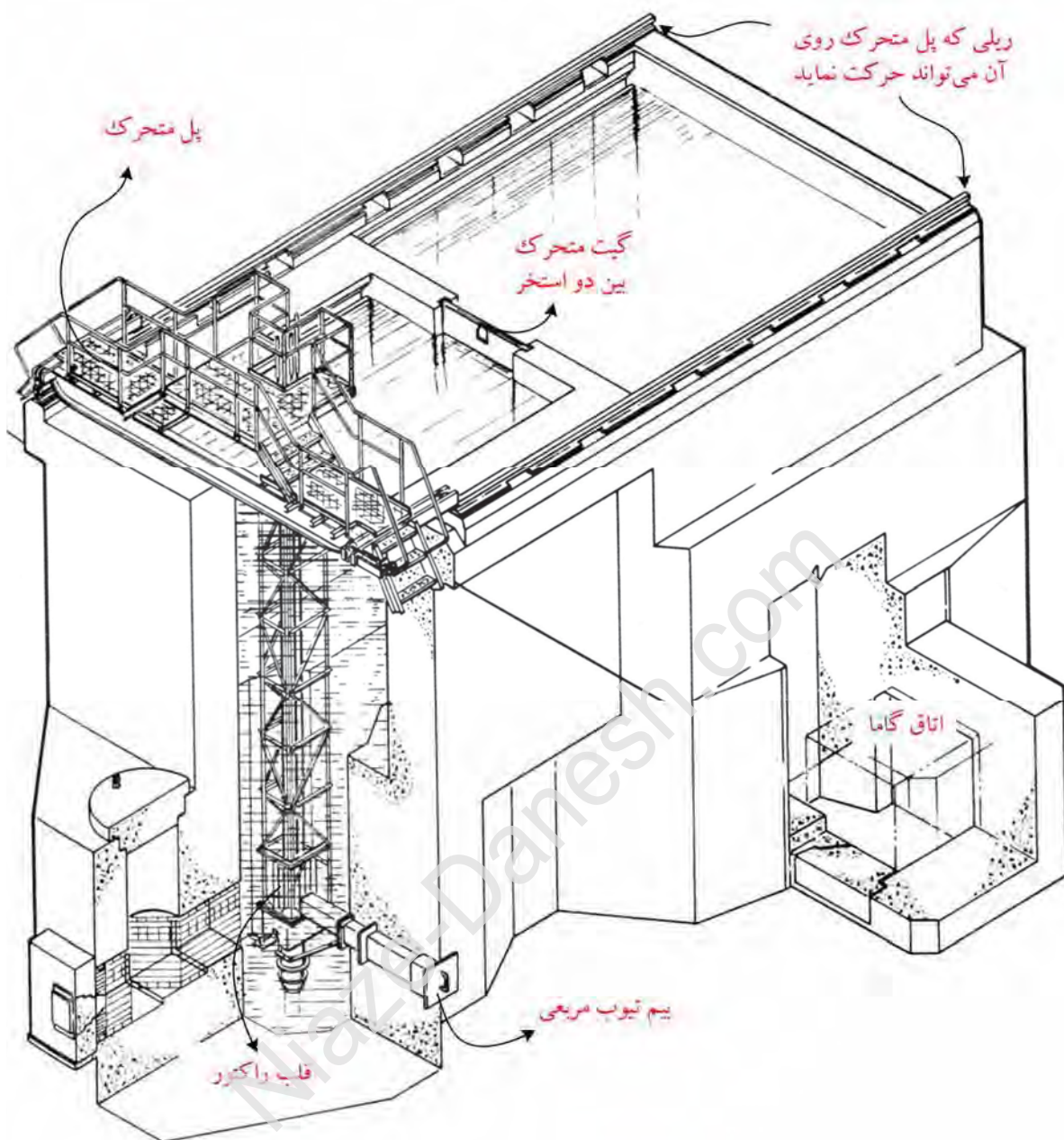
صفحه نگه‌دارنده عبارت است از شبکه‌ای آلومینیومی که دارای ۵۴ محل برای قرارگیری بسته‌های سوخت و دیگر اجزاء قلب می‌باشد. بسته‌های سوخت هر یک در محل خود روی این صفحه مستقر می‌گردد و مجموعه آن‌ها قلب رآکتور را تشکیل می‌دهد. این صفحه در عمق حدود ۸ متری از آب استخر رآکتور قرار گرفته است.

شکل (۳-۵) چیدمان نمونه از قلب یک رآکتور MTR نوعی را نشان می‌دهد. در این شکل تعداد ۱۹ مجموعه از بسته‌های سوخت نشان داده شده است. محل‌های خالی مناسب برای قرار دادن نمونه‌ها با IR BOX نمایش داده شده‌اند. عبور آب خنک کننده فقط از میان بسته‌های سوخت می‌باشد و از محل‌های خالی روی صفحه نگه‌دارنده آب عبور نمی‌کند.

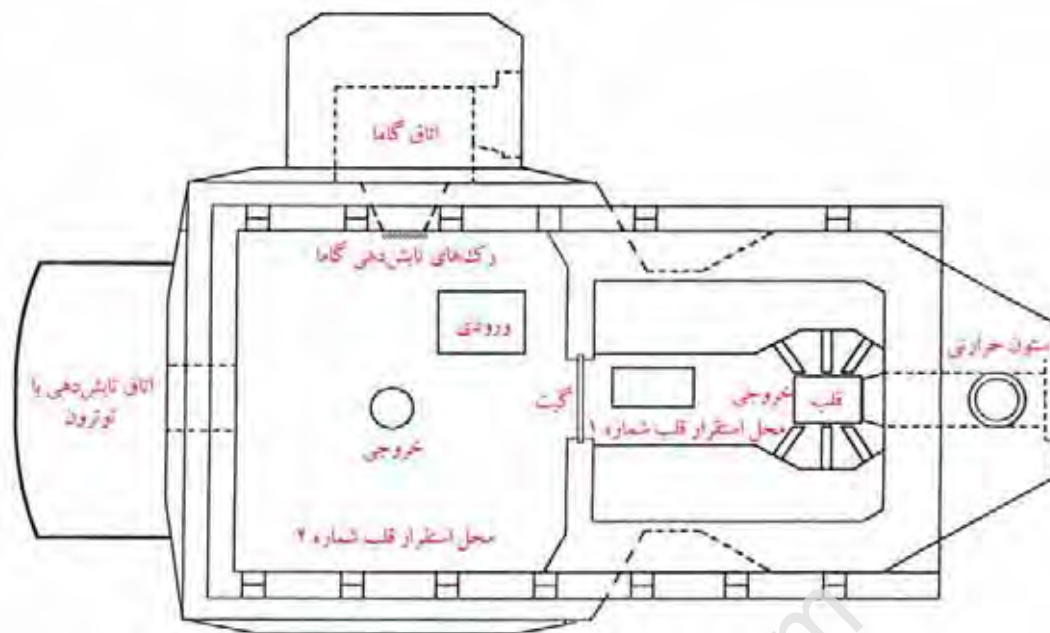
سوخت اولیه این رآکتور آلیاژی از آلومینیوم و اورانیوم با درصد غنای بالا^۱ یعنی U^{235} ۹۳٪ بوده است. در سال ۱۳۷۲ سوخت رآکتور از درجه غنای بالا به درجه غنای پایین^۲ یعنی ۲۰٪ تبدیل گردید، و از آن تاریخ رآکتور با سوخت جدید کار می‌کند. ترکیب شیمیایی سوخت جدید به صورت U_3O_8Al می‌باشد.

1- HEU: High Enriched Uranium

2- LEU: Low Enriched Uranium



شکل (۲-۳) نمای سه بعدی استخر راکتور و ملحقات آن



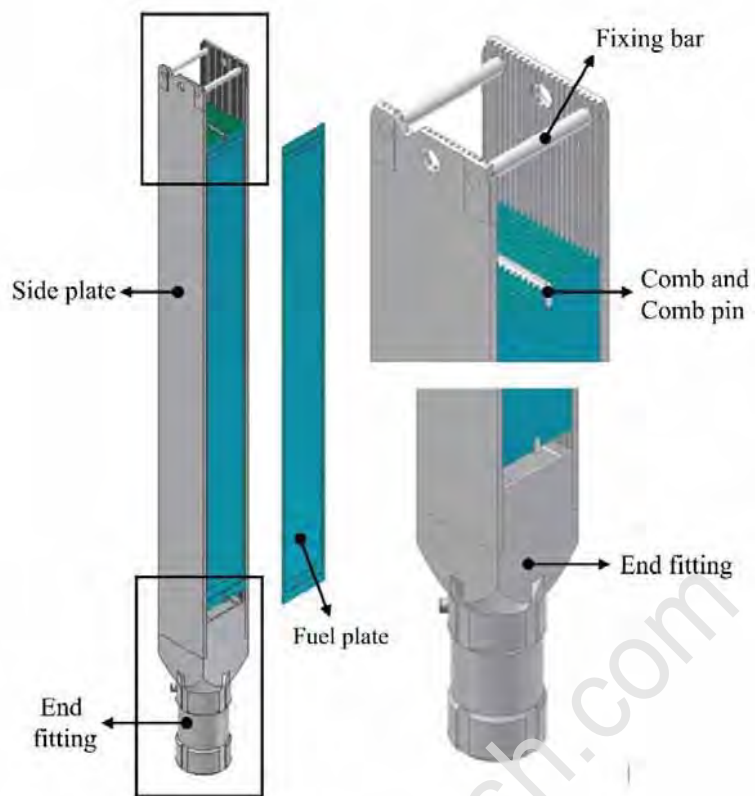
شکل (۳-۳) نمای فوقانی استخر رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی.

در شکل‌های (۳-۴) و (۳-۶) نمونه سوخت‌های یک رآکتور MTR نوعی نشان داده شده است. کل مجموعه سوخت، قلب و صفحه نگه‌دارنده^۱ بر روی محفظه‌ای به نام پلنوم نصب گردیده است. در مواقع بعد از خاموشی و در قدرت‌های زیر ۱۰۰ کیلو وات در پیچه فلاپر روی محفظه پلنوم باز شده و اجازه خنک‌کنندگی قلب به صورت طبیعی را می‌دهد. محفظه پلنوم و صفحه نگه‌دارنده در شکل (۳-۷) نشان داده شده است. این مجموعه در راستای فلسفه استفاده از بیشترین عوامل غیر فعال در ایجاد حداکثر ایمنی طراحی شده است و به ویژگی ایمنی مهندسی شده^۲ موسوم است.

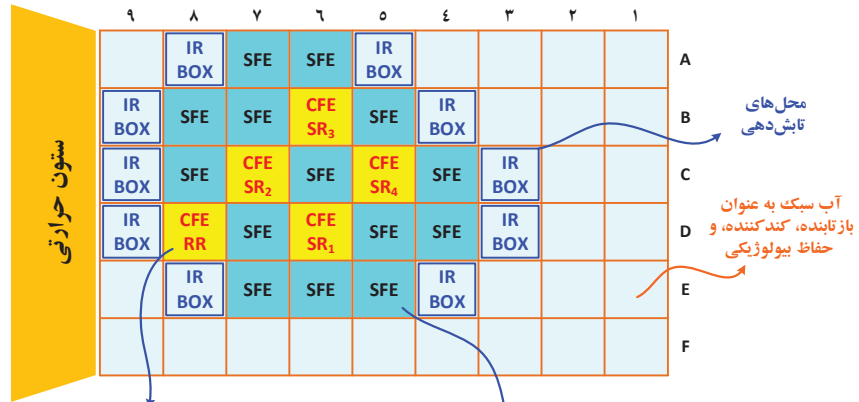
سامانه ستون حرارتی^۳

بطور کلی نوترون‌های درون قلب رآکتور دارای طیفی از انرژی‌های مختلف می‌باشند. سامانه ستون حرارتی می‌تواند با استفاده از مقدار زیادی گرافیت که بصورت مکعب مستطیل روی هم سوار شده‌اند، نوترون‌های حرارتی را برای اهداف پرتودهی تامین کند. نوترون‌های حرارتی مشخصاً دارای انرژی در محدوده حرارتی با انرژی میانگین 0.025 eV می‌باشند. شکل (۳-۸) نشان‌دهنده موقعیت لوله‌های تابش‌دهی جانبی قلب و ضمناً موقعیت ستون حرارتی می‌باشد.

- 1 - Grid Plate
- 2 - Engineered Safety Feature
- 3 - Graphite Thermal Column

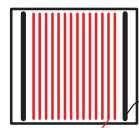


شکل (۳-۴) نمایی از ساختار بسته‌ی سوخت استاندارد یک راکتور MTR نوعی. هر صفحه دارای سوخت و غلاف آلومینیومی است.

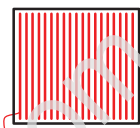


CFE: Control Fuel Element
 RR: Regulating Rod
 SR: Shim Rod / Safety Rod

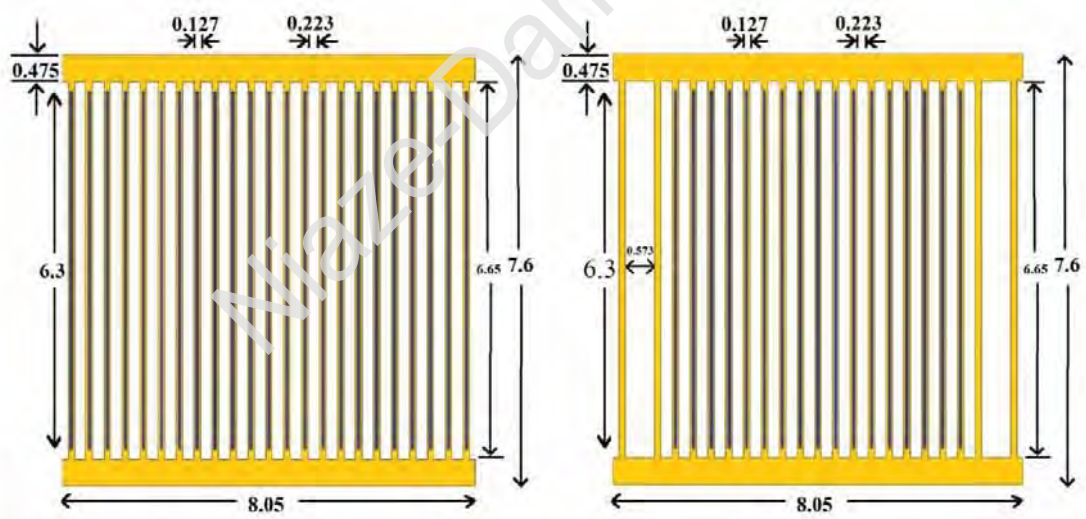
SFE: Standard Fuel Element



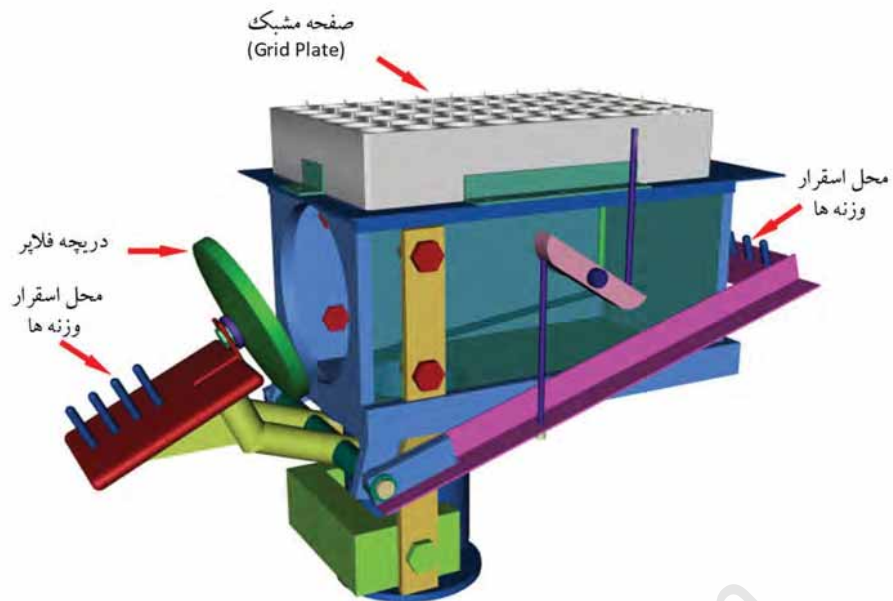
جاذب نوترون از نوع چنگالی



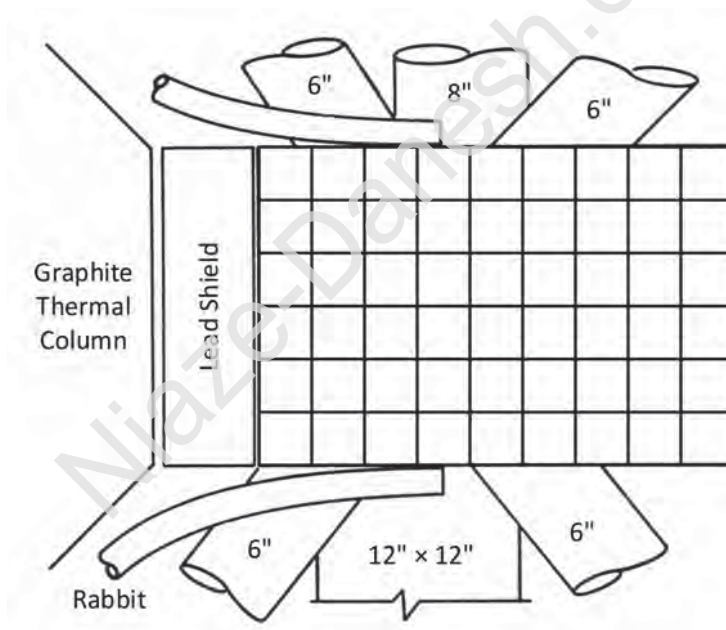
شکل (۳-۵) چیدمان قلب یک راکتور MTR نوعی.



شکل (۳-۶) نمای افقی از بسته‌های سوخت کنترلی و استاندارد یک راکتور MTR نوعی [۱].



شکل (۳-۷) نمایی از محفظه پلنوم و صفحه مشبک.



شکل (۳-۸) نمای افقی قلب و موقعیت تسهیلات تابش دهی اطراف آن.

سامانه خنک کننده رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی

با توجه به اینکه قدرت اسمی رآکتورهای تحقیقاتی MTR نوعی حدود ۵ MW می باشد لازم است که در قدرت های بالای ۱۰۰kW گرمای تولیدی در سوخت توسط یک سامانه خنک کننده بر مبنای رژیم اجباری^۱ برداشت شود. شکل (۳-۹)

نشان‌دهنده مدار خنک‌کننده شامل مدار اولیه و ثانویه این رآکتور می‌باشد. در این شکل همان‌طور که دیده می‌شود مخزن نگه‌دارنده^۱ دو وظیفه مهم را بر عهده دارد، اول آنکه با ایجاد یک تاخیر زمانی در مقیاس چند دقیقه به ایزوتوپ ^{16}N که دارای نیمه عمر حدود ۷ ثانیه است و در خنک‌کننده حین عبور از قلب رآکتور تولید می‌شود مجال واپاشی می‌دهد و ثانیاً در مواقعی که برق قطع می‌شود با توجه به اینکه ارتفاع ۱۰ متر آب در استخر رآکتور ایجاد یک نیروی محرک می‌کند عملیات برداشت گرما در هر حال بکار خود ادامه خواهد داد که بویژه در لحظات بلافاصله بعد از خاموشی دارای اهمیت است.^۲ عبور آب از قلب تا حدود ۲۰ دقیقه، تا وقتی که مخزن نگه‌دارنده پر نشده است، ادامه می‌یابد. گرمای تولیدی در سوخت رآکتور توسط خنک‌کننده مدار اولیه برداشت و توسط مبدل حرارتی به مدار ثانویه منتقل می‌شود و نهایتاً توسط برج خنک‌کننده^۳ در هوای اطراف تلف می‌گردد. ضمناً شکل (۱۰-۳) موقعیت ساختمان اصلی رآکتور و تجهیزات جانبی آن را نسبت به هم نمایش می‌دهد.

سامانه حفاظت و کنترل رآکتور

سامانه حفاظت و کنترل رآکتور دو وظیفه مهم را بر عهده دارد:

(۱) حفاظت رآکتور در مقابل عملکرد نامناسب و خطاهای احتمالی سامانه

(۲) راه‌اندازی صحیح رآکتور و کنترل رآکتور در هر لحظه از زمان

این سامانه بایستی رآکتور را بطور خودکار تحت هر گونه شرایط غیرعادی و نامناسب فوراً خاموش نماید.^۴ کنترل رآکتور توسط ۵ میله کنترل که در عناصر سوخت موسوم به CFE^۵ وارد می‌شوند، انجام می‌گردد. چهار عدد از میله‌های کنترل، میله‌های کنترل ایمنی^۶ و یک عدد دیگر میله کنترل تنظیمی^۷، می‌باشد که این میله کنترل دارای خاصیت جذب نوترونی کمتری نسبت به چهار میله کنترل دیگر است. در شرایط بحرانی و خطرناک، سامانه کنترل به طور خودکار به وسیله‌ی سقوط تمام میله‌های کنترل به داخل قلب، رآکتور را سریعاً خاموش می‌کند.

1 - HUT: Hold Up Tank

3 - گرمای تولیدی بعد از Shutdown رآکتور را گرمای پسمان (Residual Heat) می‌نامند و در لحظات اولیه حدود ۷ درصد قدرت بلافاصله قبل از خاموشی را تشکیل می‌دهد.

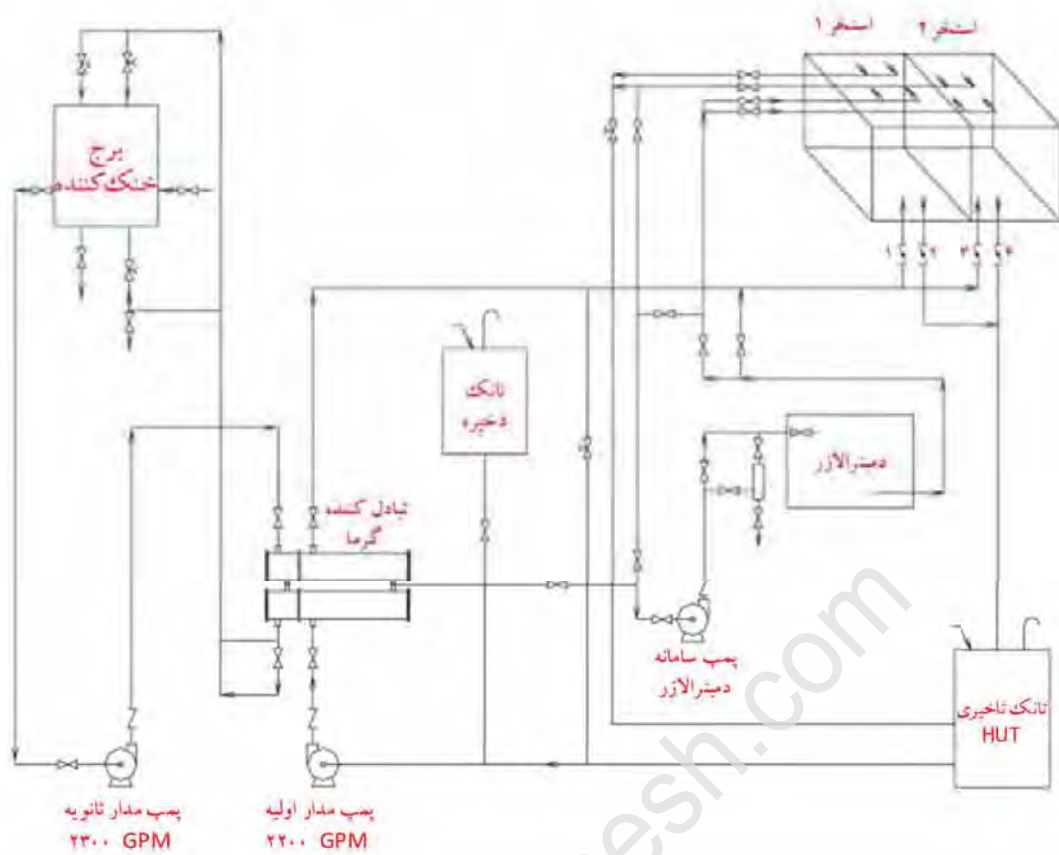
3 - Cooling Tower

4 - Reactor Scram

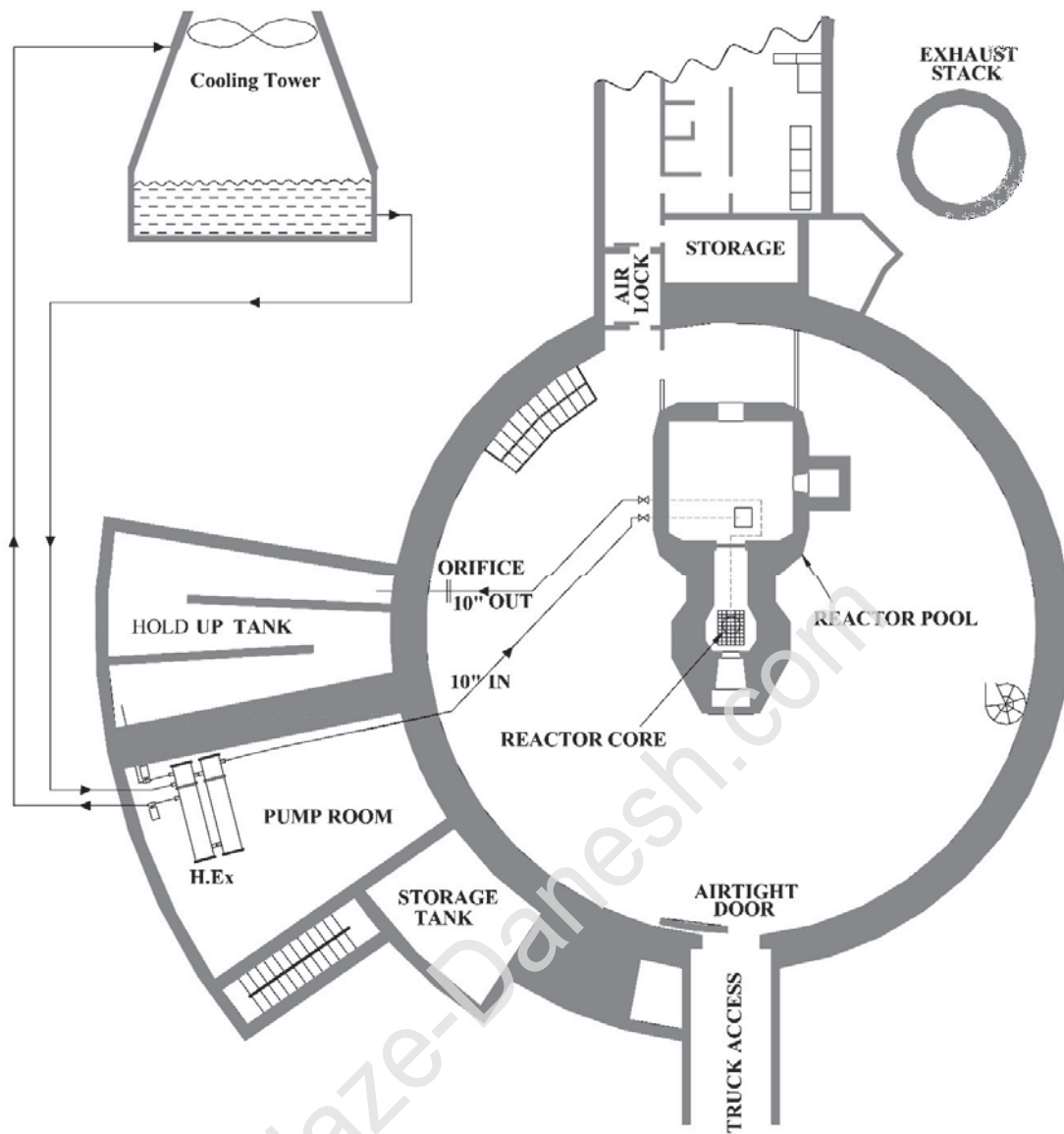
5 - Control Fuel Element

6 - Shim Safety Rods

7 - RR: Regulating Rod



شکل (۳-۹) سامانه خنک کننده رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی (مدارهای اولیه و ثانویه).



شکل (۳-۱۰) نمایی افقی از ساختمان رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی و تجهیزات جانبی آن.

میله‌های کنترل

میله کنترل تنظیمی، از جنس فولاد ضد زنگ بوده و به گونه‌ای طراحی شده است که ارزش راکتیویته کل آن بین $\frac{\Delta k}{k}$ تا 0.4% تا بین 0.6% باشد. این ارزش به محل استقرار آن در قلب نیز بستگی دارد. مقدار راکتیویته مذکور برای تنظیم قدرت رآکتور کافی به نظر می‌رسد. مزیت آن این است که اگر به خطا این میله بیرون کشیده شود رآکتور دچار حادثه بحرانیته آنی^۱ نمی‌شود. میله‌های کنترل ایمنی از آلیاژی از جنس نقره^۲ - ایندیوم^۳ - کادمیوم^۴ (به نسبت ۸۰، ۱۵، و ۵ درصد) ساخته شده‌اند و

- 1 - Prompt Criticality
- 2 - Silver (Ag)
- 3 - Indium (In)
- 4 - Cadmium (Cd)

ارزش کل راکتیوتیه هر چهار میله حداکثر حدود $\frac{\Delta k}{k}$ ۱۹٪ می‌باشد و این در حالی است که ارزش مذکور به آرایش قلب و مکان میله‌های کنترل در داخل قلب بستگی دارد.

میله کنترل تنظیمی می‌تواند در دو حالت دستی و خودکار هم به وسیله کاربر و هم توسط سامانه کنترل خودکار بالا و پایین رود. درصد خارج بودن میله‌های کنترل به طور پیوسته توسط یک نمایشگر دیجیتالی بر روی میز کنترل در تمامی لحظات هر یک به طور جداگانه نمایش داده می‌شود.

سامانه کنترل قدرت راکتور در حالت خودکار

فیدبک سامانه میله‌های کنترل یک نوع فیدبک خارجی محسوب می‌گردد که جهت کنترل حالات گذرا، تغییر قدرت و خاموش کردن در زمان حقیقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کنترل سطح قدرت و تثبیت آن دو شرط زیر نهایتاً باید ارضاء شوند:

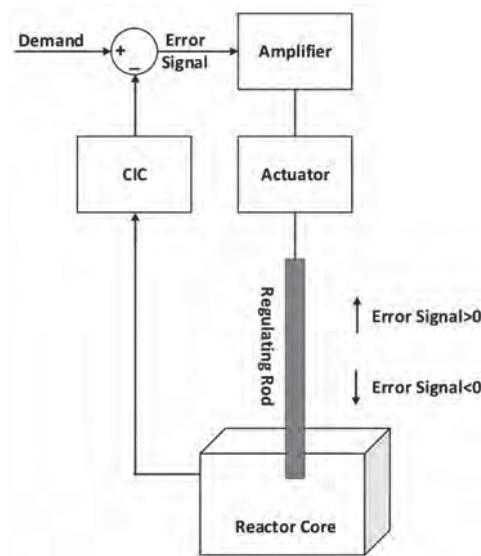
(۱) سطح قدرت راکتور، برابر با قدرت درخواستی گردد (دربازه یک خطای مشخص).

(۲) ضریب تکثیر نهایتاً یک باشد.

میله‌های کنترل ممکن است بطور انفرادی یا به صورت گروهی مورد استفاده قرار گیرند. میله‌های کنترلی که عملیات کنترل اصلی را انجام می‌دهند در اصطلاح میله کنترل قوی^۱ نامیده می‌شوند و دارای ارزش بالایی از راکتیوتیه هستند. بنابراین حرکت میله کنترل قوی باید به آرامی صورت گیرد و نرخ تغییر راکتیوتیه آنها در حدود $\frac{\Delta k}{s}$ 10^{-5} تا $\frac{\Delta k}{s}$ 10^{-3} می‌باشد. جهت کنترل دقیق قدرت و کنترل حالات گذرای سریع، میله کنترل دیگری با نام میله کنترل تنظیمی وجود دارد که می‌تواند به صورت خودکار کنترل را به عهده گیرد. میله کنترل تنظیمی امکان حرکت سریع داشته اما به جهت تضمین ایمنی، حداکثر ارزش میله کنترل تنظیمی کمتر از یک دلار (و یا $\frac{\Delta k}{s}$ 10^{-6}) است. به این ترتیب تحت هر شرایطی میله کنترل تنظیمی نمی‌تواند باعث بحرانی آتی شدن قلب راکتور گردد.

شکل (۱۱-۳) نمایش‌دهنده یک سامانه کنترل حلقه بسته بوده که عملیات کنترل سطح قدرت (شار نوترون) را انجام می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، مادامی که قدرت درخواستی با قدرت واقعی راکتور (که از طریق آشکارساز CIC اندازه‌گیری می‌شود) تفاوت داشته باشد، سیگنال خطا^۲ مخالف صفر است. سیگنال خطا اگر دارای پلاریته مثبت باشد، حرکت میله‌ی کنترل تنظیمی به سمت خروج از قلب راکتور و در نتیجه‌ی آن افزایش k_{eff} و به تبع آن افزایش قدرت راکتور است. اگر این سیگنال منفی باشد، حرکت میله‌ی کنترل تنظیمی به سمت ورود به قلب راکتور و در نتیجه‌ی آن کاهش قدرت راکتور است.

1 - Shim Rod
2 - Error Signal



شکل (۱۱-۳) سامانه کنترل حلقه بسته برای کنترل خودکار رآکتور تحقیقاتی.

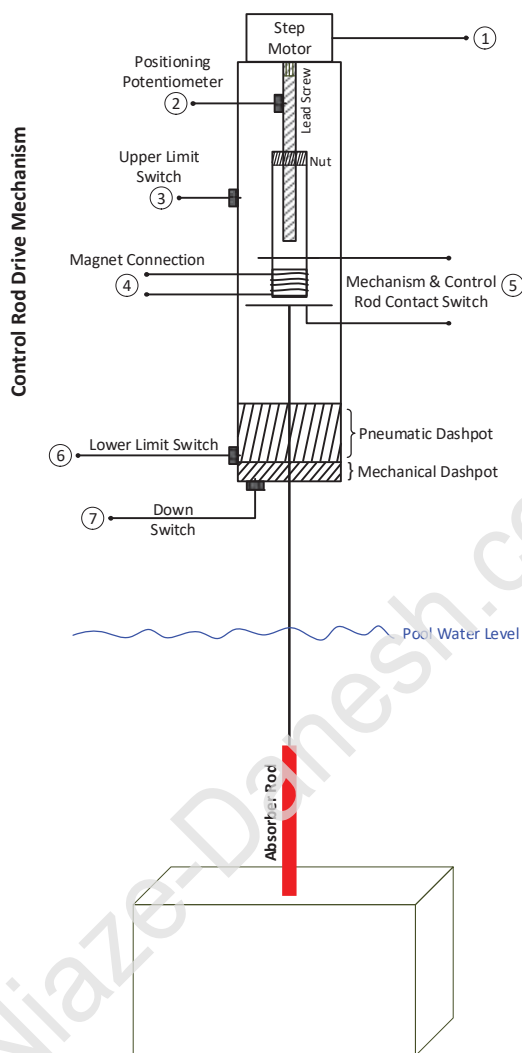
مکانیزم حرکتی میله‌های کنترل

میله کنترل رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی از نوع چنگالی است که می‌تواند در مجاری تعبیه شده در داخل مجموعه سوخت کنترلی حرکت نماید. در شکل (۱۲-۳) طرح‌واره مکانیزم‌های کنترلی رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی نشانه داده شده است. انتهای مکانیزم کنترل در بیرون از آب، و درون یک تیوب استوانه‌ای به یک دیسک فلزی متصل می‌باشد. یک موتور پله‌ای در قسمت فوقانی آن قرار دارد که حرکت آن دورانی است. این حرکت دورانی توسط یک میله مارپیچ که روی آن یک مهره قرار گرفته است به حرکت عمودی بالا یا پایین میله کنترل تبدیل می‌شود. انتهای میله‌ای که به موتور متصل است و حرکت طولی دارد در داخل تیوب استوانه‌ای به یک سیم پیچ متصل است که با عبور جریان از درون آن، سیم پیچ آهنربا شده و دیسک فلزی را به خود جذب می‌کند. زیر موتور، جعبه دنده نشان‌دهنده موقعیت نصب شده است که اطلاعات مربوط به موقعیت میله کنترل را به سامانه کنترل ارسال می‌کند. مکانیزم حرکتی میله کنترل شامل قسمتهای زیر است:

- موتور پله‌ای^۱
- جعبه دنده نشان‌دهنده موقعیت و پتانسیومتر آن
- میله مارپیچ و سیم پیچ مغناطیس شونده
- دیسک و میله رابط آن (که در انتهای آن میله جاذب قرار دارد)
- ترمزهای مکانیکی و پنوماتیکی
- میکروسوئیچ‌های نشان‌دهنده موقعیت میله کنترل

در حالت عادی با عبور جریان الکتریکی از سیم پیچ نگه‌دارنده، میله کنترل از طریق میله رابط و دیسک انتهایی به سامانه حرکتی میله‌ها نگاه داشته می‌شود. در صورت هر گونه قطع جریان برق از سیم پیچ، میله تحت نیروی گرانش زمین به درون قلب سقوط می‌کند. این سامانه از جهت ایمنی بسیار مهم بوده و حفاظت در برابر قطعی برق رآکتور را فراهم می‌کند. ضمناً هر گونه انحراف مهم از کارکرد ایمن رآکتور منجر به قطع جریان سیم پیچ‌های همه میله‌های کنترل و متعاقباً باعث توقف سریع

واکنش زنجیری خود نگه‌دار می‌گردد. در پایین‌ترین ناحیه در داخل تیوب استوانه‌ای، سامانه ضربه‌گیر (مکانیکی و پنوماتیکی) وجود دارد که فرود نهایی میله کنترل را تعدیل می‌نماید.



شکل (۱۲-۳) طرح‌واره مکانیزم‌های کنترلی یک رآکتور تحقیقاتی نوعی.

روش‌های اندازه‌گیری قدرت در رآکتورهای هسته‌ای

از موضوعات بسیار مهم در رآکتورهای هسته‌ای آگاهی از میزان دقیق قدرت رآکتور می‌باشد. به عبارت دیگر جهت کارکرد ایمن رآکتور، اطلاع از مقدار دقیق قدرت اهمیت زیادی دارد. از این‌رو از روش‌های مختلفی قدرت رآکتور اندازه‌گیری می‌شود. به عنوان نمونه می‌توان به روش مستقیم آشکارسازی نوترون، آشکارسازی گامای قلب، تخمین حرارتی، اندازه‌گیری نقشه شار نوترون، شدت اشعه چرنکوف، اکتیویته گامای ایزوتوپ ^{16}N و ... اشاره نمود.

قدرت واقعی رآکتور ناشی از فرآیند شکافت در رآکتور است. این درحالیست که بیش از ۸۰ درصد انرژی حاصل از شکافت سهم پاره‌های شکافت و مابقی سهم گاماها، آبی و تاخیری و ذرات دیگر می‌شود. میزان قدرت یک رآکتور هسته‌ای متناسب با شار نوترون‌های موجود در قلب، حاصل از فرآیند شکافت می‌باشد. در هر حال همواره یک تناسب مستقیم بین این

دو وجود دارد. خروجی برخی از آشکارسازها متناسب با شار نوترون و برخی دیگر متناسب با شار نوترون و گاما است. در هر حال یک ارتباط مستقیم بین شدت جریان خروجی آشکارسازها و قدرت رآکتور برقرار می‌باشد.

کانال‌های اندازه‌گیری قدرت

ابزارهای مختلف اندازه‌گیری شارنوترون جهت کنترل رآکتور را می‌توان به اعتبار نوع سیگنال خروجی به دو دسته تقسیم نمود. این تقسیم بندی با توجه به نوع مدار خارجی که به آشکارساز متصل شده است انجام می‌گیرد و شامل دو نوع مدار می‌باشد که عبارتند از شمارنده پالس و جریان انتگرالی (میانگین جریان) و یا توان دوم میانگین ولتاژ^۱. بعضی آشکارسازها ممکن است با هر دو نوع مدار کار کنند. گونه‌های مختلفی از آشکارسازهای نوترون وجود دارند، اما آنهایی که در رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی جهت اندازه‌گیری قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از اتاقک شکافت^۲، اتاقک یونیزاسیون جبران نشده^۳ (شمارنده با روکش داخلی بورون^۴)، اتاقک یونیزاسیون جبران شده^۵.

آشکار ساز اتاقک یونیزاسیون^۱

یک اتاقک یونیزاسیون در اصل یک خازن استوانه‌ای است که الکتروود مرکزی آن به قطب مثبت و بدنه به قطب منفی منبع تغذیه متصل شده است. عبور یک ذره باردار از داخل گاز بی اثر این محفظه ایجاد یونیزاسیون کرده و الکترون یا الکترون‌های بوجود آمده جذب الکتروود مرکزی یا آند می‌گردند. ولتاژ اعمال شده به این محفظه تعیین کننده ناحیه کاری این آشکارساز می‌باشد.

اتاقک شکافت^۲

این اتاقک در اصل یک اتاقک یونیزاسیون (I.C.) است که دارای یک پوشش داخلی از یک لایه نازک U^{235} می‌باشد. نوترون‌ها در ورود به این اتاقک با ایجاد شکافت و تولید پاره‌های شکافت امکان یونیزاسیون در گاز داخلی اتاقک را فراهم و از این رو تشخیص و شمارش نوترون‌ها میسر می‌گردد. بزرگی پالس‌های ناشی از پاره‌های شکافت اجازه می‌دهد که با استقرار یک مدار ممیز سر راه سیگنال خروجی، فقط پاسخ آشکارساز نسبت به نوترون‌ها اجازه خروج و شمارش داشته باشد.

اتاقک یونیزاسیون جبران نشده

این اتاقک در اصل یک شمارنده تناسبی است (یعنی اتاقکی که ولتاژ کار آن در ناحیه تناسبی قرار دارد) که بدنه داخلی آن با پوششی از بور (ترجیحاً B^{10}) پوشانده شده است. از این رو نوترون‌ها در ورود به اتاقک با انجام واکنش $B^{10}(n, \alpha)Li^7$ ایجاد ذرات آلفا و لیتیم کرده و این ذرات به نوبه خود با ایجاد یونیزاسیون در گاز بی اثر داخلی عمل آشکارسازی را انجام می‌دهد. عملکرد این اتاقک در ناحیه تناسبی اجازه می‌دهد که تقویت پالس خروجی وجود داشته باشد. کلاً دو عدد از این آشکارسازها تحت نام UIC در رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی وجود دارند که بیشتر به دلیل سادگی عملکرد برای کارهای حفاظت رآکتور بکار می‌رود. لازم به توضیح است که سیگنال خروجی این آشکارساز هم به نوترون و هم به فوتون‌های گامای زمینه حساس است.

- 1 - MSV Mode: Mean Square Voltage Mode
- 2 - Fission Chamber
- 3 - Uncompensated Ionization Chamber
- 4 - Boron Lined Counter
- 5 - Compensated Ionization Chamber
- 6 - Ionization Chamber
- 7 - Fission Chamber

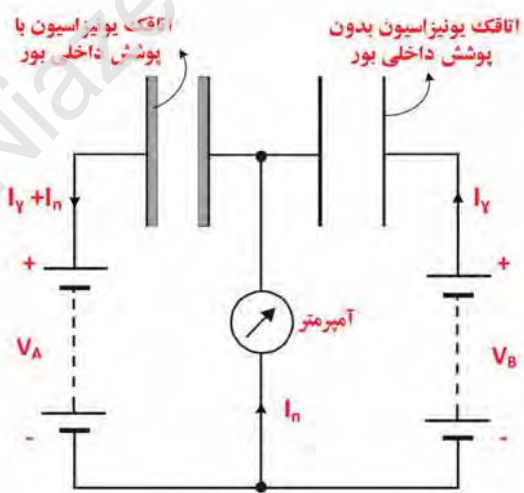
آشکارساز یونیزاسیون جبران نشده از یک شمارنده با روکش بورون تشکیل شده است. در این آشکار ساز، آستانه حساسیتی که در آن شار نوترون می تواند آشکار شود توسط اشعه گامای محیطی که این اتاقک در آن کار می کند محدود می شود. جریان خروجی در این آشکار ساز ناشی از سه مولفه اصلی زیر می باشد:

- (۱) نوترون ها
- (۲) گاما های آبی و گاما های تاخیری با نیمه عمر نسبتاً کوتاه
- (۳) گاما های تاخیری با نیمه عمر متوسط و بلند

مولفه های ۱ و ۲ معیار خوبی از قدرت بدست می دهند اما مولفه سوم عمدتاً مربوط به گامای زمینه ناشی از پاره های شکافت بوده و در سطوح پایین قدرت رآکتور مانع ارتباط خطی بین پاسخ آشکار ساز و قدرت واقعی رآکتور است. در عمل در رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی سیگنال خروجی از این کانال در شرایطی که قدرت بیش از ۲۰٪ قدرت اسمی رآکتور شده باشد، وارد ناحیه کار خود می گردد.

اتاقک یونیزاسیون جبران شده^۱

گستره آشکار سازی نوترون در کانال UIC را می توان با جبران پرتو گاما یعنی با حذف سیگنال ناشی از پرتو گاما افزایش داد. این کار با استفاده از دو اتاقک مشابه انجام می شود، یکی از آنها حساس به نوترون و پرتوهای گاما مطابق آنچه در بالا گفته شده است و دیگری فقط حساس به پرتوهای گاما می باشد. این دو اتاقک از نظر الکتریکی به گونه ای به هم متصل شده اند که سیگنال خروجی شان از هم کم می شود در حالیکه از لحاظ شکل ظاهری یک ساختار یک پارچه را تشکیل می دهند. شکل (۱۳-۳) طرح واره این اتاقک را نشان می دهد.



شکل (۱۳-۳) اتاقک یونیزاسیون جبران شده.

چون شار گاما در داخل و اطراف قلب رآکتور به طور گسترده‌ای از یک نقطه به نقطه دیگر متفاوت است، یونش ایجاد شده در دو حجم مساوی توسط تابش‌های گاما به ندرت با یکدیگر مساوی است. به این دلیل لازم است بعد از اینکه اتاقک نصب شد، میزان جریان طوری تنظیم شود که جریان‌های ایجاد شده توسط گاما در دو حجم مساوی باشند. این تطابق ممکن است به طور مکانیکی با تغییر یک حجم و یا به صورت الکتریکی انجام شود.

روش‌های دیگر اندازه‌گیری قدرت در یک رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی

در یک رآکتور تحقیقاتی نوعی، اندازه‌گیری قدرت رآکتور به روش‌های دیگری نیز صورت می‌گیرد. این روش‌ها عبارتند از:

(۱) روش ترموهیدرولیکی (کالریمتری و اندازه‌گیری دمای آب ورودی و خروجی از قلب)

(۲) اندازه‌گیری قدرت توسط شمارش فوتون‌های گامای ناشی از واپاشی ^{16}N

(۳) اندازه‌گیری قدرت رآکتور توسط اشعه چرنکوف

(۴) اندازه‌گیری قدرت توسط شمارش نوترون‌های تاخیری ناشی از واپاشی ^{17}N

در ادامه این روش‌ها به اختصار بررسی می‌شوند.

روش ترموهیدرولیکی

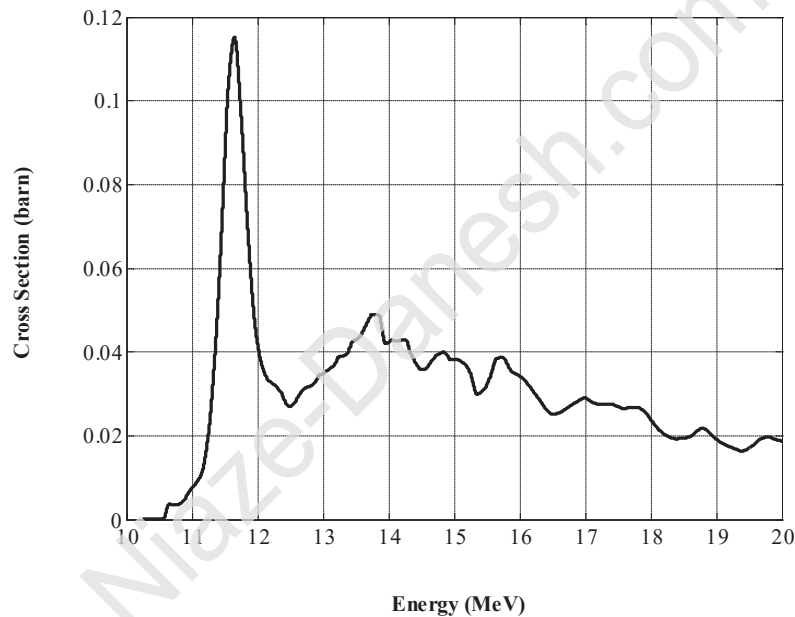
در این روش میزان قدرت رآکتور از اندازه‌گیری تغییر دمای آب خنک‌کننده عبوری از قلب رآکتور (در هنگام ورود و خروج از قلب رآکتور) و نیز اندازه‌گیری دبی سیال خنک‌کننده عبوری از قلب، به دست می‌آید. بدین ترتیب که میزان دبی آب خنک‌کننده، همراه با دمای ورودی و خروجی آن به قلب رآکتور را اندازه گرفته و با استفاده از رابطه زیر که در آن F دبی آب برحسب GPM، و ΔT اختلاف درجه حرارت برحسب درجه فارنهایت است، قدرت رآکتور، P ، برحسب وات بدست می‌آید. عدد ۱۴۷ حاصل تبدیل واحدها بوده و عدد ۱٫۰۶ فاکتور تصحیح می‌باشد. این روش برای توان‌های بالا کاربرد دارد. برای توان‌های پایین‌تر از ۱۰۰ kW به علت عدم دقت در ثبت اختلاف دما نمی‌توان از این روش استفاده نمود. این روش قدرت رآکتور را به صورت برخط اندازه‌گیری کرده و نمایش می‌دهد.

$$P = 147 \times 1.06 \times \Delta T \times F \quad (3-1)$$

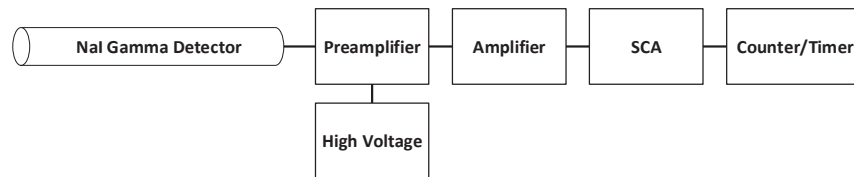
در اندازه‌گیری قدرت به روش حرارتی از روش دیگری به نام کالریمتری نیز استفاده می‌شود که از دقت بالایی برخوردار است. از این روش معمولاً در مواقعی که تغییرات اساسی در آرایش قلب داده شود و سامانه‌ها نیاز به کالیبراسیون داشته باشند استفاده می‌گردد. این روش یکی از آزمایش‌های این کتاب را تشکیل می‌دهد.

اندازه‌گیری قدرت توسط سامانه ^{16}N

به علت استفاده از آب کاملاً تصفیه شده و خالی از املاح، رادیواکتیویته القایی در آب رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی بسیار مختصر است. عمده‌ترین واکنش که به اکتیو شدن آب می‌انجامد عبارت است از واکنش $^{16}\text{O} (n,p) ^{16}\text{N}$ است که نوترون‌های پر انرژی در اکسیژن مولکول آب ایجاد می‌نماید. ازت-۱۶ تولیدی دارای نیمه عمر کوتاهی (حدود ۷ ثانیه) است و با تجزیه β خود مجدداً به ^{16}O بازگشت می‌نماید. در این واپاشی تابش دو فوتون بسیار قوی با انرژی‌های ۶٫۱ MeV و ۶٫۱ MeV نیز صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است، چنان‌که در شکل (۳-۱۴) مشاهده می‌گردد، واکنش $^{16}\text{O} (n,p) ^{16}\text{N}$ دارای انرژی آستانه حدود ۱۰ MeV می‌باشد. سامانه‌ای بر این مبنا و با شمارش فوتون‌های گاما در همسایگی لوله آب خروجی از قلب رآکتور تحقیقاتی طراحی و ساخته شده و بصورت برخط قدرت رآکتور را بعنوان یک کانال مستقل نمایش می‌دهد. در این سامانه قدرت رآکتور از حدود ۱۰ kW به بالا، چه توسط آشکارساز NaI اندازه‌گیری و نمایش داده می‌شود. در شکل (۳-۱۵) بلوک دیاگرام بلوک دیاگرام سامانه ^{16}N مشاهده می‌گردد. چنان‌که مشخص است آشکارساز مورد استفاده یک عدد آشکارساز یدور-سدیم^۱ می‌باشد.



شکل (۳-۱۴) سطح مقطع واکنش $^{16}\text{O} (n,p) ^{16}\text{N}$ برای انرژی‌های مختلف نوترون.



شکل (۳-۱۵) بلوک دیاگرام سامانه اندازه‌گیری قدرت رآکتور از طریق گاما ^{16}N .

¹ Sodium Iodide

تانک تاخیری^۱: این سامانه بین رسیدن آب خروجی از قلب به مبدل حرارتی و برگشت مجدد به استخر راکتور تاخیری ایجاد می کند و این فاصله زمانی برای واپاشی ^{16}N در آب خروجی از قلب کافی خواهد بود. با توجه به نیمه عمر مواد رادیواکتیو موجود در مخزن نگه دارنده باید رابطه زیر برای مدت زمانی که آب از درون تانک عبور می کند برقرار باشد:

$$\frac{\text{حجم آب موجود در HUT}}{\text{دبی آب مدار اولیه}} > 5 \text{ min} \quad (3-2)$$

در شرایط عملی کار راکتور با توجه به مقطع مخزن مخزن نگه دارنده حدود ۹۰ متر مربع و ارتفاع آب حدود 180 cm در آن داریم:

$$\frac{162 \text{ m}^3}{500 \frac{\text{m}^3}{h}} \approx 20 \text{ min} \quad (3-3)$$

حاصل این کسر حدودا برابر ۲۰ دقیقه می باشد. از این رو در این حالت از لحاظ حفاظت در برابر پرتو، تهدیدی برای محیط کاری بویژه پمپ خانه^۲ و گنبد اصلی راکتور وجود نخواهد داشت. جهت اندازه گیری قدرت از طریق ^{16}N می توان از آشکارسازهایی که دارای قدرت تفکیک انرژی پرتو گاما هستند استفاده کرد به طوری که پنجره انرژی آشکارساز در انرژی ۶٫۱ MeV تنظیم شده باشد.

در هر حال به دلیل مدت زمان طولانی (در حدود چندصد ثانیه تا چند ده دقیقه) که در این روش جهت قرائت آشکارساز وجود دارد، این روش به این شکل نمی تواند به عنوان یک سامانه با عملکرد سریع مورد استفاده قرار گیرد. گذشته از بحث فوق به دلیل آنکه این روش مستقل از ساختار قلب و مصرف سوخت^۳ می باشد و بعلاوه دارای یک پتانسیل خوب جهت استفاده در یک گستره وسیع از قدرت راکتور است می تواند جهت مانیتورینگ قدرت و همچنین کالیبره کردن دیگر کانال های اندازه گیری قدرت مورد استفاده قرار گیرد.

اندازه گیری قدرت راکتور توسط اشعه چرنکوف

وقتی که یک ذره باردار مانند الکترون از یک محیط شفاف با سرعتی بیشتر از سرعت نور در آن محیط حرکت می کند، اشعه چرنکوف تابش می گردد. شکل (۱۶-۳) نشان دهنده حرکت یک ذره الکترون در یک محیط مادی و شفاف با سرعت بیشتر از سرعت نور در آن محیط است. در این شرایط پرتو چرنکوف تحت زاویه θ ، زاویه مخروط چرنکوف، منتشر می گردد. زاویه θ ، زاویه بین جهت حرکت ذره باردار و فوتون های چرنکوف از رابطه زیر بدست می آید:

$$AC = AB \times \cos \theta \quad (3-4)$$

$$AC = \frac{C}{n} \times \tau \quad (3-5)$$

1 - HUT: Hold Up Tank

2 - Pump Room

3 - Burn-up

$$AB = V \times \tau \quad (3-6)$$

$$\frac{AC}{AB} = \frac{C/n}{V} = \frac{1}{n\beta} = \cos \theta \quad (3-7)$$

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (3-8)$$

$$\beta = \frac{V}{C} \quad (3-9)$$

τ : بازه زمانی دلخواه از حرکت ذره

V : سرعت ذره باردار در محیط

C : سرعت نور در خلاء

n : شاخص انکسار نور در محیط

در انرژی آستانه تولید پرتو چرنکوف، زاویه تابش، θ ، برابر صفر می‌باشد، از این رو داریم:

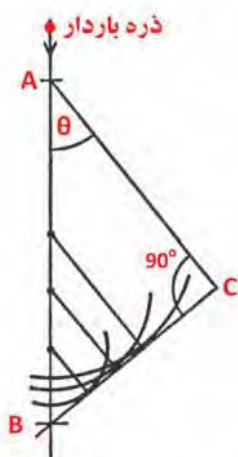
$$\beta_{min} = \frac{1}{n} \quad (3-10)$$

پس انرژی آستانه تولید پرتو چرنکوف برای ذره الکترون بصورت زیر بدست می‌آید:

$$E_{e_m} = m C^2 - m_0 C^2 = \frac{m_0 C^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0 C^2 = m_0 C^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \quad (3-11)$$

و در نهایت با جایگذاری $\beta_{min} = \frac{1}{n}$ در این رابطه خواهیم داشت:

$$E_{e_m} = m_0 C^2 \left(\frac{n}{\sqrt{n^2-1}} - 1 \right) \quad (3-12)$$



شکل (۱۶-۳) حرکت ذره باردار با سرعت بیشتر از سرعت نور در محیط
و تابش چرنکوف با زاویه رأس مخروط θ .

مقدار $E_{e_{Th}}$ در محیط آب با شاخص انکسار ۱٫۳۳۴، برابر ۰٫۲۶ MeV می‌باشد. از آنجا که الکترون‌ها (پرتوهای β) عمدتاً در داخل بافت کریستالی سوخت یا پوشش سوخت به دام افتاده و فقط کسر کوچکی مجال ورود به آب را دارند. از این رو چشمه اصلی الکترون‌ها فوتون‌های گاما می‌باشند. در محیط آب استخر رآکتور تحقیقاتی منابع اصلی نور چرنکوف عبارتند از:

- (۱) پرتوهای گامای تولید شده در حین فرآیند شکافت (پرتوهای گامای آبی).
- (۲) پرتوهای گامای ناشی از گیراندازی نوترون‌ها (در آب، در ساختار قلب رآکتور و ...).
- (۳) پرتوهای گاما و بتای ناشی از واپاشی محصولات شکافت.
- (۴) واپاشی عناصر فعال شده در ساختار قلب رآکتور.

در رآکتورهای آب سبک چشمه اصلی تولید پرتو چرنکوف پرتوهای گامای آبی می‌باشند. محتمل‌ترین برهمکنش فوتون با ماده در گستره انرژی متوسط پرتوهای گامای آبی، ۱ MeV، برخورد کامپتون می‌باشد. در یک برهمکنش کامپتون با زاویه پراکندگی برابر $\theta_{compton} = \pi$ ، حداقل انرژی فوتون برخوردی جهت تولید الکترون کامپتون با انرژی بیشتر از انرژی آستانه تولید پرتو چرنکوف در آب، برابر ۰٫۴۲۳ MeV می‌باشد. با توجه به منابع نور چرنکوف در قلب رآکتور، شدت مشاهده شده، تابع پرتوهای گامای آبی و تأخیری است. در این ارتباط رابطه زیر نشان‌دهنده‌ی شدت کل پرتوهای گامای منتشره از قلب رآکتور نسبت به گذشت زمان بعد از شروع به کار رآکتور می‌باشد.

$$\gamma(t) = \gamma_p (1 + K_{\gamma_{\infty}} (1 - \sum_i \alpha_{\gamma_i} e^{-\lambda_{\gamma_i} t})) \quad (3-13)$$

که در آن:

$\gamma(t)$: شدت کل فوتون‌های گاما

t : زمان پس از روشن شدن رآکتور

γ_p : شدت فوتون‌های گامای آبی در لحظه $t=0$

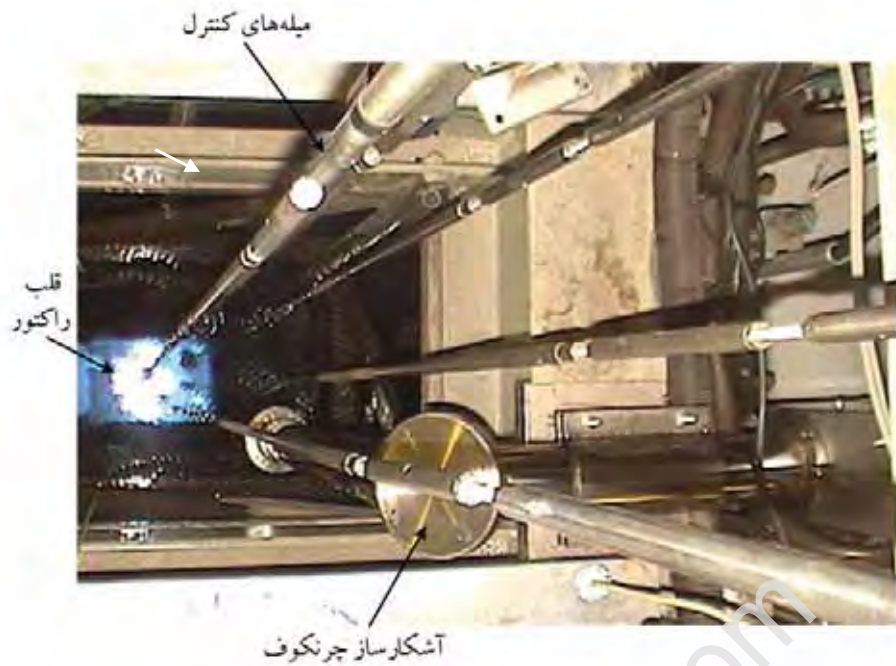
$K_{\gamma_{\infty}}$: ضریب ثابت

α_{γ_i} : ضریب ثابت

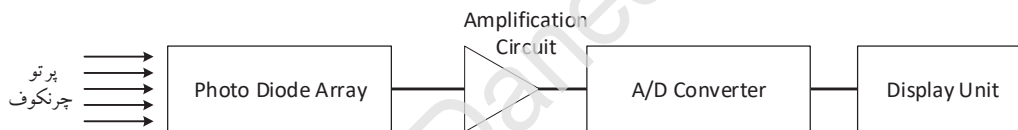
i : اندیس گروه‌های فوتون‌های تأخیری گاما

λ_{γ_i} : ضریب تجزیه هریک از گروه‌های تأخیری

در رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR در سطوح قدرت بالای ۱۰۰ kW، شدت اشعه چرنکوف تولیدی با سطح قدرت رآکتور تناسب خطی داشته و از همین رو سامانه‌ی بر همین مبنا طراحی و ساخته شده است. شکل (۱۷-۳) نشان‌دهنده سامانه اندازه‌گیری قدرت رآکتور از طریق اشعه چرنکوف می‌باشد که در رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR در محل پل متحرک، بالای استخر رآکتور نصب شده است. در شکل (۱۸-۳) بلوک دیاگرام کلی سامانه آشکارسازی پرتو چرنکوف در رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR آورده شده است.



شکل (۳-۱۷) نمایی از آشکار ساز چرنکوف در محل نصب شده.

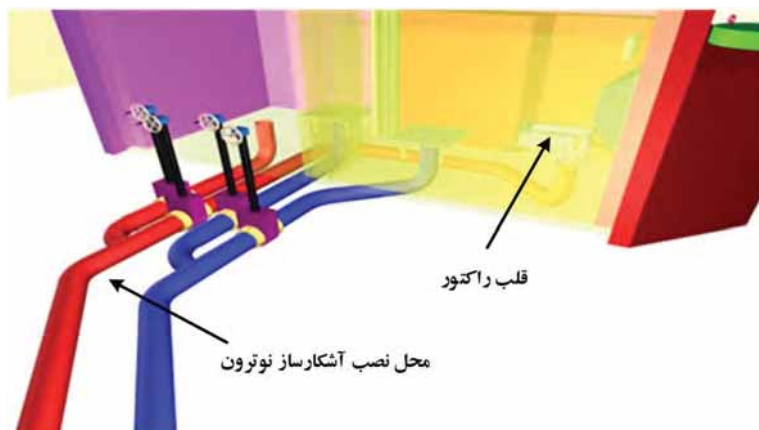


شکل (۳-۱۸) بلوک دیاگرام داخلی آشکار ساز چرنکوف.

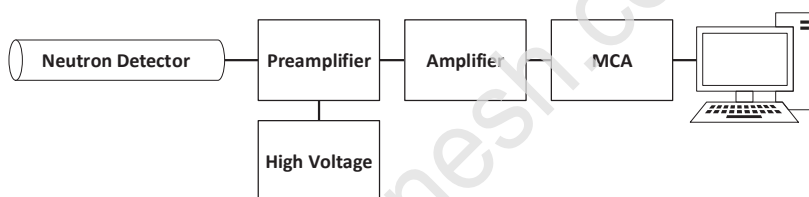
اندازه‌گیری قدرت توسط ^{17}N

واکنش دیگری که بالقوه می‌تواند برای اندازه‌گیری قدرت رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی مورد استفاده قرار گیرد عبارت است از واکنش $^{17}\text{O} (n,p)^{17}\text{N}$ که طی آن نوترون‌های سریع قلب با ایزوتوپ نادر اکسیژن برهمکنش کرده تولید ^{17}N می‌نماید. این ایزوتوپ خود به علت زیادی نوترون با نیمه عمر حدود 4 ثانیه واپاشی نوترون کرده (نوترون تاخیری) و متعاقباً همان زنجیره ^{16}N را طی می‌نماید. با وجود فراوانی کم ^{17}O و سطح مقطع ناچیز واکنش مزبور، اندازه‌گیری این نوترون‌های تاخیری در همسایگی لوله خروجی آب از قلب رآکتور امکانپذیر بوده و یک رابطه خطی بسیار خوب مابین این شمارش‌ها و قدرت واقعی رآکتور، امکان استفاده از آن را بعنوان یک کانال کمکی دیگر فراهم می‌نماید. در حال حاضر یک آشکار ساز نوترون مستقر در چاله بزرگ شیرآلات^۱، قدرت رآکتور را در گستره ۵ kW به بالا بدست می‌دهد. کوتاه بودن نیمه عمر واپاشی ^{17}N مزیت دیگریست که تغییرات سریع قدرت را می‌تواند دنبال نماید. شکل (۳-۱۹) نشان‌دهنده موقعیت استقرار آشکار ساز

مذکور نسبت به قلب رآکتور می‌باشد. در شکل (۳-۲۰) بلوک دیاگرام کلی سامانه اندازه‌گیری قدرت رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR از طریق نوترون تاخیری ^{17}N آورده شده است.



شکل (۳-۱۹) محل قرار گرفتن آشکارساز در کنار لوله سیال خنک کننده خروجی از قلب رآکتور.

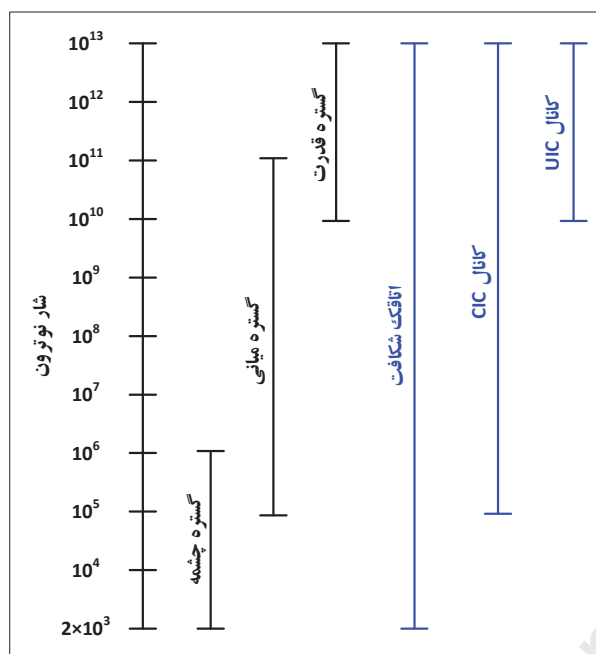


شکل (۳-۲۰) الکترونیک سامانه شمارش نوترون‌های تاخیری با استفاده از آشکارسازهای نوترونی.

گستره کاری آشکارسازها

با توجه به آشنایی که با هر یک از آشکارسازها حاصل شد، دانسته است که هر کدام دارای چه محدودیت‌ها و چه قابلیت‌هایی می‌باشند. در این راستا با توجه به گستره‌ای از قدرت که می‌تواند معیار درستی از قدرت رآکتور را ارائه دهد کانال‌های اندازه‌گیری قدرت دسته‌بندی می‌شوند. آشکارسازی ایده آل است که کل گستره قدرت رآکتور را پوشش دهد، اما در عمل چنین امری امکان پذیر نمی‌باشد و با توجه به حساسیت کانال مربوطه و تداخل پرتوهای زمینه^۱ و یا اشباع شدن خروجی آشکارساز، گستره کاری یک آشکارساز محدود به بازه‌ای معین از قدرت رآکتور می‌شود. شکل (۳-۲۱) نشان‌دهنده ارتباط بین گستره شار نوترون و گستره کاری کانال‌های مختلف می‌باشد. به عنوان مثال کانال UIC با توجه به آنکه به پرتوهای گاما نیز حساس می‌باشد فقط در ناحیه قدرت‌های بالا^۲ قابل استفاده است و یا اتاقک شکافت با توجه به آنکه حساسیت بالایی به نوترون‌ها دارد تقریباً کل گستره را پوشش می‌دهد.

1 - Background Radiation
2 - Power Range



شکل (۲۱-۳) دامنه شار نوترون و گستره کاری آشکارسازهای نوترون.

سوالات

- ۱) چرا از گرمای برداشت شده در رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی نمی توان در تولید برق استفاده کرد؟
- ۲) چه تفاوتی بین اسکرم^۱ و خاموشی^۲ رآکتور وجود دارد؟
- ۳) با توجه به زمان کارکرد رآکتور و قدرت آن رابطه‌ای برای تابش دهی نمونه‌ها بنویسید؟
- ۴) چرا آشکارسازهای نوترون را در فاصله نسبتاً دوری (چندین پویس آزاد نوترون) از قلب رآکتور قرار می دهند؟
- ۵) توضیح دهید چرا فشار سیال خنک کننده در مدار ثانویه بیشتر از مدار اولیه است؟
- ۶) توضیح دهید چرا در رآکتورهای هسته‌ای از کانال‌های متفاوتی قدرت رآکتور را اندازه می گیرند؟
- ۷) چرا در رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی از مخزن نگه‌دارنده استفاده شده است؟
- ۸) فرض کنید پمپ مدار اولیه خنک کننده رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی از کار بیافتد، به نظر شما سناریو این حادثه چگونه خواهد بود؟ آیا برای این رآکتور خطر جدی محسوب می شود؟
- ۹) توضیح دهید با وجود اینکه اتاقک شکافت یک اتاقک از نوع یونیزاسیون می باشد و به هر حال به پرتوهای گاما حساس است، چرا این آشکارساز از نواحی چشمه^۳ می تواند کار خود را آغاز کند؟
- ۱۰) آیا به نظر شما با توجه به تعریف، "پرتو چرنکوف وقتی تولید می گردد که سرعت ذره از سرعت نور بیشتر باشد" قانون نسبیت حرکت ذره نقض می شود؟ (توضیح دهید).
- ۱۱) چرا در آشکارسازهای یونیزاسیون الکتروود مرکزی را به قطب مثبت منبع تغذیه ولتاژ بالا متصل می کنند؟

¹ Scram

² Shutdown

³ Source Range

- ۱۲) با توجه به اینکه میزان تولید ذرات بتا حتی بیشتر از تولید پرتوهای گاما می‌باشد، چرا چشمه اصلی تولید پرتو چرنکوف در قلب رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی پرتوهای گاما می‌باشد؟
- ۱۳) چرا از کانال اندازه‌گیری قدرت N^{16} نمی‌توان جهت کنترل اتوماتیک رآکتور استفاده کرد اما می‌تواند به عنوان یک کانال ایمنی مورد استفاده قرار گیرد؟

Niaze-Danesh.com

فصل چهارم: کالیبراسیون میله‌های کنترل با استفاده از روش Inhour

در این فصل با موارد زیر آشنا می‌شوید

آشنایی با نحوه کالیبراسیون میله‌های کنترل در رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR از روش Inhour

سامانه‌های کنترل قلب رآکتور

در رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR فقط از میله‌های کنترل و ایمنی برای کنترل و تنظیم قدرت رآکتور استفاده می‌شود. در رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR، میله‌های کنترل برای اهداف زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند:

الف - روشن و خاموش کردن رآکتور و تغییر قدرت رآکتور در سطوح مختلف.

ب - جبران راکتیویته‌های (چه مثبت و چه منفی) بوجود آمده حین کار برای ثابت نگاه‌داشتن سطح قدرت.

ج - استفاده در مواقع حادثه جهت خاموش کردن سریع قلب رآکتور^۱.

در رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR دارای دو نوع میله کنترل است. یک نوع از جنس جاذب قوی (آلیاژی از نقره، ایندیم، کادمیوم) می‌باشد که تاثیر گذاری آن شدید است. از این نوع در حال حاضر چهار عدد در قلب بکار رفته است. نوع دیگر از جنس جاذب معمولی (فلز فولاد ضد زنگ) بوده که تاثیر گذاری آن ملایم و آهسته است. از این نوع در حال حاضر فقط یک عدد در قلب رآکتور بکار رفته و برای کنترل ظریف استفاده می‌شود. در حالت کنترل اتوماتیک جبران راکتیویته در حال کار رآکتور بر عهده میله کنترل تنظیمی است، به عبارت دیگر هنگامی که سطح قدرت رآکتور لازم باشد برای مدت طولانی در یک سطح مشخص ثابت بماند، جبران هر گونه راکتیویته مثبت و منفی چنانچه کوچک باشد بر عهده میله کنترل تنظیمی است.

تئوری آزمایش

رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR دارای پنج میله کنترل است که چهار عدد از آن میله‌های کنترل ایمنی^۲ بوده و میله پنجم میله کنترل ظریف می‌باشد. برای آنکه در هر قدرت و وضعیتی بتوان از نظر کمی تخمینی از راکتیویته‌های وارده به قلب در دست داشت لازم است میله‌های کنترل کالیبره گردند تا هرگونه حرکت آنها قابل تبدیل به مقدار راکتیویته جبران شده گردد. از نظر تئوری، تغییرات راکتیویته یک میله کنترل بر حسب ارتفاع از رابطه (۴-۱) بدست می‌آید:

$$\rho_{(Z)} = \rho_{(H)} \times \left[\frac{Z}{H} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi Z}{H} \right) \right] \quad (4-1)$$

Z: میزان خروج میله کنترل از قلب رآکتور

H: ارتفاع موثر قلب رآکتور

$\frac{Z}{H}$: کسر خروج میله کنترل از قلب

$\rho_{(H)}$: ارزش کل راکتیویته میله کنترل

همچنین رابطه Inhour نیز به صورت زیر است:

1 - Scram

2 - Safety Rods or Shim Rods

$$\rho = \omega\Lambda + \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i \omega}{\omega + \lambda_i} \quad (4-2)$$

طبق تعریف:

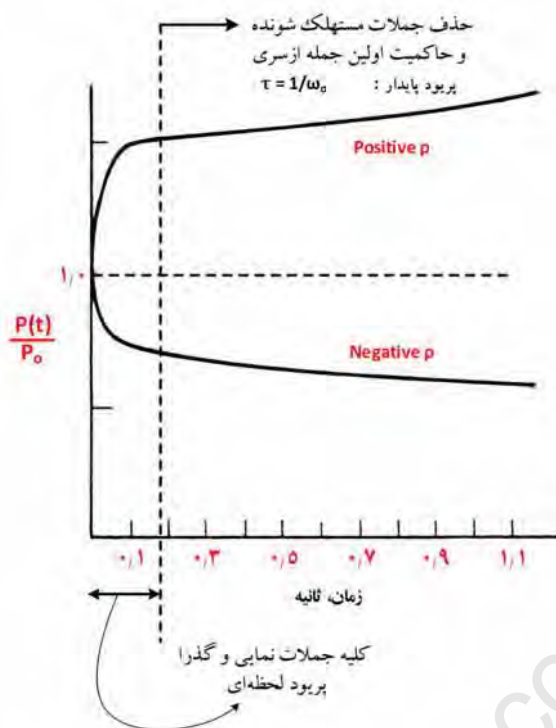
$$\tau = \frac{1}{\omega_0} = \text{پریود پایدار رآکتور} \quad (4-3)$$

چنانچه زمان به اندازه کافی سپری شود جملات حاوی اثرات نوترون‌های تاخیری (ریشه‌های $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$) مستهلک شده و فقط تغییرات به اعتبار اولین جمله صورت خواهد گرفت. این بویژه در شرایط تزریق راکتیویته‌های مثبت حایز اهمیت است. به عبارت دیگر در چنین شرایطی:

$$P(t) \approx P_0 \exp(\omega_0 t) \quad (4-4)$$

در حالت کلی پریود لحظه‌ای رآکتور به عنوان شیب مماس بر منحنی تغییرات قدرت رآکتور در هر لحظه تعریف می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۴-۱) ملاحظه می‌شود، پس از مدتی (که غالباً مدت کوتاهی تلقی می‌شود) تغییرات دانسیته نوترونی رآکتور یا تغییرات قدرت منحصراً تحت الشعاع تک جمله اولین تابع نمایی درآمده و پریود رآکتور به سادگی قابل اندازه‌گیری است. در عمل ساده‌تر این است که زمان دو برابر شدن قدرت رآکتور، T_D ، اندازه‌گیری شده و سپس طبق رابطه $\tau = \frac{T_D}{0.693}$ مقدار پریود تعیین شود. در رابطه (۴-۲) کلیه ریشه‌های ω منجمله ω_0 صادق بوده و در نتیجه با گذاشتن مقدار پریود (یعنی $\frac{1}{\omega_0}$) در این رابطه به جای ω می‌توان مقدار راکتیویته نظیر آن را بسادگی محاسبه نمود. شکل جدید ρ برحسب τ در رابطه (۴-۵) آمده است و در این آزمایش از آن استفاده می‌شود. این محاسبه برای سادگی کاربران قبلاً انجام شده و در جدول (۴-۱) درج و در شکل (۴-۲) برحسب τ رسم شده است. اطلاعات گروه‌های نوترون تاخیری (۶ گروه) رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی که در حل رابطه Inhour استفاده شده است در جدول (۴-۲) به صورت خلاصه آورده شده است. لازم به ذکر است که طول عمر نوترون آنی و کسر موثر نوترون تاخیری به ترتیب برابر با ۴۵ میکروثانیه و 0.00813 برای حل رابطه‌ی Inhour در نظر گرفته شده‌اند.

$$\rho = \left[\frac{\Lambda}{\tau} + \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\lambda_i \tau + 1} \right] \quad (4-5)$$

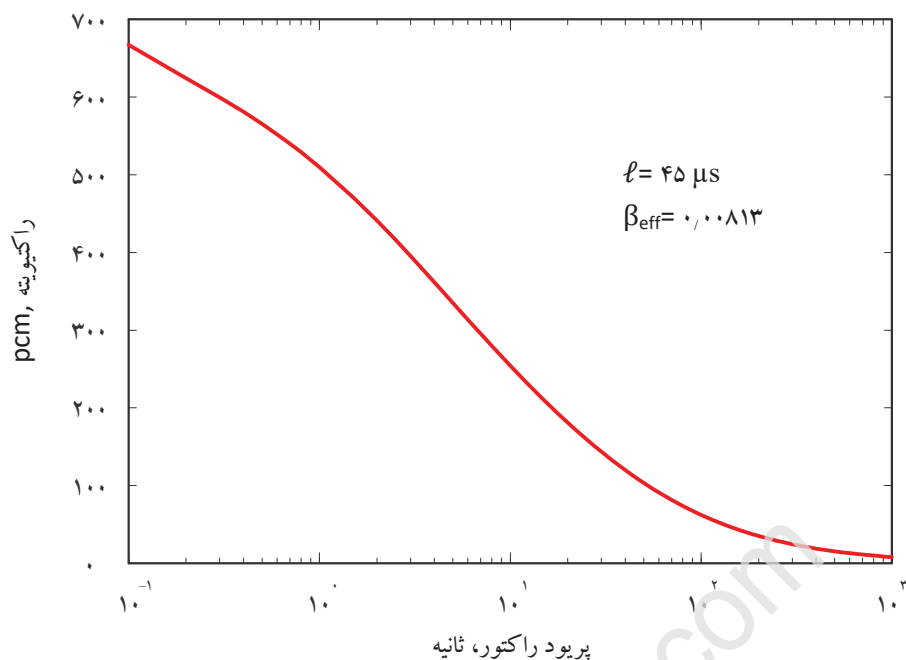


شکل (۴-۱) اثرات جملات مستهلک شونده ناشی از نوترون‌های تاخیری و حاکمیت اولین جمله نمایی در زمان‌های بزرگ.

Niaze-Danesh.com

جدول (۴-۱) راکتیویته‌های متناظر با پریودهای پایدار یک راکتور تحقیقاتی نوعی MTR.
 (طول عمر نوترون آنی ۴۵ میکروثانیه و کسر موثر نوترون تاخیری برابر با ۰٫۰۸۱۳ فرض شده است).

| Period (Sec) | Reactivity (pcm) | Period (Sec) | Reactivity (pcm) | Period (Sec) | Reactivity (pcm) |
|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|
| ۰٫۱ | ۶۶۷٫۴ | ۲۲ | ۱۷۱٫۷ | ۱۹۰ | ۳۶٫۶ |
| ۰٫۲ | ۶۲۴٫۵ | ۲۴ | ۱۶۳٫۵ | ۲۰۰ | ۳۵٫۰ |
| ۰٫۳ | ۵۹۹٫۸ | ۲۶ | ۱۵۶٫۲ | ۲۱۰ | ۳۳٫۵ |
| ۰٫۴ | ۵۸۱٫۱ | ۲۸ | ۱۴۹٫۶ | ۲۲۰ | ۳۲٫۲ |
| ۰٫۵ | ۵۶۵٫۵ | ۳۰ | ۱۴۳٫۵ | ۲۳۰ | ۳۱٫۰ |
| ۰٫۶ | ۵۵۲٫۰ | ۳۲ | ۱۳۸٫۰ | ۲۴۰ | ۲۹٫۸ |
| ۰٫۷ | ۵۴۰٫۰ | ۳۴ | ۱۳۳٫۰ | ۲۵۰ | ۲۸٫۸ |
| ۰٫۸ | ۵۲۹٫۱ | ۳۶ | ۱۲۸٫۳ | ۲۶۰ | ۲۷٫۸ |
| ۰٫۹ | ۵۱۹٫۰ | ۳۸ | ۱۲۴٫۰ | ۲۷۰ | ۲۶٫۹ |
| ۱٫۰ | ۵۰۹٫۷ | ۴۰ | ۱۲۰٫۰ | ۲۸۰ | ۲۶٫۰ |
| ۱٫۵ | ۴۷۱٫۰ | ۴۲ | ۱۱۶٫۲ | ۲۹۰ | ۲۵٫۲ |
| ۲٫۰ | ۴۴۰٫۹ | ۴۴ | ۱۱۲٫۷ | ۳۰۰ | ۲۴٫۴ |
| ۲٫۵ | ۴۱۶٫۲ | ۴۶ | ۱۰۹٫۴ | ۳۲۰ | ۲۳٫۰ |
| ۳٫۰ | ۳۹۵٫۴ | ۴۸ | ۱۰۶٫۳ | ۳۴۰ | ۲۱٫۸ |
| ۳٫۵ | ۳۷۷٫۴ | ۵۰ | ۱۰۳٫۴ | ۳۶۰ | ۲۰٫۷ |
| ۴٫۰ | ۳۶۱٫۷ | ۵۵ | ۹۶٫۹ | ۳۸۰ | ۱۹٫۷ |
| ۴٫۵ | ۳۴۷٫۷ | ۶۰ | ۹۱٫۱ | ۴۰۰ | ۱۸٫۸ |
| ۵٫۰ | ۳۳۵٫۲ | ۶۵ | ۸۶٫۰ | ۴۲۰ | ۱۷٫۹ |
| ۵٫۵ | ۳۲۳٫۸ | ۷۰ | ۸۱٫۵ | ۴۴۰ | ۱۷٫۲ |
| ۶٫۰ | ۳۱۳٫۵ | ۷۵ | ۷۷٫۵ | ۴۶۰ | ۱۶٫۵ |
| ۶٫۵ | ۳۰۴٫۰ | ۸۰ | ۷۳٫۸ | ۴۸۰ | ۱۵٫۸ |
| ۷٫۰ | ۲۹۵٫۳ | ۸۵ | ۷۰٫۵ | ۵۰۰ | ۱۵٫۲ |
| ۷٫۵ | ۲۸۷٫۲ | ۹۰ | ۶۷٫۵ | ۵۵۰ | ۱۴٫۹ |
| ۸٫۰ | ۲۷۹٫۷ | ۹۵ | ۶۴٫۷ | ۶۰۰ | ۱۴٫۸ |
| ۸٫۵ | ۲۷۲٫۷ | ۱۰۰ | ۶۲٫۲ | ۶۵۰ | ۱۱٫۹ |
| ۹٫۰ | ۲۶۶٫۲ | ۱۱۰ | ۵۷٫۶ | ۷۰۰ | ۱۱٫۱ |
| ۹٫۵ | ۲۶۰٫۰ | ۱۲۰ | ۵۳٫۷ | ۷۵۰ | ۱۰٫۴ |
| ۱۰ | ۲۵۴٫۲ | ۱۳۰ | ۵۰٫۴ | ۸۰۰ | ۹٫۸ |
| ۱۲ | ۲۳۳٫۹ | ۱۴۰ | ۴۷٫۴ | ۸۵۰ | ۹٫۲ |
| ۱۴ | ۲۱۷٫۳ | ۱۵۰ | ۴۴٫۷ | ۹۰۰ | ۸٫۷ |
| ۱۶ | ۲۰۳٫۳ | ۱۶۰ | ۴۲٫۴ | ۹۵۰ | ۸٫۳ |
| ۱۸ | ۱۹۱٫۳ | ۱۷۰ | ۴۰٫۲ | ۱۰۰۰ | ۷٫۹ |
| ۲۰ | ۱۸۰٫۹ | ۱۸۰ | ۳۸٫۳ | | |



شکل (۴-۲) تغییرات ρ بر حسب مقادیر مختلف پریود پایدار در یک راکتور MTR نوعی.

جدول (۴-۲) اطلاعات گروه‌های نوترون تاخیری (شش گروه نوترون تاخیری).

| i | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| β_i | ۰/۰۰۰۲۱۵ | ۰/۰۰۱۴۱۴ | ۰/۰۰۱۲۷۴ | ۰/۰۰۲۵۶۸ | ۰/۰۰۰۷۴۸ | ۰/۰۰۰۲۷۳ |
| $T_{i, \frac{1}{2}}$ (sec) | ۵۴/۵۱ | ۲۱/۸۴ | ۶ | ۲/۲۳ | ۰/۴۹۶ | ۰/۱۷۹ |
| λ_i | ۰/۰۱۲۷ | ۰/۰۳۱۷ | ۰/۱۱۶ | ۰/۳۱۱ | ۱/۳۹۸ | ۳/۸۷۲ |

نحوه انجام آزمایش

برای اندازه‌گیری ارزش کل میله مورد نظر و مدرج کردن آن لازم است میله مربوطه بطور کامل در قلب راکتور وارد گردد و با استفاده از سایر میله‌ها، راکتور بحرانی گردد. معمولاً این کار در سطوح قدرت چند صد وات صورت می‌گیرد. هر بار با خارج کردن کسری از میله کنترل، راکتیویته مثبتی به قلب تزریق شده و با اندازه‌گیری پریود پایدار و استفاده از جدول ρ بر حسب τ (جدول (۴-۱)) مقدار متناظر برای راکتیویته مجهول استخراج می‌گردد. طبعاً اندازه‌گیری زمان دو برابر شدن قدرت، T_D ، ساده‌تر بوده و با تحت نظر قرار دادن مقدار قدرت از کانال CIC در فاصله زمانی بین دو برابر شدن قدرت می‌توان آن را اندازه‌گیری نمود. در هر مرحله با کمک سایر میله‌های کنترل وضعیت راکتور مجدداً به حالت بحرانی بازگشت داده شده و سپس مجدداً با خارج کردن کسر دیگری از میله کنترل راکتیویته مثبت جدیدی به آن تزریق می‌شود. بدین ترتیب با ثبت مقادیر راکتیویته متناظر با هر یک از بخش‌های میله کنترل می‌توان منحنی ρ بر حسب موقعیت میله کنترل را رسم نمود. برای ثبت اطلاعات و استفاده نهایی برای رسم منحنی، لازم است ابتدا فرم پیوست تکمیل گردد. چون ارزش میله‌های کنترل در

آزمایش‌های آتی مورد نیاز است، از این‌رو نتایج کالیبراسیون هر پنج میله کنترل را آکتور تحقیقاتی نوعی MTR در انتهای این فصل آورده شده است.

نکته ۱: از آنجا که راکتیویته مثبت ایجاد شده با خارج کردن تدریجی میله مورد نظر از قلب ایجاد می‌شود و از آنجا که لازم است با کمک سایر میله‌ها در هر مرحله راکتیویته مذکور جبران گردد، از این‌رو می‌توان دو میله کنترل را هم‌زمان کالیبره نمود. میله کنترل دوم را در حالت صد در صد خارج از قلب قرار داده و در هر مرحله برای صفر کردن p از وارد نمودن قسمتی از آن به قلب استفاده می‌شود. شماره این دو میله در ستون‌های اول و دوم فرم پیوست درج شده است.

Niaze-Danesh.com

نتایج آزمایش‌های کالیبراسیون میله‌های کنترل در یک راکتور MTR نوعی

در ادامه نتایج بدست آمده از سه آزمایش مختلف که برای مدرج کردن میله‌های کنترل در یک راکتور MTR نوعی آورده شده است. آزمایش اول به میله‌های کنترل دو و سه می‌پردازد.

آزمایش شماره ۱:

میله‌های کنترلی که همزمان کالیبره می‌شوند: میله‌های کنترل دو و سه

قدرت حرارتی راکتور: ۱/۵ کیلو وات

درصد خروج میله‌های کنترل از قلب راکتور: $CR_1 = 75$ ، $CR_2 = 100$ ، $CR_3 = 0$ ، $CR_4 = 75$ ، $Reg. Rod = 52.8$

مقدار کسر موثر نوترون تاخیری: ۰٫۰۸۱۳

| ردیف | درصد خروج میله- های کنترل | | T_D | | $\tau = \frac{T_D}{0.693}$ | راکتیویته | |
|------|------------------------------|--------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------------|--------|
| | CR_3 | CR_2 | T_{D1} (۳۰-۶۰) % | T_{D2} (۴۰-۸۰) % | | $\Delta\rho$ (% $\Delta k/k$) | کل |
| ۱ | ۰ | ۱۰۰ | ۰ | ۰ | ۰٫۰ | ۰ | ۰ |
| ۲ | ۹ | ۸۶٫۳ | ۴۸٫۵۷ | ۵۲٫۰۶ | ۷۵٫۱۱ | ۰٫۰۹۷۵ | ۰٫۰۹۷۵ |
| ۳ | ۱۴٫۹ | ۷۸٫۳ | ۳۷٫۷۸ | ۴۰٫۶ | ۵۸٫۵۷ | ۰٫۱۱۶۷ | ۰٫۲۱۴۲ |
| ۴ | ۱۹٫۴ | ۷۲ | ۳۵٫۸۸ | ۳۷٫۸۵ | ۵۴٫۶۱ | ۰٫۱۲۲۵ | ۰٫۳۳۶۷ |
| ۵ | ۲۳٫۵ | ۶۶٫۵ | ۳۱٫۱ | ۳۲٫۷۲ | ۴۸٫۶۵ | ۰٫۱۳۲۵ | ۰٫۴۶۹۲ |
| ۶ | ۲۶٫۷ | ۶۱٫۶ | ۲۷٫۲۹ | ۳۵٫۶۲ | ۵۱٫۳۹ | ۰٫۱۲۷۷ | ۰٫۵۹۶۹ |
| ۷ | ۲۹٫۵ | ۵۷٫۶ | ۲۶٫۶۲ | ۳۳٫۸۱ | ۴۸٫۲۰ | ۰٫۱۱۰۵ | ۰٫۷۰۷۴ |
| ۸ | ۳۲٫۳ | ۵۳٫۵ | ۲۸٫۲۵ | ۳۱٫۰۳ | ۴۴٫۶۱ | ۰٫۱۱۵۸ | ۰٫۸۲۳۲ |
| ۹ | ۳۵٫۱ | ۴۹٫۶ | ۲۶٫۵۹ | ۲۹٫۵ | ۴۲٫۶۹ | ۱۱٫۸۹ | ۰٫۹۴۲۱ |
| ۱۰ | ۳۷٫۶ | ۴۶٫۰ | ۲۶٫۳۷ | ۲۹٫۹۴ | ۴۲٫۳۹ | ۰٫۱۱۰۳ | ۱٫۰۵۲۶ |
| ۱۱ | ۴۰٫۳ | ۴۲٫۳ | ۲۶٫۳۲ | ۲۹٫۲۵ | ۴۲٫۰۵ | ۰٫۱۱۳۴ | ۱٫۱۶۵۸ |
| ۱۲ | ۴۳٫۱ | ۳۸٫۵ | ۲۶٫۹۴ | ۲۸٫۱۶ | ۴۰٫۹۴ | ۰٫۱۱۷۵ | ۱٫۲۸۳۳ |
| ۱۳ | ۴۶٫۱ | ۳۵٫۰ | ۲۹٫۹۵ | ۲۷٫۳۸ | ۴۰٫۱۴ | ۰٫۱۱۳۲ | ۱٫۳۹۶۵ |
| ۱۴ | ۴۹ | ۳۱٫۵ | ۳۹٫۸۷ | ۲۶٫۰۰ | ۴۳٫۴۸ | ۰٫۱۱۰۲ | ۱٫۵۰۶۷ |
| ۱۵ | ۵۱٫۸ | ۲۸٫۱ | ۴۱٫۰۳ | ۲۴٫۶۵ | ۵۹٫۴۲ | ۰٫۱۰۹۱ | ۱٫۶۱۵۸ |
| ۱۶ | ۵۴٫۷ | ۲۴٫۶ | ۳۹٫۵ | ۲۳٫۹۷ | ۵۶٫۹۹ | ۰٫۱۱۲۱ | ۱٫۷۲۷۹ |
| ۱۷ | ۵۷٫۹ | ۲۰٫۱ | ۳۶٫۴۳ | ۲۳٫۰۳ | ۵۲٫۷۵ | ۰٫۱۱۷۸ | ۱٫۸۴۵۷ |
| ۱۸ | ۶۱٫۴ | ۱۴٫۹ | ۳۵٫۷۵ | ۲۲٫۵ | ۵۰٫۱۰ | ۰٫۱۲۳۳ | ۱٫۹۶۹ |
| ۱۹ | ۶۵٫۲ | ۷٫۸ | ۳۲٫۰۰ | ۲۲٫۳۲ | ۵۰٫۹۶ | ۰٫۱۲۸۴ | ۲٫۰۹۷۴ |
| ۲۰ | ۶۹٫۳ | ۰ | ۳۴٫۰۳ | ۳۷٫۰۰ | ۵۳٫۳۸ | ۰٫۱۲۴۴ | ۲٫۲۲۱۸ |

| ردیف | درصد خروج میله - های کنترل | | T _D | | $\tau = \frac{T_D}{0.693}$ | راکتیویته | |
|------|-------------------------------|------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------|
| | CR۳ | CR۱ | T _{D1} (۳۰-۶۰) % | T _{D2} (۴۰-۸۰) % | | $\Delta\rho$ (%Δk/k) | کل |
| ۲۱ | ۷۳,۷ | ۷۰,۰ | ۳۶,۶۶ | ۳۸,۸۵ | ۵۶,۰۵ | ۰,۱۲۰۳ | ۲,۳۴۲۱ |
| ۲۲ | ۷۸,۶ | ۶۶,۸ | ۳۹,۱۳ | ۴۱,۹۴ | ۶۰,۵۱ | ۰,۱۱۴۰ | ۲,۴۵۶۱ |
| ۲۳ | ۸۴,۳ | ۶۴,۰ | ۴۴,۹۱ | ۴۹,۱۰ | ۷۰,۸۴ | ۰,۱۰۱۸ | ۲,۵۵۷۹ |
| ۲۴ | ۹۲,۰ | ۶۱,۸ | ۵۷,۵۳ | ۶۲,۵۹ | ۹۰,۳۰ | ۰,۰۸۴۹ | ۲,۶۴۲۸ |
| ۲۵ | ۱۰۰ | ۶۰,۸ | ۲۱۲,۸۱ | ۲۱۳,۰۰ | ۳۰۷,۲۹ | ۰,۰۳۰۳ | ۲,۶۷۳۱ |

Niaze-Danesh.com

آزمایش شماره ۲:

میله‌های کنترلی که همزمان کالیبره می‌شوند: CR۴ و CR۱

قدرت حرارتی رآکتور: ۱/۵ کیلو وات

درصد خروج میله‌های کنترل از قلب رآکتور: CR۱ = ۰/۰ ، CR۲ = ۷۴/۷ ، CR۳ = ۷۴/۷ ، CR۴ = ۱۰۰ ، Reg. Rod = ۵۰/۲

مقدار کسر موثر نوترون تاخیری: ۰/۰۸۱۳

| ردیف | درصد خروج میله- های کنترل | | T _D | | $\tau = \frac{T_D}{0.693}$ | راکتیویته | |
|------|------------------------------|------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------|
| | CR۱ | CR۴ | T _{D1} (۳۰-۶۰) % | T _{D2} (۴۰-۸۰) % | | $\Delta\rho$ (%Δk/k) | کل |
| ۱ | ۰ | ۱۰۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۲ | ۱۰٫۲ | ۸۲٫۴ | ۲۷٫۷۸ | ۳۲٫۲۲ | ۴۶٫۴۸ | ۰٫۱۳۶۶ | ۰٫۱۳۶۶ |
| ۳ | ۱۵٫۷ | ۷۵٫۷ | ۳۸٫۵۹ | ۴۲٫۶۹ | ۶۱٫۵۹ | ۰٫۱۱۲۶ | ۰٫۲۴۹۲ |
| ۴ | ۱۹٫۸ | ۷۰٫۵ | ۳۹٫۵۳ | ۴۲٫۷۸ | ۶۱٫۷۲ | ۰٫۱۱۲۴ | ۰٫۳۶۱۶ |
| ۵ | ۲۳٫۳ | ۶۵٫۲ | ۳۵٫۶۹ | ۳۶٫۹۹ | ۵۳٫۳۷ | ۰٫۱۲۴۴ | ۰٫۴۸۶۰ |
| ۶ | ۲۶٫۵ | ۶۱٫۰ | ۴۴٫۰۹ | ۴۸٫۱۹ | ۶۹٫۵۲ | ۰٫۱۰۲۳ | ۰٫۵۸۸۳ |
| ۷ | ۲۹٫۷ | ۵۷٫۰ | ۳۹٫۹۷ | ۳۳٫۵۱ | ۶۲٫۷۷ | ۰٫۱۱۱۱ | ۰٫۶۹۹۴ |
| ۸ | ۳۲٫۵ | ۵۳٫۵ | ۴۴٫۹۷ | ۴۷٫۳۹ | ۶۸٫۳۷ | ۰٫۱۰۴۵ | ۰٫۸۰۳۹ |
| ۹ | ۳۵٫۳ | ۵۰٫۰ | ۳۹٫۹۷ | ۴۳٫۳ | ۶۲٫۴۷ | ۰٫۱۱۱۵ | ۰٫۹۱۵۴ |
| ۱۰ | ۳۸٫۱ | ۴۶٫۶ | ۱۷٫۰۳ | ۳۹٫۷۶ | ۵۷٫۳۶ | ۰٫۱۱۸۴ | ۱٫۰۳۳۸ |
| ۱۱ | ۴۰٫۹ | ۴۳٫۵ | ۳۸٫۳۱ | ۴۱٫۵۸ | ۵۹٫۹۹ | ۰٫۱۱۴۷ | ۱٫۱۴۸۵ |
| ۱۲ | ۴۳٫۵ | ۴۰٫۵ | ۴۰٫۳۱ | ۴۳٫۷۸ | ۶۳٫۱۶ | ۰٫۱۱۰۶ | ۱٫۲۵۹۱ |
| ۱۳ | ۴۶٫۷ | ۳۶٫۹ | ۲۹٫۵ | ۳۳٫۲۳ | ۴۷٫۹۴ | ۰٫۱۳۳۸ | ۱٫۳۹۲۹ |
| ۱۴ | ۴۹٫۷ | ۳۳٫۵ | ۳۰٫۷۲ | ۳۲٫۹۳ | ۴۷٫۵۱ | ۰٫۱۳۴۶ | ۱٫۵۲۷۵ |
| ۱۵ | ۵۳٫۰ | ۲۹٫۹ | ۳۰٫۶۹ | ۳۳٫۳۱ | ۴۸٫۰۶ | ۰٫۱۳۳۶ | ۱٫۶۶۱۱ |
| ۱۶ | ۵۶٫۷ | ۲۶٫۰ | ۲۷٫۸۷ | ۳۰٫۱۵ | ۴۳٫۵۰ | ۰٫۱۴۲۷ | ۱٫۸۰۳۸ |
| ۱۷ | ۶۰٫۴ | ۲۱٫۶ | ۲۸٫۹۷ | ۳۱٫۳۶ | ۴۵٫۲۴ | ۰٫۱۳۹۱ | ۱٫۹۴۲۹ |
| ۱۸ | ۶۴٫۵ | ۱۶٫۳ | ۲۶٫۸۸ | ۲۹٫۴۱ | ۴۲٫۴۳ | ۰٫۱۴۵۱ | ۲٫۰۸۸۰ |
| ۱۹ | ۶۸٫۵ | ۱۰٫۰ | ۳۳٫۹۱ | ۳۶٫۹۱ | ۵۳٫۲۵ | ۰٫۱۲۴۶ | ۲٫۲۱۲۶ |
| ۲۰ | ۷۲٫۲ | ۰ | ۴۱٫۳۵ | ۴۴٫۹۱ | ۶۴٫۷۹ | ۰٫۱۰۸۶ | ۲٫۳۲۱۲ |

| ردیف | درصد خروج میله- های کنترل | | T _D | | $\tau = \frac{T_D}{0,693}$ | راکتیویته | |
|------|------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------|
| | CR ₁ | CR ₃ | T _{D1} (۳۰-۶۰) % | T _{D2} (۴۰-۸۰) % | | $\Delta\rho$ (%Δk/k) | کل |
| ۲۱ | ۷۶,۷ | ۷۰,۲ | ۳۷,۵۹ | ۴۰,۶۵ | ۵۸,۶۵ | ۰,۱۱۶۶ | ۲,۴۳۷۸ |
| ۲۲ | ۸۲,۵ | ۶۵,۸ | ۳۱,۶۲ | ۳۴,۷۳ | ۵۰,۱۰ | ۰,۱۲۹۹ | ۲,۵۶۷۷ |
| ۲۳ | ۸۸,۶ | ۶۳,۰ | ۵۱,۰۰ | ۵۵,۰۵ | ۷۹,۴۲ | ۰,۰۹۳۶ | ۲,۶۶۱۳ |
| ۲۴ | ۱۰۰ | - | ۴۲,۸۸ | ۴۸,۲۹ | ۶۹,۶۷ | ۰,۱۰۳۱ | ۲,۷۶۴۴ |

آزمایش شماره ۳:

میله‌های کنترلی که همزمان کالیبره می‌شوند: CR_۴ و Reg. Rod

قدرت حرارتی رآکتور: ۱/۵ کیلو وات

درصد خروج میله‌های کنترل از قلب رآکتور: CR_۱ = ۵۹,۰، CR_۲ = ۵۹,۰، CR_۳ = ۵۹,۰، CR_۴ = ۵۶,۸، Reg. Rod = ۰,۰

مقدار کسر موثر نوترون تاخیری: ۰,۰۰۸۱۳

| ردیف | درصد خروج میله- های کنترل | | T _D | | $\tau = \frac{T_D}{0,693}$ | راکتیویته | |
|------|------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------|
| | Reg. Rod | CR _۴ | T _{D1} (۳۰-۶۰) % | T _{D2} (۴۰-۸۰) % | | $\Delta\rho$ (%Δk/k) | کل |
| ۱ | ۰ | ۵۶,۸ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۲ | ۲۵,۸ | ۵۴,۲ | ۶۶,۰۷ | ۷۲,۰ | ۱۰۳,۸۷ | ۰,۰۷۶۲ | ۰,۰۷۶۲ |
| ۳ | ۴۴,۴ | ۵۱,۰ | ۴۰,۲۱ | ۴۳,۹۴ | ۶۳,۳۹ | ۰,۱۱۰۳ | ۰,۱۸۶۵ |
| ۴ | ۵۷,۰ | ۴۷,۰ | ۳۰,۰ | ۳۳,۲۵ | ۴۷,۹۷ | ۰,۱۳۳۷ | ۰,۳۲۰۲ |
| ۵ | ۱۰۰,۰ | - | ۳۶,۰ | ۳۹,۹ | ۵۷,۵۶ | ۰,۱۱۸۱ | ۰,۴۳۸۳ |

پیوست: فرم انجام آزمایش

| ردیف | درصد خروج میله- های کنترل | | T _D | | $\tau = \frac{T_D}{0.693}$ | راکتیویته | |
|------|------------------------------|---------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|----|
| | CR..... | CR..... | T _{D1} (۳۰-۶۰) % | T _{D2} (۴۰-۸۰) % | | $\Delta\rho$ (%Δk/k) | کل |
| ۱ | | | | | | | |
| ۲ | | | | | | | |
| ۳ | | | | | | | |
| ۴ | | | | | | | |
| ۵ | | | | | | | |
| ۶ | | | | | | | |
| ۷ | | | | | | | |
| ۸ | | | | | | | |
| ۹ | | | | | | | |
| ۱۰ | | | | | | | |
| ۱۱ | | | | | | | |
| ۱۲ | | | | | | | |
| ۱۳ | | | | | | | |
| ۱۴ | | | | | | | |
| ۱۵ | | | | | | | |
| ۱۶ | | | | | | | |
| ۱۷ | | | | | | | |
| ۱۸ | | | | | | | |
| ۱۹ | | | | | | | |
| ۲۰ | | | | | | | |

سوالات

- ۱) آیا ارزش میله‌های کنترل به قدرت رآکتور بستگی دارد؟
- ۲) چرا در استفاده از چند T_D اندازه‌گیری شده، از متوسط‌گیری استفاده نمی‌شود؟
- ۳) چرا در معادله پیوستگی برای نوترون‌ها، عبارت $\frac{n}{\ell}$ معادل عبارت تلفات نوترونی در سامانه بی‌نهایت بزرگ است؟
- ۴) با توجه به جدول (۲-۴)، کوتاه‌ترین پریود برای خاموش کردن رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR چقدر است؟
- ۵) هنگامی که دو میله کنترل توأمأ کالیبره می‌شوند، ارزش اجزایی از میله‌ها که متناظر با صفر درصد و صد درصد است حقیقتاً مربوط به چه بخش‌هایی از میله‌ها هستند؟
- ۶) در کدام یک از انواع رآکتور رابطه (۱-۴) ممکن است صادق نباشد؟
- ۷) آیا به نظر شما بی‌آنکه راکتیویته به وسیله میله‌های کنترل به رآکتور تزریق گردد، می‌توان قدرت رآکتور را افزایش داد؟ فرض کنید که رآکتور بدون حضور چشمه بحرانی باشد.
- ۸) رابطه (۱-۴) را اثبات کنید.
- ۹) رابطه (۲-۴) را از دو روش کاربرد تبدیل لاپلاس و استفاده از روش ذکر شده در متن کتاب اثبات کنید.
- ۱۰) به کمک نرم‌افزار متلب برنامه‌ای بنویسید تا دستگاه معادلات دیفرانسیل مرتبه اول (2-5) را به صورت عددی برای راکتیویته‌های تابع زمان مختلف حل کند. نتایج را توسط دستور plot رسم کنید (جهت راهنمایی به استاد درس مراجعه کنید).
- ۱۱) به کمک نرم‌افزار سیمولینک تحت نرم‌افزار متلب برنامه‌ای بنویسید تا دستگاه معادلات دیفرانسیل مرتبه اول (2-5) به صورت عددی برای راکتیویته تابع زمان سینوسی حل کند (جهت راهنمایی به استاد درس مراجعه کنید).
- ۱۲) تمرین‌های ۱۱ و ۱۲ را با در نظر گرفتن بازخوردهای حرارتی ناشی از سوخت، غلاف، و خنک‌کننده با در نظر گرفتن یک مدل مناسب حل کنید.
- ۱۳) با ترسیم نتایج تجربی تابع زمان قدرت رآکتور بعد از اعمال راکتیویته مثبت به قلب رآکتور، بطور تجربی بیان کنید که حدوداً بعد از چه مدت زمانی جملات نمایی قابل صرف نظر خواهند بود. قابل ذکر است اگر محور افقی را به صورت لگاریتمی ترسیم کنید، انتظار می‌رود که تغییرات قدرت نسبت به زمان خطی باشد. آیا چنین نتیجه‌ای نیز در عمل مشاهده می‌شود. در این حالت شیب خط، پریود پایدار رآکتور خواهد بود.
- ۱۴) منابع خطا را در این آزمایش شرح دهید. آیا راه بهتری برای انجام دقیق‌تر آزمایش وجود دارد؟
- ۱۵) دو میله‌ای که جهت کالیبراسیون هم‌زمان انتخاب می‌شوند سعی می‌گردد در دورترین فاصله از هم قرار گرفته باشند. چرا؟

فصل پنجم: اندازه‌گیری جرم بحرانی قلب راکتور

در این فصل با موارد زیر آشنا می‌شوید

آشنایی با نحوه تعیین تجربی حداقل جرم بحرانی در یک راکتور هسته‌ای

مقدمه

راکتورهایی که طراحی و ساخته می‌شوند مقدار ضریب تکثیر k و جرم بحرانی آن بر مبنای مدل‌های محاسباتی تعیین می‌گردد. به هر حال راکتور ساخته شده بر مبنای مقتضیات فوق لازم است که مجدداً جرم بحرانی واقعی آن طی آزمایش‌های تجربی تعیین گردد. جرم بحرانی عملاً در طی کار راکتور به دلیل تغییر در ماده سوخت تغییر خواهد کرد. در این فصل، جرم بحرانی برای راکتور تحقیقاتی نوعی MTR در شرایطی که از سوخت MTR با غنای 20% از U^{235} استفاده می‌نماید بطور تجربی تعیین می‌گردد.

تئوری آزمایش

یک محیط غیر تکثیری دارای ضریب تکثیر $k=0$ می‌باشد. به محض افزودن سوخت در محیط، مقدار k غیر صفر گردیده و با افزودن سوخت مقدار آن شروع به افزایش می‌کند. مقداری از سوخت که باعث بحرانی شدن سامانه گردد یعنی $k=1$ شود را جرم بحرانی آن مجموعه می‌نامند. از این رو با توجه باینکه:

$$k_{\text{eff}} = \epsilon \eta f p P_{\text{NL}} \quad (5-1)$$

باید دید که چه عواملی بیشترین تاثیر را در افزایش k خواهد داشت. واضحاً بیشترین تاثیر از ناحیه f و P_{NL} می‌باشد. افزایش بسته‌های سوخت به مجموعه باعث افزایش f می‌گردد. در مورد ضریب عدم فرار، P_{NL} ، رعایت شکل بحرانی حایز اهمیت است.

در میان احجام هندسی با داشتن حجم ثابت، کره حایز کمترین نسبت سطح به حجم می‌باشد. از آنجا که:

$$R^2 \propto \text{سطح} \propto \text{فرار نوترون‌ها از مجموعه}$$

$$R^3 \propto \text{حجم} \propto \text{تولید نوترون‌ها در مجموعه}$$

از این رو:

$$\frac{1}{R} \propto \frac{S}{V} \propto (\text{تولید})/(\text{فرار})$$

بنابراین با بزرگ‌تر شدن حجم، نسبت فرار به تولید کاهش یافته و به عبارت دیگر P_{NL} افزایش می‌یابد. از این رو مقدار k به سمت واحد میل خواهد نمود. توجه شود که چنانچه بسته‌های سوخت بصورت یک ردیف مستقیم پشت سر یکدیگر اضافه شوند هیچگاه جرم بحرانی حاصل نخواهد شد زیرا در چنین هندسه‌هایی نسبت سطح به حجم بسیار زیاد بوده و مقدار P_{NL} ناچیز خواهد بود.

بنابراین آنچه در آزمایش جرم بحرانی حایز اهمیت است این است که شکل بحرانی نیز همزمان در چیدمان سوخت‌ها رعایت گردد. به عبارت دیگر شکل قلب (مجموعه سوخت‌ها) هر چه بیشتر به یک شکل متمرکز (کروی) نزدیک تر باشد. همانگونه که از شکل (۵-۱) مشاهده می‌شود چیدمان بسته‌های سوخت از یک الگوی مارپیچی تبعیت می‌نماید.

نکته ۱: با وجود مشکلات زیاد جهت استقرار یک سامانه واکنش گداخت خود کفا، معهدا این امر بسادگی در طبیعت در حال حاضر در درون ستارگان (منجمله خورشیدما) جریان دارد. علت، بزرگ بودن فوق العاده زیاد مجموعه است که نسبت تلفات را ناچیز می‌سازد.

در این آزمایش از شمارشات کانال اتاقتک شکافت، بعنوان معیاری از حرکت بسمت بحرانی استفاده می‌نماییم. طبعاً هر بار با افزایش یک بسته سوخت به مجموعه، میزان شمارشات کانال اتاقتک نیز افزایش می‌یابد. در این پروسه، سامانه فعل و انفعال زنجیری کماکان برقرار بوده لیکن در حالت زیر بحرانی می‌باشد، یعنی $k < 1$. از معادلات سینتیک نقطه‌ای داریم:

$$\begin{cases} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \\ \frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} n(t) - \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \end{cases} \quad (5-2)$$

در شرایط زیر بحرانی، با حضور چشمه خارجی نوترون، در حالتی که تعداد زیادی از نسل نوترون‌ها گذشته باشد (شرایط ایستا حکم فرما باشد)، خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt}(n(t) + C(t)) = \frac{\beta}{\Lambda} n(t) + \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n(t) + q_0 = 0 \Rightarrow \frac{\rho}{\Lambda} n(t = \infty) = q_0$$

از این رو خواهیم داشت:

$$\frac{n(t = \infty)}{k \times \Lambda} = \frac{n(t = \infty)}{\ell} = \text{Loss Rate} = \frac{q_0}{\rho} = q_0 \times \frac{1}{k - 1} \quad (5-3)$$

پس در این حالت تاثیری که آشکارساز نوترون خواهد پذیرفت، به شکل زیر خواهد شد:

$$\text{LossRate} = \frac{q_0}{k - 1} \propto \text{NeutronDetectorCountRate}$$

لازم به ذکر است به دلیل کوتاهی عمر هر نسل، Λ (حدود ۴۵ میکروثانیه)، حالت ایستای جدید خیلی زود حاصل خواهد شد. پس وقتی که k به یک نزدیک می‌شود، C ، نرخ شمارش آشکارساز نوترون به شدت افزایش پیدا میکند و به سمت بی‌نهایت میل میکند بهمین دلیل به عبارت $\frac{1}{1-k}$ ضرب بزرگنمایی گفته می‌شود. طبیعی است که هر بار با افزودن یک بسته سوخت، k بیشتر می‌شود. از این رو میزان شمارش دریافتی در آشکارساز، C ، نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، ترسیم میزان شمارشات در مقابل جرم موجود در قلب، M ، معیاری از حرکت بسمت بحرانی شدن می‌باشد. چون در نزدیکی حالت بحرانی C بسمت بی‌نهایت میل مینماید، متاسفانه نمایش چنین شکلی مقدور نمی‌باشد. از این رو از عکس آن یعنی $\frac{1}{C}$ در محور

عرض‌ها استفاده می‌شود. در شکل (۲-۵) نمونه‌ای از چنین وضعیتی دیده می‌شود. محل تقاطع منحنی حاصل از به هم پیوستن نقاط تجربی با محور طول‌ها، جرم بحرانی را بدست می‌دهد. مماس بر منحنی پیش بینی اولیه‌ای از جرم بحرانی بدست می‌دهد.

شرح آزمایش

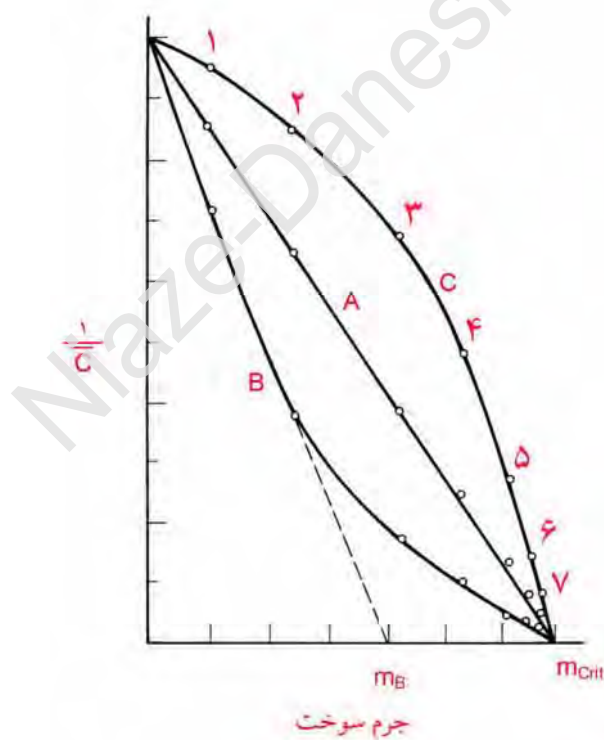
در این آزمایش لازمست دقت زیادی به عمل آید زیرا بالقوه میتواند خطرناک باشد. از این رو برای رعایت جنبه‌های ایمنی، که در هر آزمایش رعایت آنها واجب است، هر بار برای وارد کردن یک بسته سوخت جدید در قلب، میله‌های کنترل را در وضعیت ۵۰٪ قرار می‌دهیم. در چنین حالتی چنانچه به هر دلیل حالت گذرایی رخ دهد که منجر به اسکرم^۱ رآکتور گردد، پنجاه درصد کل میله‌های جاذب بصورت رزرو در خارج قلب موجود است. البته در تمام طول آزمایش، چشمه نوترونی در محل ثابت خود کنار قلب قرار دارد. ضمناً برای صرفه جویی در وقت، معمولاً از قلبی شروع میکنیم که تعدادی از بسته‌های سوخت پیش از شروع آزمایش از مجموعه قلب خارج شده اند که بعداً یک به یک مجدداً به قلب بازگشت داده می‌شوند. اولین بسته سوخت را به قلب وارد کرده و سر جای خودش در محل قلبی خود قرار می‌دهیم سپس میله‌های کنترل را به تدریج بیرون کشیده تا جایی که رآکتور بحرانی شود. برای دقت در محاسبات، دستکم سه بار آشکارساز نوترونی را قرایت کرده متوسط گیری می‌نماییم (\bar{C}). ضمناً هر بار، جمع جرم سوخت‌های موجود در قلب نیز حساب شده و کلاً نتایج مربوطه در جدول پیوست درج می‌گردد.

اگر تا ۱۰۰ درصد همگی میله‌های کنترل بیرون آمده و رآکتور باز هم بحرانی نشد دوباره میله‌ها را تا ۵۰ درصد در قلب وارد کرده و سپس بسته سوخت بعدی را وارد می‌کنیم. دوباره میله‌های کنترل را به تدریج بیرون کشیده تا جایی که صد درصد از قلب خارج شده و مجدداً آشکارساز نوترونی قرایت می‌گردد. هر بار با افزایش یک بسته سوخت بدین ترتیب نقاط تجربی جدیدی برای جرم سوخت موجود در قلب، M و $\frac{1}{C}$ بدست آمده و در نهایت انتهای آزمایش هنگامی کامل می‌گردد که قلب پیش از بیرون آمدن میله‌های کنترل به حالت بحرانی برسد. نقاطی که بدین ترتیب بدست می‌آیند از جدول به روی کاغذ میلیمتری منتقل کرده و منحنی نمایش $\frac{1}{C}$ برحسب M را ترسیم مینماییم. برای نتیجه دقیقتر معمولاً از برازش منحنی به نقاط تجربی استفاده میشود. بسته به موقعیت نسبی چشمه نوترونی، قلب و اتاقک شکافت، قطر و تحدب این منحنی وضعیت خاصی بصورت یکی از انواع منحنی A، B و C در شکل (۲-۵) پیدا خواهد کرد. ضمناً لازم به یاد آوریست هر بار با داشتن دستکم آخرین دو نقطه تجربی میتوان با امتداد یک خط از آن دو و قطع محور طول‌ها، تخمین اولیه‌ای از جرم بحرانی بدست آورد. هر چه تعداد نقاط تکمیل تر گردد این تخمین تطابق بیشتری با مقدار حقیقی خود پیدا خواهد کرد.

نکته ۲: با توجه به اینکه رآکتور تحت بحرانی است. از این رو شار نوترون پایین بوده و با توجه به اینکه اتاقک شکافت در میان دیگر کانال‌ها بیشترین حساسیت را داراست از کانال اتاقک شکافت در مد شمارش جهت شمارش نسبی نوترون‌ها استفاده می‌کنیم.

| | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
|---|---|---|----|---|---|----|----|---|---|
| A | | | | | | | | | |
| B | | | | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | | |
| C | | | | ۶ | ۱ | ۲ | ۱۱ | | |
| D | | | NS | ۵ | ۴ | ۳ | ۱۲ | | |
| E | | | | | | ۱۴ | ۱۳ | | |
| F | | | | | | | | | |

شکل (۵-۱) نحوه و ترتیب وارد کردن بسته‌های سوخت یکی پس از دیگری.



شکل (۵-۲) نحوه رسم منحنی عکس شمارش نوترون نسبت به جرم سوخت.

نتایج نمونه آزمایش جرم بحرانی در یک رآکتور MTR نوعی

تعداد سوخت‌های موجود در قلب رآکتور: ۲۱ عدد که شامل ۱۶ عدد سوخت استاندارد و ۵ عدد سوخت کنترلی است

تعداد سوخت‌های خارج از قلب رآکتور: ۸ عدد سوخت استاندارد

فرض ۱: وزن اورانیوم ۲۳۵ موجود در هر بسته‌ی سوخت استاندارد: ۳۰۰ گرم

فرض ۲: وزن اورانیوم ۲۳۵ موجود در هر بسته‌ی سوخت کنترلی: ۲۰۰ گرم

| 1/ Cave | Cave | C3 | C2 | C1 | وزن اورانیوم-۲۳۵ موجود در قلب رآکتور فرضی، گرم | سوخت اضافه شده | اندیس |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---|----------------------|-------|
| $9,1 \times 10^{-3}$ | ۱۱۰,۳ | ۱۰,۸ | ۱۰,۲ | ۱۲۱ | ۵۸۰,۰ | - | ۱ |
| $7,9 \times 10^{-3}$ | ۱۲۷,۳ | ۱۲,۲ | ۱۳,۳ | ۱۲۷ | ۶۱۰,۰ | E5 | ۲ |
| $8,6 \times 10^{-3}$ | ۱۱۶,۳ | ۱۲,۱ | ۱۱,۳ | ۱۱۵ | ۶۳۰,۰ | E4 | ۳ |
| $5,3 \times 10^{-3}$ | ۱۹۰,۰ | ۱۷,۷ | ۲۰,۸ | ۱۸۵ | ۶۶۰,۰ | B4 | ۴ |
| $4,5 \times 10^{-3}$ | ۲۲۲,۳ | ۲۲,۷ | ۲۲,۵ | ۲۱۵ | ۶۹۰,۰ | C4 | ۵ |
| $2,9 \times 10^{-3}$ | ۳۴۰,۳ | ۳۲,۸ | ۳۳,۲ | ۳۶۱ | ۷۲۰,۰ | C3 | ۶ |
| $8,8 \times 10^{-6}$ | ۱۱۳۳۳,۰ | ۱۴۰۰۰,۰ | ۱۱۱۰۰,۰ | ۸۹۰۰۰,۰ | ۷۵۰,۰ | D5 | ۷ |

تعداد بسته‌های سوخت مورد نیاز برای بحرانی شدن قلب رآکتور: ۲۷ عدد می‌باشد که شامل ۲۲ عدد سوخت استاندارد و ۵

عدد سوخت کنترلی می‌باشد.

موقعیت میله‌های کنترل در حالت بحرانی از قلب رآکتور:

$$CR_1 = 60, CR_2 = 85, CR_3 = 100, CR_4 = 100, \text{Reg. Rod} = 100$$

شکل (۵-۳) موقعیت استقرار بسته‌های سوخت رآکتور MTR فرضی در شکل (۳-۵) آورده شده است.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
|---|--------|--------|--------|--------|------------|------------|-----|------------|--------|----------------|
| A | GR BOX | GR BOX | GR BOX | IR BOX | SFE | SFE | SFE | SFE | IR BOX | Thermal Column |
| B | | GR BOX | N.S | SFE | SFE | CFE SR1 | SFE | CFE RR | GR BOX | |
| C | GR BOX | GR BOX | SFE | SFE | CFE SR4 | SFE | SFE | SFE | GR BOX | |
| D | GR BOX | GR BOX | SFE | SFE | SFE | IR BOX | SFE | CFE SR2 | GR BOX | |
| E | GR BOX | GR BOX | IR BOX | SFE | SFE | CFE SR3 | SFE | SFE | IR BOX | |
| F | GR BOX | GR BOX | GR BOX | IR BOX | SFE | SFE | SFE | SFE | GR BOX | |

SFE : Standard Fuel Element
 CFE : Control Fuel Element
 SR : Shim Safety Rod
 RR : Regulating Rod

N.S : Neutron Source
 IR-Box : Irradiation Box
 GR BOX : Graphite Box

شکل (۳-۵) موقعیت استقرار بسته‌های سوخت رآکتور MTR فرضی.

پیوست: بهترین شکل رآکتور

فاکتور B^2 (باکلینگ) تعیین کننده ابعاد بحرانی رآکتور می‌باشد. در یک رآکتور کروی برابر $B^2 = \left(\frac{\pi}{R}\right)^2$ است و

از آنجا شعاع بحرانی برابر $R_{\text{Critical}} = \frac{\pi}{B}$ را بدست آورد. اما این موضوع در یک رآکتور استوانه‌ای صادق نمی‌باشد چرا که B^2 هم با R (شعاع) و هم با H (ارتفاع) رابطه دارد یعنی:

$$B^2 = \left(\frac{2.405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$$

منطق آن است که R و H ای را انتخاب کنیم که کمترین نسبت سطح به حجم را برای یک حجم ثابت داشته باشیم و از آنجا هزینه ساخت رآکتور و مواد مصرفی آن کاهش می‌یابد. بدین ترتیب هزینه که تقریباً متناسب با حجم است نیز به حداقل می‌رسد. برای محاسبه مقدار مینیمم حجم برای یک رآکتور استوانه‌ای می‌نویسیم:

$$R^2 = \frac{(2.405)^2}{B^2 - \frac{\pi^2}{H^2}}$$

R^2 را از فرمول فوق در فرمول حجم استوانه قرار می‌دهیم و داریم:

$$V = \pi R^2 H = \frac{\pi(2.405^2)H}{B^2 - \frac{\pi^2}{H^2}}$$

از این رابطه نسبت به H مشتق می‌گیریم و نتیجه را برابر صفر قرار می‌دهیم تا رابطه‌ای برای به حداقل رساندن حجم قلب استوانه‌ای بدست آوریم:

$$H = \frac{\pi\sqrt{3}}{B}, \quad R = \frac{2.405}{B} \sqrt{\frac{3}{2}}$$

معادلات فوق بهترین ابعاد را برای بدست آوردن حداقل حجم ممکن بدست می‌دهد، از این رو حجم کمینه برابر است با:

$$V_{\min} = \frac{148}{B^3}$$

همچنین نسبت ارتفاع به شعاع رآکتور در حجم می‌نیم برابر است با:

$$\frac{H}{R} = \frac{\pi\sqrt{2}}{2.405} \approx 1.85$$

$$a = b = c$$

اگر همین روابط را برای یک قلب مکعبی به ابعاد $a \times b \times c$ بنویسیم داریم:

سوالات

- (۱) شکل (۲-۵) سه منحنی را برای آزمایش اندازه گیری جرم بحرانی نشان می دهد،
- توضیح دهید چه موقع نتایج آزمایش به صورت منحنی بالایی و چه موقع به صورت منحنی پایینی است؟
 - از نقطه نظر ایمنی با توجه به تخمینی که از جرم بحرانی در هر مرحله بدست می آید کدام منحنی حاوی ایمنی بیشتری است؟
- (۲) توضیح دهید چرا وقتی که رآکتور از نوع هتروژن است احتیاج به سوخت کمتری جهت بحرانی شدن رآکتور می باشد؟
- (۳) افزایش هر بار یک بسته سوخت به قلب چگونه موجب افزایش فاکتور k می گردد؟
- (۴) در سامانه ای که هنوز اولین میله سوخت وارد نشده، ضریب تکثیر چقدر است؟
- (۵) در سامانه ای که چندین میله سوخت وارد شده لیکن هنوز جرم بحرانی احراز نشده است، آیا واکنش زنجیری وجود دارد؟
- (۶) در یک رآکتور زیر بحرانی که مطلقاً فاقد هرگونه چشمه نوترونی می باشد، ضریب تکثیر تا حدود چه عددی قابل دسترسی است؟
- (۷) چه تفاوتی از حیث واکنش زنجیری موجود است بین حالتی از رآکتور که با وجود چشمه خارجی در حالت بحرانی بسر می برد و حالتی که بدون وجود چشمه خارجی بحرانی است؟
- (۸) چرا در تلاش های بین المللی برای ساخت رآکتور گداخت سعی بر آنست که ابعاد آن را بزرگ اختیار کنند؟
- (۹) نتایج تجربی آزمایش جرم بحرانی آورده شده در صفحات قبل را ترسیم نمایید و نتایج بدست آمده تحلیل کنید.

فصل ششم: اندازه‌گیری ضریب راکتیویته خلاء

در این فصل با موارد زیر آشنا می‌شوید

(۱) اندازه‌گیری ضریب خلاء در رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR

(۲) بررسی پایداری قلب رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR در صورت وجود خلاء

مقدمه

تغییرات راکتیویته ناشی از هر عاملی را، طبق تعریف، ضریب راکتیویته ناشی از آن عامل می‌نامند. مثلاً، تغییرات راکتیویته نسبت به تغییرات درجه حرارت را ضریب دمایی راکتیویته می‌گویند و به صورت روبرو بیان می‌شود:

$$\alpha_T = \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (6-1)$$

با توجه به تعریف ρ ، اگر رابطه فوق را ساده کنیم داریم:

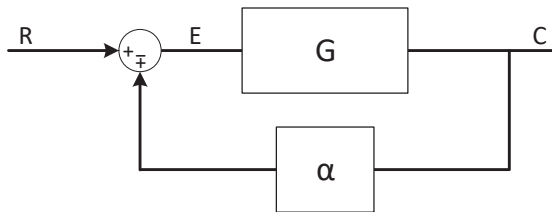
$$\alpha_T \approx \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial T} \quad (6-2)$$

مشابه‌هاً ضریب راکتیویته ناشی از خلاء را به صورت زیر تعریف می‌نماییم:

$$\alpha_V = \frac{\partial \rho}{\partial V} \approx \frac{\Delta \rho}{\Delta V} \quad (6-3)$$

که در آن ΔV حجم خلاءای می‌باشد که در قلب ایجاد شده است. منظور از خلاء در مسایل نوترونیک زایل شدن کندکننده به هر دلیل می‌باشد. در مورد رآکتورهای آب سبک، چنانچه به هر عاتی آب به بخار تبدیل شود خلاء ایجاد شده تولید راکتیویته (مثبت یا منفی) خواهد کرد.

بطور کلی اگر ضریب راکتیویته α مثبت باشد (فیدبک مثبت) رآکتور ناپایدار بوده و افزایش در راکتیویته سبب افزایش عامل بوجود آورنده شده که این نیز به نوبه خود موجب افزایش راکتیویته (یعنی افزایش بیشتر k و متعاقباً قدرت) خواهد شد. در صورت بوجود آمدن راکتیویته ناشی از هر یک از عوامل یاد شده، فیدبک ذاتی جهت کنترل پایدار رآکتور مطابق شکل (۶-۱) خواهد بود.



شکل (۶-۱) سامانه کنترل حلقه بسته.

$$\frac{E}{R} = \frac{1}{1 \pm \alpha G} \quad (6-4)$$

$$\frac{C}{R} = \frac{G}{1 \pm \alpha G} \quad (6-5)$$

شکل (۶-۱) نشان‌دهنده یک سامانه کنترل حلقه بسته می‌باشد. روابط یاد شده در فوق، معادله مشخصه سامانه مذکور است. G در رابطه فوق یک تابع بوده و α نیز یک تابع یا در حالت خاص یک عدد ثابت است. قابل ذکر است که اساسا سامانه قلب یک رآکتور هسته‌ای یک سامانه غیر خطی است. اما چنانکه تغییرات ورودی (راکتیویته) کوچک باشد می‌توان سامانه قلب رآکتور را به صورت خطی مدل‌سازی کرد.

تئوری آزمایش

برای بحث در مورد اینکه بروز خلاء (حباب یا هرگونه بخار آب) بر روی ضریب تکثیر چه تاثیری می‌گذارد، ابتدا لازم است نظری به فرمول شش فاکتوری ضریب تکثیر موثر قلب رآکتور بیان‌داریم. از نظریه دو گروهی پخش نوترون داریم:

$$k_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon \eta f p e^{-\tau B^2}}{1 + L^2 B^2} \quad (6-7)$$

که در آن:

η : تعداد نوترونی‌هایی که به ازای هر جذب نوترون در سوخت به دنیا می‌آیند.

ε : فاکتور شکافت با نوترون‌های سریع.

p : احتمال فرار از رزونانس.

f : فاکتور کارایی حرارتی^۱.

τ : سن فرمی^۲.

L^2 : سطح پخش حرارتی.

B : باکلینگ یا کمانش هندسی.

$e^{-\tau B^2}$: احتمال فرار نوترون‌های سریع.

$\frac{1}{1 + L^2 B^2}$: احتمال فرار نوترون‌های حرارتی.

بروز هرگونه خلاء در سامانه قلب رآکتور باعث تغییر در پارامترهای فوق می‌گردد. در حالت بحرانی، این رابطه برابر یک می‌باشد. بروز خلاء باعث افزایش و یا کاهش مقدار k_{eff} از مقدار بحرانی خود می‌گردد. چنانکه رآکتور در حالت کنترل اتوماتیک باشد، خروج میله کنترل تنظیمی تحت سامانه کنترل اتوماتیک رآکتور باعث برگشت به حالت بحرانی می‌گردد. با داشتن ارزش دیفرانسیلی میله کنترل تنظیمی از آزمایش شماره 2 می‌توان Δp که توسط خلاء ایجاد شده است را محاسبه نمود. چنانکه رآکتور در حالت کنترل دستی باشد، پیروی رآکتور وابسته به مقدار راکتیویته‌ای خواهد بود که خلاء باعث ایجاد آن می‌شود. معادله T ، پیروی پایدار رآکتور، می‌توان Δp را اندازه‌گیری کرد. در نهایت با داشتن حجم خلاء ایجاد شده،

1 - Thermal Utilization Factor

2 - Fermi Age

α ، ضریب راکتیویته خلاء محاسبه می‌گردد. قابل ذکر است ضریب راکتیویته خلاء به موقعیت خلاء در قلب رآکتور، ابعاد آن و چیدمان قلب رآکتور بستگی دارد. در ادامه به بررسی اثرات خلاء بر روی هر یک از پارامترهای رابطه فوق می‌پردازیم.

نشت نوترون: به دلیل آنکه با بروز خلاء دانسیته کند کننده کاهش پیدا میکند و کاهش آن سبب کاهش جذب و پراکندگی نوترون می‌گردد. از این رو τ و L^2 هر دو افزایش پیدا می‌کنند. ارتباط بین دانسیته کند کننده و پارامترهای مذکور به شرح زیر است:

$$L^2(\rho) = L^2(\rho_0) \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^2 \quad (6-8)$$

$$\tau(\rho) = \tau(\rho_0) \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^2 \quad (6-9)$$

ρ_0 = دانسیته کند کننده قبل از بروز خلا.

ρ = دانسیته کند کننده بعد از بروز خلا.

ضریب کارایی حرارتی^۱: با توجه به آنکه وجود خلاء باعث کاهش کند کنندگی و متعاقب آن کاهش شار نوترون‌های حرارتی در کند کننده می‌گردد، از این رو کاهش ξ ، فاکتور ناکارآمدی^۲، نیز متعاقباً اتفاق می‌افتد (واضح است که برای یک قلب رآکتور هموژن مقدار ξ برابر واحد است):

$$\xi = \frac{\bar{\Phi}_m}{\bar{\Phi}_f} \quad (6-10)$$

$$f = \frac{\sum_{aF} V_F \bar{\Phi}_F}{\sum_{aF} V_F \bar{\Phi}_F + \sum_{aM} V_M \bar{\Phi}_M} = \frac{\sum_{aF}}{\sum_{aF} + \sum_{aM} \left(\frac{V_M/V_{Cell}}{V_F/V_{Cell}}\right)} \cdot \xi \quad (6-11)$$

بروز خلاء باعث می‌شود که ξ افزایش پیدا کند، اما با توجه به آنکه نسبت V_M به V_F کاهش پیدا می‌کند، به راحتی نمی‌توان گفت که اثر کلی بروز خلاء باعث کاهش یا افزایش f می‌شود (در این مورد تحقیق کنید).

احتمال فرار از رزونانس: احتمال فرار از رزونانس^۳، P ، کاهش پیدا میکند چرا که با کاهش دانسیته کند کننده، نوترون‌ها شانس بیشتری برای برخورد با صفحات سوخت پیدا می‌کنند.

1 - Thermal Utilization Factor

2 - Disadvantage Factor

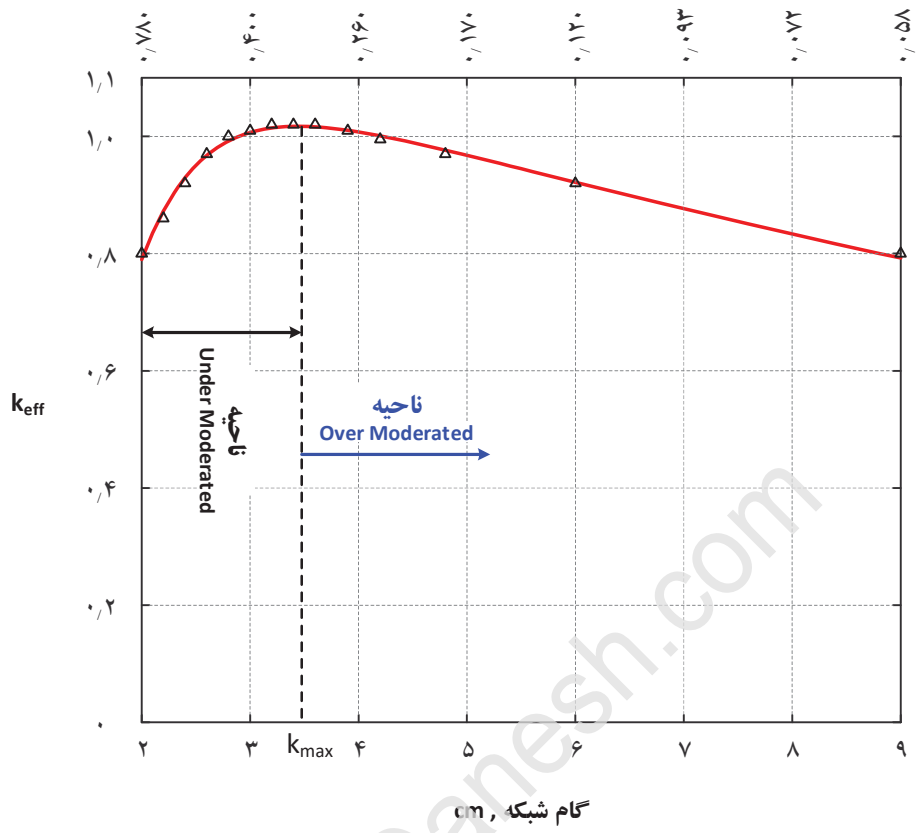
فاکتور شکافت با نوترون‌های سریع^۱: نظر به اینکه کاهش دانسیته کند کننده سبب کاهش کند کنندگی می‌شود. از این رو نوترون‌های پر انرژی شانس بیشتری برای شرکت در برهمکنش شکافت سریع را خواهند داشت. پس این پارامتر با بروز خلا افزایش پیدا میکند.

η : اثر روی η قابل صرف نظر است. بروز خلا باعث سخت تر شدن طیف نوترون میشود. سخت تر شدن طیف باعث افزایش ν می‌شود. ولی این افزایش جزیی با کاهش جزیی نسبت $\frac{\sum_c^{25}}{\sum_c}$ جبران می‌گردد. از این رو بطور تقریبی می‌توان گفت که پارامتر η مستقل از حجم خلا موجود در قلب است.

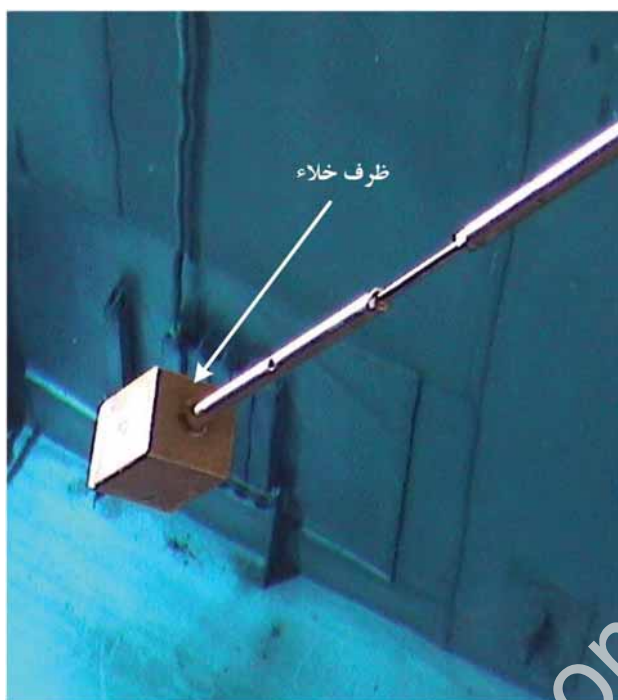
برخی از این پارامترها افزایشی و برخی دیگر کاهششی هستند. اما اثر کلی به مجموع این اثرات کاهششی و افزایشی وابسته است. در یک طراحی مناسب رآکتور، اثر کلی خلا باید باعث کاهش مقدار ضریب تکثیر موثر قلب رآکتور شود. در اثر ایجاد حباب فاکتورهای p و f عمدتاً بیشترین تاثیر را داشته و اینکه کدام یک اثر غالب را خواهد داشت بستگی به نقطه کار رآکتور در منحنی k -Pitch دارد. در محاسبات اولیه رآکتور رسم بر اینست که برای محاسبات پارامتریک، تاثیر گام شبکه (یا متشابهاً نسبت سوخت به کند کننده) بر ضریب تکثیر محاسبه و بررسی می‌گردد. نتیجه چنین محاسبه‌ای منحنی‌ای مشابه شکل (۲-۶) خواهد بود.

اینکه بوجود آمدن حباب چه تاثیری بر راکتیویته خواهد داشت، بسیار بستگی به نقطه کار رآکتور دارد. بعنوان مثال چنانچه نقطه کار در ناحیه‌ای در سمت راست قله منحنی در شکل گراف مذکور باشد، سامانه ناپایدار بوده و حضور هرگونه حباب ناشی از بخار که خود نتیجه یک پدیده گذرا بوده باشد منجر به افزایش ضریب تکثیر k و تشدید عوامل بوجود آورنده می‌گردد. از سوی دیگر چنانچه ناحیه کار در ناحیه سمت چپ قله یعنی ناحیه Under-moderated انتخاب شود، بروز هرگونه عامل گذرا که منجر به تولید حباب و بخار گردد، موجب کاهش ضریب تکثیر k و تعدیل عوامل بوجود آورنده می‌شود. طبعاً برای کار ایمن رآکتور لازمست فواصل میله‌های سوخت (گام شبکه) بنحوی اختیار گردد که نقطه کار رآکتور در منطقه سمت چپ یعنی ناحیه Under-moderated واقع گردد. ظرف خلا بکار برده شده در این آزمایش در شکل (۳-۶) دیده می‌شود که دارای حجمی معادل ۳۷۷ سانتیمتر مکعب است.

کسر حجمی سوخت، $\frac{V_F}{V_{Cell}}$



شکل (۶-۲) محاسبات پارامتریک اثر گام شبکه (نسبت سوخت به کندکننده) بر k در یک رآکتور نوعی.



شکل (۳-۶) نمایی از ظرف خلاء قابل استفاده در راکتور تحقیقاتی MTR نوعی برای انجام آزمایش اندازه گیری ضریب خلاء.

شرح آزمایش

- جهت اندازه گیری ضریب خلاء مراحل زیر در این آزمایش رعایت می شود:
- (۱) راکتور در قدرت پایین (حدود چند صد وات) در حالت بحرانی تنظیم و موقعیت مکانی همه میله های کنترل یادداشت می گردد.
- (۲) راکتور را کمی به حالت زیر بحرانی در آورده و ظرف خلاء^۱ را در موقعیت مورد نظر در وسط یا کنار قلب روی صفحه نگه دارنده قرار می دهیم.
- (۳) راکتور مجدداً بحرانی شده و محل جدید میله های کنترل یادداشت می گردد.
- (۴) از اختلاف موقعیت های میله های کنترل، میزان ارزش راکتیویته خلاء وارده محاسبه می گردد. معمولاً تغییرات برعهده میله کنترل تنظیمی محول میشود.
- (۵) با تقسیم ارزش بدست آمده بر حجم ظرف خلاء، ضریب راکتیویته خلاء بدست می آید.
- (۶) همین آزمایش در سطح قدرت های متفاوت تکرار می شود. آیا ضریب راکتیویته تغییر می کند؟ چرا؟
- (۷) برای یک سطح قدرت ثابت، موقعیت ظرف خلاء را تغییر می دهیم. آیا ضریب راکتیویته خلاء تغییر می کند؟ چرا؟

^۱ Void Tube

نکته ۱: برای واحد ρ ، و واحد α ، به مثال زیر توجه شود:

$$k=1.01$$

$$\begin{aligned} \rho = \frac{k-1}{k} &\approx 0.01 && \text{بدون دیمانسیون} \\ &= 1 && \% \frac{\Delta k}{k} \\ &= 1000 && \text{pcm} \\ &= \frac{0.01}{0.007} = 1.4 && \$ \end{aligned}$$

از این رو چنانچه راکتیویته فوق برای حجم 100 cm^3 بوجود آمده باشد، کفیسست هریک از مقادیر فوق بر ۱۰۰ تقسیم وبا واحد مربوطه به ازای 1 cm^3 نمایش داده شود مثلاً $\alpha_v = 10 \frac{\text{pcm}}{\text{cm}^3}$.

سوالات

- ۱) اختلاف ضریب راکتیویته خلاء را در محلهای زیر تحلیل کرده و توضیح دهید:
 - الف) در کنار قلب در داخل بازتابنده
 - ب) در محل تابش دهی واقع در وسط قلب
 - ج) در نزدیکی میله‌های کنترل (آیا وجود خلاء در نزدیکی میله‌های کنترل ارزش آن را به هم می‌زند)
- ۲) در رآکتورهای تحقیقاتی در چه مواقعی نقش ضریب راکتیویته خلاء مهم است؟
- ۳) از دو حادثه تی-ام-آی در آمریکا و چرنوبیل در اکرین کدام می‌تواند مرتبط با موضوع این آزمایش باشد و چرا؟
- ۴) چرا وقتی که غلظت سم بوران محلول در آب خنک کننده بیشتر از 2000 ppm است ضریب راکتیویته خلاء مثبت خواهد شد؟
- ۵) به نظر شما آیا اثر جذب نوترونی بدنه آلومینیومی ظرف خلاء در این آزمایش در نظر گرفته شده است؟
- ۶) این آزمایش معمولاً در قدرت‌های پایین انجام می‌شود. چه چیزی در قدرت بالا موجب تداخل با این آزمایش است؟
- ۷) اگر در یک آزمایش فرضی، میله‌های سوخت در قلب رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی بصورت یک در میان روی صفحه نگاه‌دارنده چیده شوند، انتظار چه تغییری در ضریب راکتیویته خلاء می‌رود؟ و چرا؟
- ۸) چنانچه کنترل خودکار سطح قدرت رآکتور برعهده میله کنترل تنظیمی بوده و ضمناً بتوان موقعیت آن را در قلب برحسب تابعی از زمان درج کرد. اکنون اگر، به هر دلیل، یک حباب بزرگ هوا از زیر صفحه نگاه‌دارنده سوخت شروع به بالا آمدن کرده و از میان قلب عبور نماید، در اینصورت تغییرات موقعیت میله کنترل چگونه تابعی خواهد بود؟
- ۹) باتوجه به نتایج آزمایش، نکات مثبت و منفی در کوچک و بزرگ بودن جعبه خلاء کدام‌ها هستند؟

۱۰) در یک رآکتور زیر بحرانی که ضریب تکثیر بسیار نزدیک واحد است، آیا موضوع این آزمایش می تواند اهمیتی داشته باشد؟ و چرا؟

۱۱) در طراحی رآکتورهای هسته‌ای سعی بر آنست تا رآکتور بطور ذاتی پایدار طراحی گردد. آیا ممکن است در طراحی یک رآکتور، ضریب راکتیویته خلاء مثبت طراحی گردد؟

۱۲) ابزار اندازه گیری ضریب خلاء ای را برای رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR طراحی کنید که دارای خصوصیات بهتری نسبت به ابزار فعلی در رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR باشد؟

۱۳) با توجه به کاربردهای فعلی رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR، چنانکه در موقعیتی از قلب رآکتور ضریب راکتیویته خلاء مثبت باشد، آیا خطر جدی محسوب می گردد. دلیل خود را بدترین حادثه فرضی را که می تواند با بروز خلاء در رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR رخ دهد شرح دهید؟

۱۴) به غیر از روش فعلی اندازه گیری ضریب راکتیویته خلاء که در رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR انجام می شود، آیا روش بهتر و موثرتر دیگری نیز وجود دارد؟ شرح دهید.

Niaze-Danesh.com

فصل هفتم: اندازه‌گیری کل ارزش میله کنترل به روش سقوط میله کنترل

در این فصل با موارد زیر آشنا می‌شوید

تعیین ارزش کل یک میله کنترل با استفاده از سقوط آن به قلب رآکتور

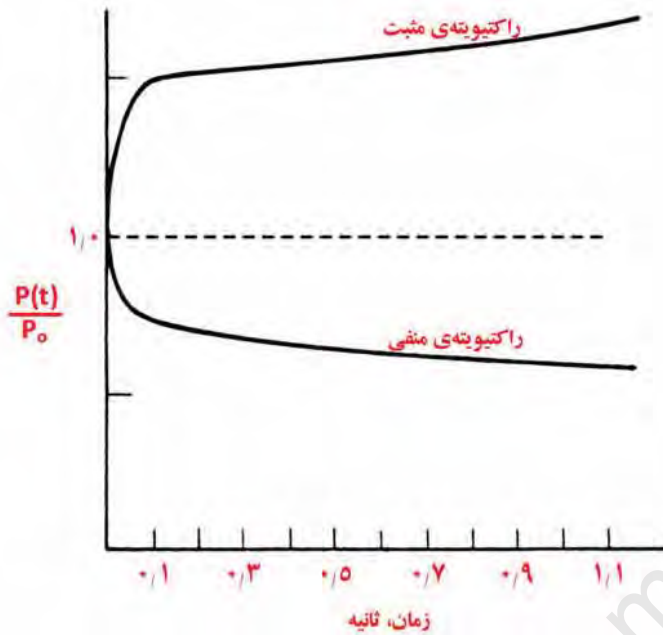
تئوری آزمایش

میله‌های کنترل به دو منظور زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند:

- ۱- هنگام به کار انداختن رآکتور، تغییر قدرت و خاموش کردن آن
 - ۲- جبران کردن راکتیویته منفی ناشی از مصرف سوخت، تولید سموم و سایر تغییرات کوتاه مدت و دراز مدت که در اثر کارکرد رآکتور در قلب رآکتور ایجاد می‌شود.
- هر تغییری در مکان میله‌ها سبب تغییر در راکتیویته سامانه قلب رآکتور می‌گردد. وقتی که $\rho = 0$ است پس‌پریود تغییر قدرت رآکتور بی‌نهایت بوده و رآکتور در حالت پایدار به کار خود ادامه می‌دهد. وقتی که تغییری در مکان میله‌ها صورت می‌گیرد شرایط پایدار برهم خورده و شرایط گذرا جایگزین می‌شود. در حالت گذرا نحوه تغییرات قدرت در شکل (۷-۱) نشان داده شده است و با تقریب خوبی می‌توان آن را به دو قسمت پرش آنی و قسمتی که دارای شیب ثابتی است (پریود پایدار) تقسیم‌بندی کرد.

پرش اولیه متأثر از نوترون‌های آنی و عمر متوسط آن بوده، در حالیکه تحول بعدی رآکتور، که بلافاصله در امتداد پرش اولیه حاصل می‌گردد، متأثر از حضور نوترون‌های تاخیری و به میدان آمدن اثر آنهاست. در میان نوترون‌های تاخیری، اثر غالب با اولین گروه نوترون‌های تاخیری که دارای بیشترین نیمه عمر است تعیین می‌گردد. پریود پایدار رآکتور نیز با استفاده از همین گروه تعریف می‌گردد.

در این آزمایش جهت تعیین ارزش کل یک میله کنترل می‌توان از تئوری "پرش آنی" در سینتیک رآکتور سود جست. حسن این آزمایش نسبت به آزمایش کالیبراسیون میله کنترل به طریق Inhour، سریع بودن آنست. اما در عوض ارزش کل میله یکجا تعیین شده و آزمایش‌گر اطلاعاتی از جزئیات ارزش هر قسمت را نخواهد داشت. در این روش، میله مورد آزمایش کاملاً (۱۰۰٪) از قلب خارج و با سایر میله‌های کنترل رآکتور بحرانی می‌گردد. با سقوط ناگهانی میله کنترل و وارد آمدن راکتیویته منفی حاصل از آن به قلب، قدرت رآکتور رو به کاهش خواهد گذارد. اما همانطور که ذکر شد، این کاهش شامل دو مرحله قابل تمیز از یکدیگر است. بدین معنی که ابتدا یک کاهش سریع و آنی در قدرت مشاهده خواهد شد که عمدتاً متأثر از اثر نوترون‌های آنی بوده و سپس تغییرات آرام‌تر بعدی که ناشی از عملکرد اثر نوترون‌های تاخیری می‌باشد ظاهر خواهد شد.



شکل (۷-۱) نحوه تغییرات قدرت رآکتور در اثر اعمال راکتیویته پله.

تئوری تقریب پرش آنی^۱

با در نظر گرفتن فرض‌های ارائه شده در دستورالعمل آورده شده در فصل چهار در مورد روش Inhour می‌توان رفتار

تابع زمان قدرت رآکتور و جمعیت هسته‌های مولد نوترون تاخیری را به شکل رابطه (۷-۱) نشان داد:

$$\begin{cases} \frac{dP(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} P(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \\ \frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} P(t) - \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \end{cases} \quad i=1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (7-1)$$

$C_i(t)$: دانسیته هسته‌های مولد نوترون تاخیری^۲ گروه i در هر لحظه از زمان

λ_i : ثابت واپاشی هسته‌های مولد نوترون تاخیری گروه i

$P(t)$: قدرت رآکتور در هر لحظه از زمان

Λ : $\left(\frac{\ell}{k}\right)$ متوسط زمان تولید نسل نوترون^۳

ℓ : عمر متوسط نوترون‌های آنی

β : کسر نوترون‌های تاخیری

ρ : راکتیویته، که در حالت کلی می‌تواند تابع زمان باشد

¹ Prompt Jump Approximation

² Precursor

³ Neutron Mean Generation Time

معادلات (۷-۱) تشکیل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل مرتبه اول را می‌دهند. شکل (۷-۲) نشان‌دهنده رفتار تابع زمان قدرت رآکتور در لحظات قبل و بعد از سقوط یکی از میله‌های کنترل ایمنی در رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی می‌باشد که توسط سامانه جمع آوری اطلاعات رآکتور اندازه‌گیری شده است. چنانکه از لحاظ زمانی این تغییرات را به دو قسمت قبل و بعد از سقوط میله کنترل تقسیم‌بندی کنیم خواهیم داشت:

قبل از سقوط میله کنترل :

$$\left. \frac{dC(t)}{dt} \right|_{t^-} = 0 \quad (7-2)$$

$$-P_0\beta = -\ell \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (7-3)$$

بعد از سقوط میله کنترل:

$$\left. \frac{dC(t)}{dt} \right|_{t^+} \approx 0 \quad (7-4)$$

$$P_1(\rho_0 - \beta) = -\ell \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (7-5)$$

در لحظه سقوط میله کنترل، جمعیت نوترون‌های تاخیری نمی‌تواند به صورت آنی تغییر کند. از این رو دو طرف تساوی‌های فوق را می‌توان با تقریب خوبی برابر هم قرار داد و بدست می‌آید :

$$P_1(\rho_0 - \beta) = -P_1\beta \Rightarrow -\left| \frac{\rho_0}{\beta} \right| = \frac{P_0}{P_1} - 1 \quad (7-6)$$

از این رو با در نظر گرفتن P_0 بعنوان قدرت رآکتور قبل از سقوط میله ایمنی و P_1 قدرت شبه پایدار (Quasi-Stable) رآکتور بلافاصله پس از سقوط میله کنترل، می‌توان کل راکتیویته اعمالی به قلب رآکتور را یکجا بر حسب دلار با استفاده از رابطه (۷-۶) اندازه‌گیری کرد.

روش انجام آزمایش

رآکتور را در قدرت ثابت P_0 تنظیم میکنیم، در حالی که میله کنترل مورد نظر در بالاترین موقعیت خود خارج از قلب قرار داشته باشد. معمولاً این کار را در سطوح پایین قدرت و زیر ۱ kW انجام می‌دهیم. سپس به طور ناگهانی میله کنترل را رها میکنیم (جریان الکتریکی سیم پیچ نگه‌دارنده را قطع میکنیم). چنانچه ارزش آنرا با $\delta\rho$ نشان دهیم، قدرت رآکتور بعد از چند نسل نوترون‌های آنی (یعنی عملاً بلافاصله) به مقدار P_1 نزول میکند از روی ثبات^۱ روی کنسول رآکتور، توسط اثری که قلم ثبات روی کاغذ می‌گذارد می‌توان P_1 را مشخص نمود. از این رو نسبت $\frac{P_1}{P_0}$ را تعیین نموده و با استفاده از نتایج مندرج در فوق راکتیویته ناشی از حضور میله کنترل در قلب یعنی ارزش کل میله را بدست آورد. قابل ذکر است که به کمک سامانه

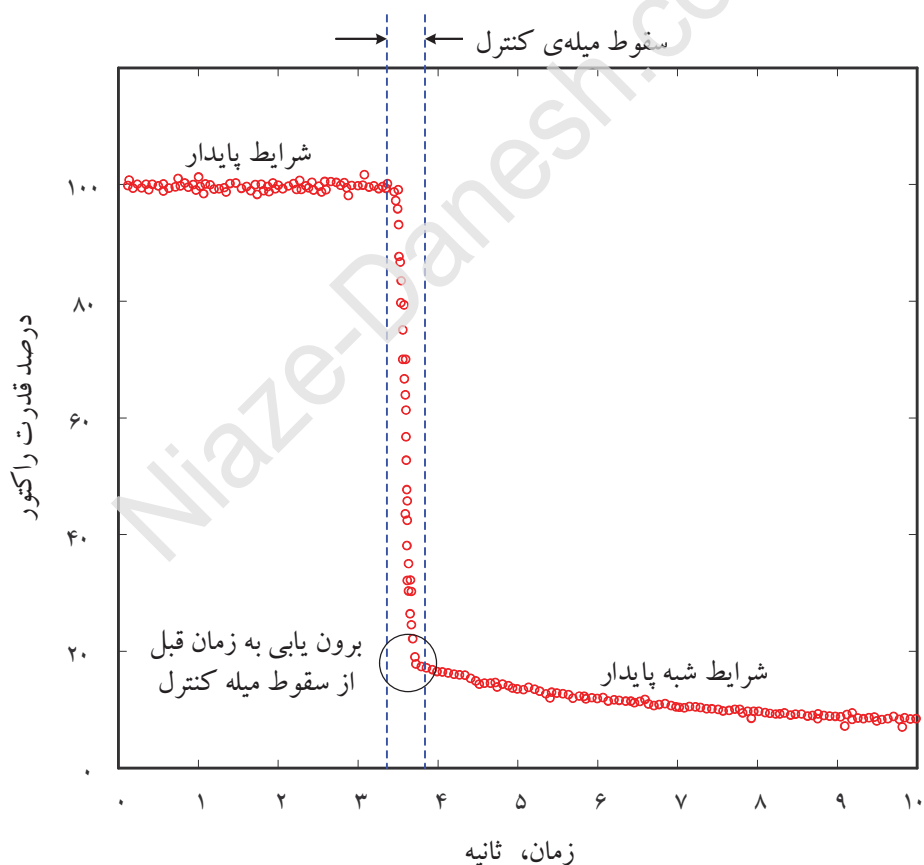
کسب اطلاعات در زمان حقیقی میتوان همین رویه را بطور موثرتری و با استفاده از نتایج ثبت شده در کامپیوتر انجام داد. راهنمای استفاده از نرم افزار مزبور در پایان این آزمایش آمده است.

نکته ۱: قدرت رآکتور قبل از سقوط به میزانی انتخاب می شود که قلم ثبات در منتهی الیه برد خود روی کاغذ ثبات قرار گرفته باشد.

نکته ۲: خواندن مقدار P_1 کار چندان ساده ای نیست. در نتیجه این روش از دقت کمتری نسبت به روش Inhour برخوردار است.

نکته ۳: حسن این روش، علاوه بر سریع بودن کار، تعیین ارزش میله، یکجا بر حسب دلار می باشد.

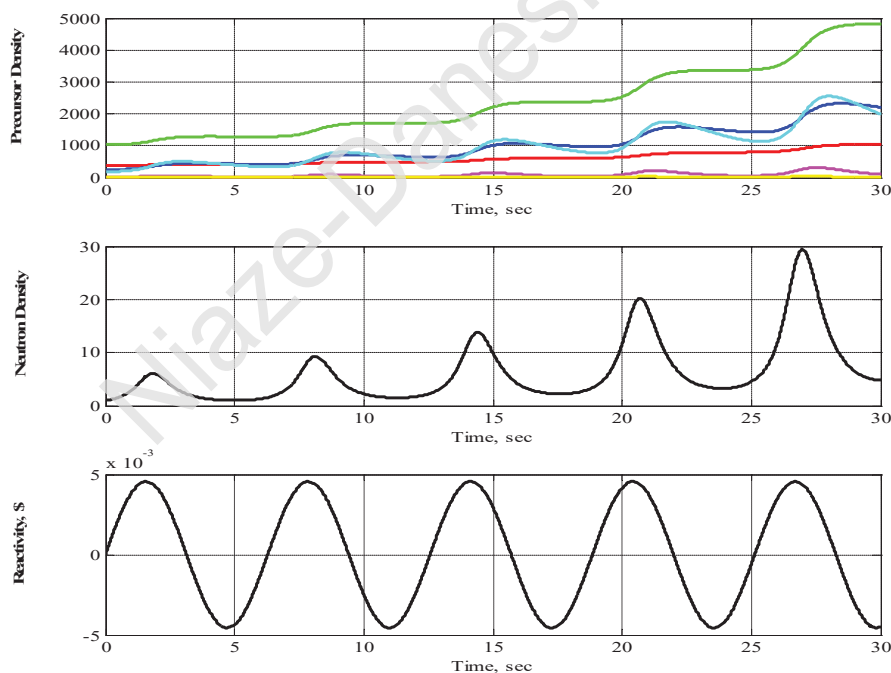
نکته ۴: در سال های اخیر با وجود سامانه کسب اطلاعات کامپیوتری، می توان این آزمایش را با نمونه گیری سریع از مقادیر قدرت و با دقت بیشتری انجام داد.



شکل (۷-۲) رفتار تابع زمان قدرت رآکتور در لحظات قبل و بعد از سقوط یکی از میله های کنترل ایمنی.

سوالات

- ۱) آیا از لحاظ اصولی، چنین آزمایشی را برای بیرون کشیدن یک میله کنترل از قلب نیز می توان انجام داد؟ در این صورت چه شرایطی برای انجام آن باید رعایت گردد؟
- ۲) از نظر عملی، چه مشکلاتی برای این آزمایش هنگامی که قرار باشد میله کنترل ناگهان از قلب خارج شود وجود دارد؟ مخاطراتی که وجود دارد کدام است؟
- ۳) با توجه به نتایج قبلی ارزش میله کنترل که از روش Inhour بدست آمده است، آیا نتیجه حاضر مطابقت دارد؟
- ۴) بین روش حاضر و روش استفاده از رابطه Inhour کدام یک دقت بیشتری داشته و چرا؟
- ۵) چنانچه قرار باشد مجموع ارزش میله های کنترل در رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR یکجا اندازه گیری گردد آیا روش حاضر قابل اجرا است؟
- ۶) اگر یک راکتیویته سینوسی برابر $\rho_0 \sin \omega t$ به قلب رآکتور تزریق گردد، با استفاده معادلات سینتیک نقطه ای رابطه ای برای تغییرات قدرت رآکتور با تقریب شش گروهی در حوزه زمان بنویسید.
- ۷) شکل زیر نشان دهنده تغییرات قدرت رآکتور و جمعیت هسته های مولد نوترون های تاخیری به ازای تزریق یک راکتیویته سینوسی برابر $\rho(t) = 0.7 \sin t$ می باشد. چرا قدرت رآکتور دارای شکل کامل سینوسی نمی باشد و دارای اعوجاج است؟



شکل (۷-۳) رفتار تابع زمان قدرت رآکتور به ازای تزریق راکتیویته ی سینوسی.

فصل هشتم: اندازه‌گیری نقشه شارنوترون در قلب رآکتور

در این فصل با موارد زیر آشنا می‌شوید

آشنایی با نحوه اندازه‌گیری شار نوترون در قلب رآکتور MTR نوعی و اطراف آن

مقدمه

اصولاً یکی از روش‌های اندازه‌گیری قدرت در رآکتورهای با قدرت کم یا اصطلاحاً ZPR استفاده از نقشه شارنوترونی و تعیین فضای زیر سطح سه بعدی شار می‌باشد. به عبارت دیگر:

$$P = \int_{\text{core}} p(r) d^3r \quad (8-1) \quad \text{قدرت کل}$$

$$p(r) = E_f \bar{\Sigma}_f \varphi(r) \quad (8-2) \quad \text{چگالی قدرت}$$

از این رو چنانچه نوع سوخت در کل قلب یکسان باشد:

$$P = E_f \bar{\Sigma}_f \int_{\text{core}} \varphi(r) d^3r \quad (8-3)$$

بنابراین اطلاع از چگونگی توزیع شارنوترونی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بعلاوه، اطلاع از توزیع شارنوترونی برای اطلاع از میزان واکنش نیز ضروری می‌باشد. این بویژه برای تخمین تولید ایزوتوپ‌های مختلف در داخل نمونه‌های تحت بمباران نوترون مورد نیاز مبرم می‌باشد. بنابراین اطلاع از توزیع شار در فضای سه بعدی قلب، بویژه در محل‌های تابش دهی، مورد نیاز کاربران رآکتور بوده و هدف از این آزمایش چگونگی اندازه‌گیری آن است. قابل ذکر است که برای تعیین فاکتور قله سازی¹ نیز نیاز به دانستن ماگزیمم شارنوترونی و متوسط آن می‌باشد که خود نیازمند دانستن نقشه شار نوترونی است.

تئوری آزمایش

روش مورد بهره‌برداری در رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی روش آنالیز به روش فعالسازی نوترونی² می‌باشد. این کار در سه مرحله مستقل از هم صورت می‌گیرد:

مرحله ۱- اندازه‌گیری توزیع نسبی شار در موقعیت‌های مورد نیاز.

مرحله ۲- اندازه‌گیری مطلق شار در یک نقطه مشخص از موقعیت‌های مذکور.

مرحله ۳- نرمالیزاسیون توزیع نسبی شار با اطلاع از شار مطلق مورد اندازه‌گیری قرار گرفته در مرحله ۲.

در زیر به شرح جزییات هر یک پرداخته می‌شود:

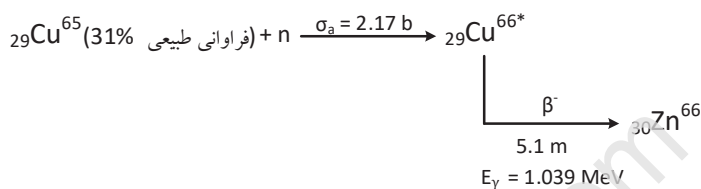
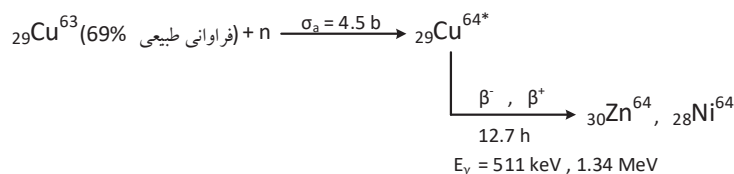
مرحله ۱- اندازه‌گیری توزیع نسبی شار

در این مرحله معمولاً از فعالسازی سیم مسی استفاده می‌گردد. فرض بر اینست که سیم مسی در تمام طول خود یکنواخت بوده و جنس آن در سر تا سر طول سیم یکسان می‌باشد. معمولاً از سیم مسی برای ثبت تغییرات شار نوترونی در امتداد محور قایم

1 - Peaking Factor

2 - Neutron Activation Analysis

استفاده شده است. از این رو طول آن در حدود ۷۵ سانتیمتر و به اندازه یک بسته سوخت رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی می باشد. واکنش های فعال سازی نوترونی بشرح زیر اتفاق می افتد:

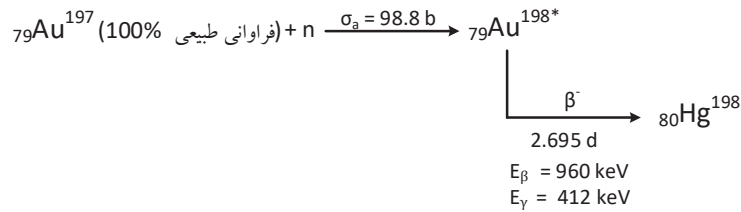


معمولاً با استفاده از آشکارساز تک کانالی، یکی از فله های گاما انتخاب و شمارش آن معیاری از میزان اکتیو شدن مس می گردد. از این رو شار نوترونی حاکم در آن منطقه است. با اندازه گیری میزان اکتیویته هر بخش کوچکی از سیم مسی که به زیر آشکارساز می رود شار نوترونی نسبی برای آن نقطه بدست می آید. با رسم این مقادیر بر حسب طول سیم و با در نظر داشت اینکه هر قطعه از طول سیم در چه ارتفاعی از قلب بوده است به سادگی شکل نسبی تغییرات شار در امتداد سیم (یعنی در امتداد محور عمودی قلب) بدست خواهد آمد. قابل ذکر است که چون شمارش نقاط انتهایی سیم نسبت به نقاط ابتدایی آن دارای تاخیر زمانی می باشد. از این رو لازمست شمارش ثبت شده به نسبت $e^{-\lambda t_d}$ تصحیح گردند. که در آن t_d مدت زمان سپری شده نسبت به اولین نقطه است و λ ضریب تجزیه عنصر اکتیو شده، بر حسب مورد، می باشد.

نوع دیگری از سنجش نسبی نیز اخیراً استقرار یافته است و آن استفاده از آشکارساز مینیاتوری نوترون^۱ می باشد. در این روش یک آشکارساز بسیار کوچک، که معمولاً از نوع اتاقک شکافت است، مورد استفاده واقع شده و سیگنال خود را در زمان حقیقی در اختیار می گذارد. جابجایی این آشکارساز در هر امتداد خاص، مثلاً امتداد عمودی، سیگنالی متناسب با شار نوترونی از خود ایجاد می کند. با ثبت شدت سیگنال بر حسب تابعی از موقعیت، می توان شکل نسبی شار را در آن امتداد خاص بدست آورد. در این روش از محل دقیق آشکارساز باید کسب اطمینان نمود. مزیت این روش نسبت به روش سیم مسی که یک روش اندازه گیری برون خط است، عدم نیاز به آشکارساز تک-کانالی می باشد و شکل نسبی شار نوترونی بلافاصله تعیین می گردد.

مرحله ۲- اندازه گیری مطلق شار در یک نقطه خاص

در این مرحله، با استفاده از یک پولک طلا و استقرار آن در کنار یکی از نقاط سیم مسی به بمباران آن مبادرت کرده و پس از طی مدت زمان مشخصی از رآکتور ترخیص و به آزمایشگاه اندازه گیری انتقال داده می شود. واکنش نوترون های حرارتی با طلا مطابق زنجیره زیر می باشد (شرح جزییات در پیوست آمده است):



میزان اکتیویته پولک متناسب با شار نوترونی در محل پولک است که اینبار قرار است مقدار مطلق آن بدست آید. بنابراین نیاز به دانستن اکتیویته واقعی پولک می باشد که لازمست با یک آشکارساز دارای راندمان بالا اندازه گیری گردد. چنانچه پولک به اندازه ی کافی نازک باشد (تا اثر خودحفاظی شار نوترون در درون پولک قابل نظر باشد) از رابطه زیر می توان استفاده نمود:

$$A(\text{d.p.s}) = N\sigma_a \bar{\phi} \cdot (1 - e^{-\lambda t_d}) e^{-\lambda t_r} \quad (1-4)$$

A: شمارش واقعی در زیر آشکارساز

N: تعداد اتم های موجود در پولک

σ_a : سطح مقطع جذب میکروسکوپی

$\bar{\phi}$: شار نوترونی متوسط در محل نمونه

t_r : زمان تابش دهی (معمولاً یک ساعت در قدرت 1kw)

t_d : زمان کاهش نمونه از موقعی که نمونه از قلب ترخیص تا:

زمانی که زیر آشکارساز برای شمارش می رود

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{\frac{1}{2}}}$$

ضریب تجزیه عنصر اکتیو شده

لازم به توضیح است که برای داشتن شمارش واقعی، لازمست شمارشی را که آشکارساز می دهد هم از لحاظ هندسی و هم از لحاظ راندمان آشکارساز تصحیح نماییم. به عبارت دیگر شمارشاتی که به آشکارساز می رسد به نسبت $\frac{\Omega}{4\pi}$ ، که Ω زاویه فضایی نمونه زیر آشکارساز است، کمتر می شود. از این رو لازمست در عکس این کسر ضرب گردد. در پیوست، مطالب مفیدی در همین ارتباط آورده شده است.

در محاسبه N، تعداد اتم های طلای موجود در پولک باید جرم آن m بطور دقیق با ترازو قبلاً اندازه گیری شده و سپس طبق رابطه

$$N = \frac{mN_A}{M}$$

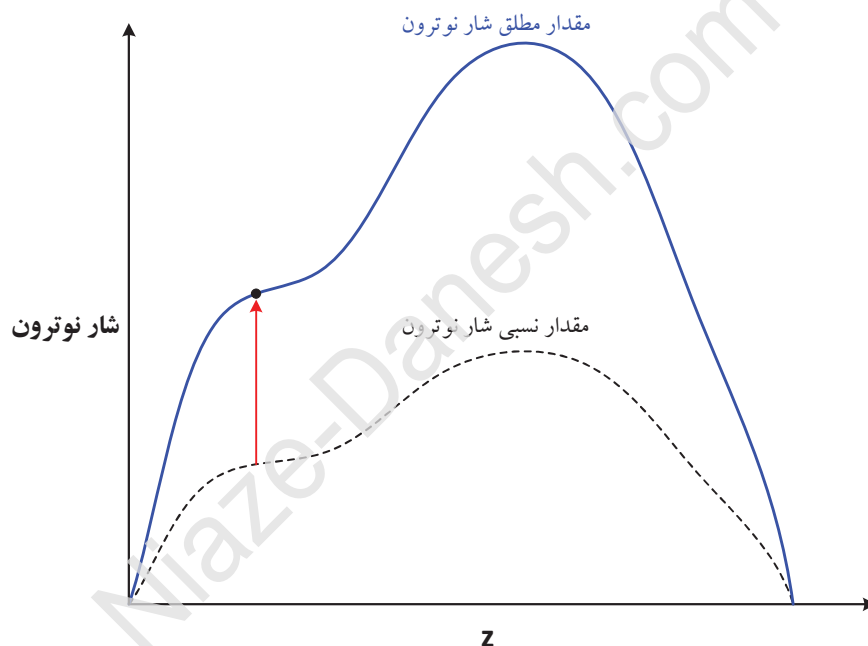
تعداد اتم ها را بدست آورده در فرمول گذاشت. فرمول فوق بطور دقیق $\bar{\phi}$ یعنی شار متوسط در محل نمونه را

بدست می دهد.

نکته ۱: عملاً در آزمایش از دو پولک طلا، یکی لخت و دیگری با پوشش Cd استفاده می‌شود. پولک طلای لخت در اثر هر دو گروه نوترون‌های حرارتی و فوق حرارتی اکتیو می‌شود در حالیکه پولک با پوشش Cd فقط با نوترون‌های فوق حرارتی اکتیو می‌گردد. از این رو مقدار A در فرمول فوق، حاصل تفریق این دو اکتیویته است که طبعاً ناشی از اکتیواسیون فقط با نوترون‌های حرارتی می‌باشد.

مرحله ۳- نرمالیزاسیون و توزیع شار مطلق

اکنون با در دست داشتن توزیع نسبی و شار مطلق در یکی از نقاط، مطابق شکل (۸-۱)، می‌توان اقدام به نرمالیزاسیون کرده و توزیع شار مطلق را در امتداد سیم مسی بدست آورد. بعلاوه این کار را می‌توان برای هر دو گروه نوترون‌های حرارتی و فوق حرارتی با در دست داشتن اکتیویته دو نوع پولک طلای یاد شده، بدست آورد.



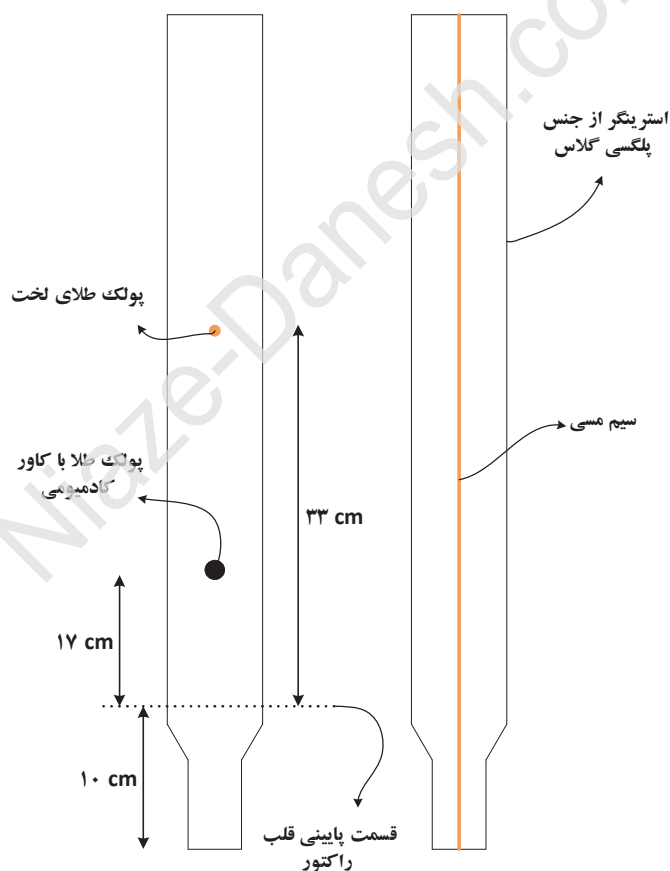
شکل (۸-۱) نحوه تعیین توزیع شار مطلق.

شرح آزمایش

برای استقرار سیم مسی در محل مورد نظر، لازمست آنرا روی یک ورقه نازک پلی اتیلن موسوم به استرینگر^۱ مطابق شکل (۸-۲) نصب کرد. این ورقه در قسمت فوقانی حالت صلیب گونه دارد بطوریکه لبه‌های آن روی بسته سوخت یا جعبه تابش دهی مورد نظر قرار می‌گیرد. قبلاً باید آزمایش شود که ابتدا و انتهای سیم مسی در چه ارتفاعی از قلب بوده و بویژه وضعیت نسبی آن در قیاس با قسمت اکتیو هر صفحه سوخت چگونه است.

¹ Stringer

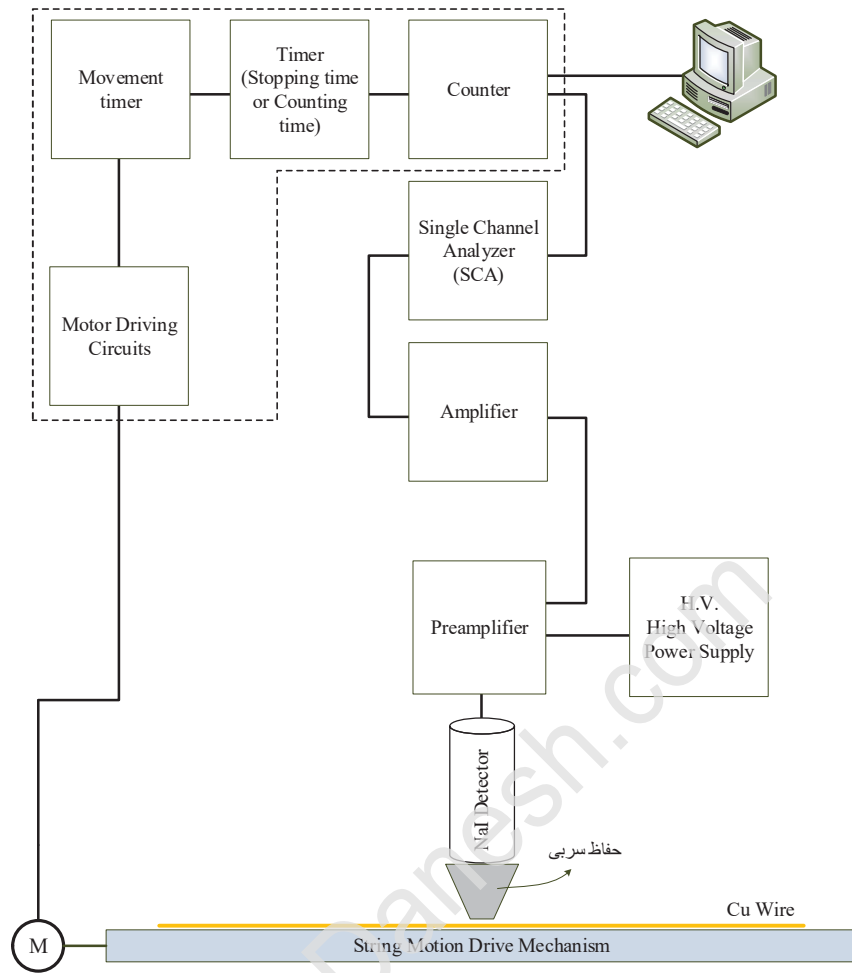
پولک‌های طلا را نیز در یک ارتفاع مشخص روی استرینگر کنار سیم مسی نصب مینماییم بطوری که کسب اطمینان شود که بخشی از سیم مسی که بعداً زیر آشکارساز می‌رود دقیقاً همان بخش باشد که در کنار پولک‌های طلا قرار گرفته است. پس از اکتیواسیون سیم مسی، آن را به زیر آشکارساز تک-کانالی منتقل می‌نماییم. باید دقت گردد که هر بخش از سیم مسی واپاشی خود را در داخل کلیماتور مخروطی شکل انجام داده بطوریکه، مطابق شکل‌های (۳-۸) و (۴-۸)، در مقطع بزرگ‌تر کلیماتور دهانه آشکارساز تک کانالی واقع باشد. مکانیزم خاصی بطور اتوماتیک هر بخش از سیم مسی را به نوبت زیر آشکارساز برده و شمارش برای مدت مشخصی انجام می‌گردد. در پایان، اعداد حاصله، به جز برای اولین نقطه، به نسبت ضریب $e^{-\lambda t_d}$ تصحیح می‌گردد. در شکل (۳-۸) طرح‌واره‌ی سامانه وایر اسکنر^۱ سیم مسی در رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی آورده شده است. چنانچه از MND استفاده شود مقادیر شدت جریان قرایت شده برای هر ارتفاعی که از مرجع صفحه نگه‌دارنده قلب^۲ ثابت می‌شود درج گردیده و در انتها آنها را نسبت به بزرگ‌ترین عددی که در جدول وجود دارد نرمالیزه می‌کنیم. مشخصات هندسی یک بسته سوخت استاندارد با ذکر جزئیات صفحات سوخت و قسمت اکتیو آن که در یک رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی استفاده می‌شود در شکل (۶-۴) آمده است.



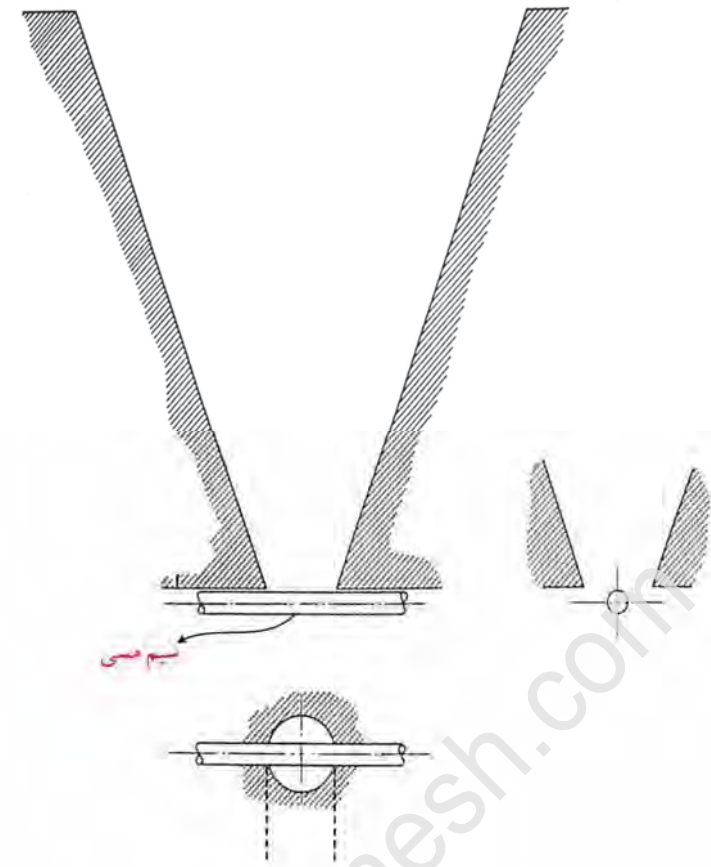
شکل (۲-۸) نمای نوار نازک پلی اتیلن و سیم مسی نصب شده روی آن.

¹ Wire Scanner

² Grid plate



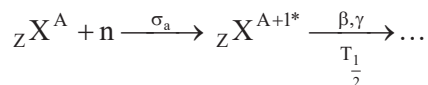
شکل (۸-۳) سامانه وایر اسکتر سیم مسی در رآکتور تحقیقاتی نوعی MTR.



شکل (۸-۴) موقعیت نسبی بخشی از سیم مسی حین شمارش در مقابل دهانه آشکار ساز تک-کانالی.

پیوست: نحوه محاسبه اکتیویته پولک طلا

با استفاده از روش NAA مبادرت به بمباران نوترونی پولک طلا در قلب رآکتور کرده و سپس با اندازه گیری اکتیویته حاصل از ایزوتوپ جدید می توان شار نوترونی را تعیین کرد. در زیر، روش کلی محاسبه اکتیویته برای یک عنصر دلخواه ZX^A انجام گرفته و از نتایج حاصله می توان یک مجهول (متوسط شار نوترون در مدت تابش دهی) را استخراج کرد. در خصوص آزمایش حاضر، مجهول مورد نظر، شار نوترونی می باشد.



N_1 = تعداد هسته های نمونه اصلی (ZX^A) در هر لحظه از زمان

N_2 = تعداد هسته های ایزوتوپ اکتیو (ZX^{A+1*}) در هر لحظه از زمان

$N_1 \sigma_a \phi_{th}$ = تعداد جذب های صورت گرفته در نمونه اصلی در واحد زمان که متناظراً برابر است با

"تعداد هسته های تولید شده از ایزوتوپ رادیو اکتیو در واحد زمان"

λN_2 = تعداد واپاشی های ایزوتوپ اکتیو شده در واحد زمان ($\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$)

$N_1 = \frac{mN_A}{M}$: تعداد اتم های موجود در نمونه اصلی

m : جرم نمونه اصلی (پولک طلا)

M : عدد جرمی ایزوتوپ نمونه اصلی

N_A : عدد آووگادرو ($6.02214199 \times 10^{23}$)

t_i : مدت زمان تابش دهی

t_d : مدت زمان بین پایان تابش دهی نمونه و شروع پروسه شمارش

t_c : مدت زمان شمارش نمونه اکتیو شده

با فرض آنکه تغییرات N_1 نسبت به زمان ناچیز باشد، از این رو خواهیم داشت :

$$\frac{dN_1}{dt} \cong 0$$

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1 \sigma_a \phi_{th} - \lambda_2 N_2$$

پس N_1 در رابطه فوق یک ثابت است، چنانکه شار نوترون را نیز نسبت به زمان ثابت فرض کنیم به راحتی معادله دیفرانسیل

حاصل حل خواهد شد:

$$N_1 \sigma_a \phi_{th} e^{\lambda_2 t} = N_2 e^{+\lambda_2 t}$$

$$N_2(t) e^{\lambda_2 t_i} = N_1 \sigma_a \phi_{th} \int_0^{t_i} e^{\lambda_2 t} dt$$

$$N_2(t) e^{\lambda_2 t_i} = N_1 \sigma_a \phi_{th} \frac{1}{\lambda_2} (e^{\lambda_2 t_i} - 1)$$

از این رو اکتیویته نمونه تابش دیده شده درست در لحظه پایان تابش دهی برابر است با:

$$A(t_i) = \lambda_2 N_2(t) = N_1 \sigma^1 \phi_{th} (1 - e^{-\lambda_2 t_i})$$

نمونه حاصل در مدت t_d واپاشی می‌کند. از این رو اکتیویته در زمان $t_i + t_d$ برابر خواهد بود با:

$$A(t_i + t_d) = A(t_i) e^{-\lambda_2 t_d}$$

از لحظه‌ای که عملیات شمارش آغاز می‌شود اکتیویته تابع زمان بوده و کاهشی است و برابر با:

$$A(t_i + t_d + t) = A(t_i + t_d) e^{-\lambda_2 t}$$

برای آنکه مجموع ذرات گسیل شده از چشمه را محاسبه کنیم باید در بازه زمانی شمارش نمونه اکتیو شده از رابطه فوق انتگرال گرفته شود:

کل ذرات گسیل شده از نمونه در مدت شمارش

$$= \int_0^{t_c} A(t_i + t_d + t) dt = A(t_i + t_d) \int_0^{t_c} e^{-\lambda_2 t} dt = A(t_i + t_d) \frac{1}{\lambda_2} (e^{-\lambda_2 t_c} - 1)$$

و با جایگزینی مقدار $A(t_i + t_d)$ از روابط فوق بدست می‌آید:

$$= N_1 \sigma^1 \phi_{th} (1 - e^{-\lambda_2 t_i}) e^{-\lambda_2 t_d} \times \frac{1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t_c})$$

قابل ذکر است که تمامی ذراتی که از نمونه اکتیو شده گسیل می‌شوند با حجم حساس آشکارساز برخورد نمی‌کنند، همچنین همه ذراتی که برخورد می‌کنند نیز واکنش انجام نمی‌دهند. از این رو سامانه آشکارسازی کمیتی به نام راندمان مطلق که خود حاصل ضرب دو کمیت دیگر به نام‌های راندمان ذاتی و هندسی است تعریف می‌گردد. چنان‌که این کمیت را نیز در رابطه آخر تاثیر دهیم بدست می‌آید:

$$C = \eta \times N_1 \sigma^1 \phi_{th} (1 - e^{-\lambda_2 t_i}) e^{-\lambda_2 t_d} \times \frac{1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t_c})$$

در این رابطه C تعداد کل شمارشات آشکارساز است. قابل ذکر است با توجه به آنکه تعداد شمارشات آشکارساز از تعداد ذرات گسیل شده از نمونه کمتر است پس کمیت راندمان، η ، عددی بین صفر و یک می‌باشد. در انتهای این قسمت در مورد راندمان آشکارسازی توضیحات بیشتری آورده شده است. چنان‌که رابطه نهایی را بر اساس شار نوترون مرتب کنیم خواهیم داشت:

$$\phi_{th} = \frac{C \lambda_2 e^{\lambda_2 t_d}}{\eta \times N_1 \sigma^1 (1 - e^{-\lambda_2 t_i}) (1 - e^{-\lambda_2 t_c})}$$

رابطه فوق یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول با طرف ثانی است که پاسخ آن بصورت زیر است:

$$\lambda N_2 := A \text{ (واقعی d.p.s)} = N_1 \sigma_a \bar{\phi} (1 - e^{-\lambda t})$$

t در رابطه فوق مدت زمان نیست که نمونه در رآکتور در معرض بمباران نوترونی واقع است. به محض آنکه رآکتور خاموش شود یا نمونه از رآکتور ترخیص گردد، عنصر اکتیو بطریق معمول، اکتیویته آن بصورت نمایی کاهش خواهد یافت. از این رو رابطه نهایی به شکل زیر خواهد بود:

$$A(d.p.s) = N_1 \sigma_a \bar{\phi} (1 - e^{-\lambda t_a}) e^{-\lambda t_d}$$

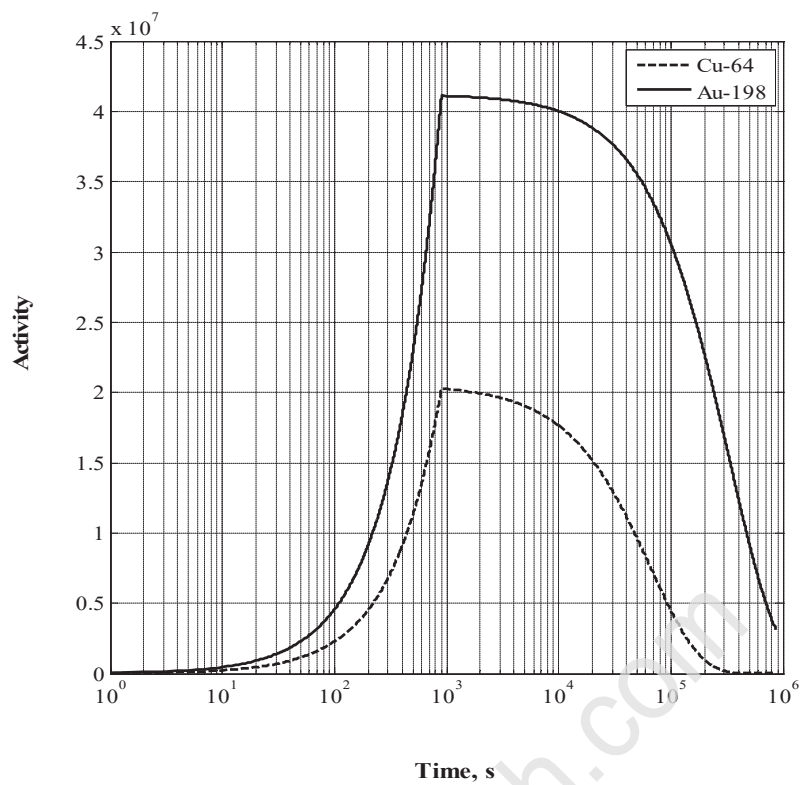
t_a = طول مدت تابش دهی در رآکتور

t_d = طول مدت واپاشی از لحظه ترخیص از رآکتور

```

clc
clear all
LamndaCu=log(2)/(12.7*3600);% Constant parameters
LamndaAu=log(2)/(2.695*24*3600);
XsCu=4.5E-24;%Cross sections
XsAu=98.8E-24;
Flux=1E13*(80E3/5E6); %80 kW reactor power
ti=0:1:15*60;
mCu=0.0318;%Mass of the activation foils
mAu=0.0318;
NAu=mAu*6.02214E24/197;% Number of atoms in the sample
NCu=mCu*6.02214E24/((0.69*63)+(0.31*65));
ACui=0.69.*NCu.*XsCu.*Flux.*(1-exp(-LamndaCu.*ti));%Activity of the activation foils
AAui=NAu.*XsAu.*Flux.*(1-exp(-LamndaAu.*ti));
tc=100:100:10*24*3600;%Cooling Time
ACuc=ACui(length(ACui)).*(exp(-LamndaCu.*tc));% Activity during cooling time
AAuc=AAui(length(AAui)).*(exp(-LamndaAu.*tc));
t=cat(2,ti,tc+ti(length(ti)));
AAu=cat(2,AAui,AAuc);
ACu=cat(2,ACui,ACuc);
semilogx(t,ACu,'-k',t,AAu,'-k','LineWidth',2);
legend('Cu-64','Au-198');
grid on
xlabel('Time, s');
ylabel('Activity') ;

```



شکل (۸-۵) تغییرات اکتیویته ی سیم مسی و پولک طلا هنگام تابش دهی در قلب رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی و بعد از آن.

برخی از واکنش‌های مناسب برای اندازه‌گیری‌های مربوط به شار نوترون به همراه پارامترهای مربوطه

ایزوتوپ‌های مناسب به عنوان آشکارسازهای با انرژی آستانه برای نوترون

| مواد | واکنش مورد نظر | فراوانی | | انرژی گاما (MeV) | فراوانی گاما (%) | آستانه |
|------|--|--------------|-------------|--------------------|------------------|--------|
| | | ایزوتوپی (%) | نیمه عمر | | | |
| F | $^{19}\text{Fe}(n,2n)^{18}\text{F}$ | ۱۰۰٫۰ | ۱۰۹٫۷ دقیقه | $^{+}۰٫۵۱۱$ | $^{۰}۱۹۴$ | ۱۱٫۶ |
| Mg | $^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$ | ۷۸٫۷ | ۱۵٫۰ ساعت | ۱٫۳۶۸ | ۱۰۰ | ۶٫۰ |
| Al | $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ | ۱۰۰٫۰ | ۱۵٫۰ ساعت | ۱٫۳۶۸ | ۱۰۰ | ۴٫۹ |
| Al | $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$ | ۱۰۰٫۰ | ۹٫۴۶ دقیقه | ۱٫۰۱-۰٫۸۴ | ۱۰۰ | ۳٫۸ |
| Fe | $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ | ۹۱٫۷ | ۲٫۵۶ ساعت | ۰٫۸۴ | ۹۹ | ۴٫۹ |
| Co | $^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn}$ | ۱۰۰٫۰ | ۲٫۵۶ ساعت | ۰٫۸۴ | ۹۹ | ۵٫۲ |
| Ni | $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$ | ۶۷٫۹ | ۳۶٫۰ ساعت | ۱٫۳۷ | ۸۶ | ۱۳٫۰ |
| Ni | $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ | ۶۷٫۹ | ۷۱٫۶ روز | ۰٫۸۱ | ۹۹ | ۱٫۹ |
| Cu | $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$ | ۶۹٫۱ | ۹٫۸ دقیقه | $^{+}۰٫۵۱۱$ | $^{۰}۱۹۵$ | ۱۱٫۹ |
| Cu | $^{65}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$ | ۳۰٫۹ | ۱۲٫۷ ساعت | $^{+}۰٫۵۱۱$ | $^{۰}۳۷٫۸$ | ۱۱٫۹ |
| Zn | $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$ | ۴۸٫۸ | ۱۲٫۷ ساعت | $^{+}۰٫۵۱۱$ | $^{۰}۳۷٫۸$ | ۲٫۰ |
| In | $^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$ | ۹۵٫۷ | ۴٫۵۰ ساعت | ۰٫۳۳۵ | ۴۸ | ۰٫۵ |
| I | $^{127}\text{I}(n,2n)^{126}\text{I}$ | ۱۰۰٫۰ | ۱۲٫۰ روز | ۰٫۶۶۷ | ۳۳ | ۹٫۳ |
| Au | $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$ | ۱۰۰٫۰ | ۶٫۱۸ روز | ۰٫۳۵-۰٫۳۳ | ۹۴-۲۵ | ۸٫۶ |
| Li | $^7\text{Li}(n,\alpha)^t$ | ۹۲٫۵۸ | ۱۲٫۳ سال | $^{\times}۰٫۰۱۹-۰$ | $^{\times}۱۰۰$ | ۳٫۸ |

⁺ Annihilation radiation.

^o Yield of annihilation photons assuming all positrons are stopped.

^x β particle energy and percent abundance.

Source: Kuijpers et al.¹²⁸

Some Neutron-Induced Reactions of Interest in Activation Counters

| درصد فراوانی | واکنش | Induced Activity | نیمه عمر | سطح مقطع حرارتی |
|-------------------------------|--|---|--|--|
| SLOW NEUTRON REACTIONS | | | | |
| %۵۱٫۸ | $^{107}\text{Ag}(n,\gamma)^{108}\text{Ag}$ | 1.49 MeV β^- | ۲٫۳ دقیقه | 30 b |
| %۴۸٫۲ | $^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110}\text{Ag}$ | 2.24 or 2.82 MeV β^- | ۲۴٫۲ ثانیه | 110 b |
| %۱۰۰ | $^{108}\text{Rh}(n,\gamma)^{109}\text{Rh}$ | $\left\{ \begin{array}{l} 2.47 \text{ MeV } \beta^- \\ 2.44 \text{ MeV } \beta^- \end{array} \right.$ | $\left\{ \begin{array}{l} ۴۴ \text{ ثانیه} \\ ۲۶۵ \text{ ثانیه} \end{array} \right.$ | $\left\{ \begin{array}{l} 139 \text{ b} \\ 11 \text{ b} \end{array} \right.$ |
| THRESHOLD REACTIONS | | | | |
| درصد فراوانی | واکنش | Induced Activity | نیمه عمر | آستانه انرژی |
| %۱۰۰ | $^{75}\text{As}(n,n')^{75m}\text{As}$ | 0.30 MeV γ | ۱۷ میلی ثانیه | MeV ۰٫۳ |
| %۲۱٫۷ | $^{207}\text{Pb}(n,n')^{207m}\text{Pb}$ | 24-304 keV γ | ۸۱۰ میلی ثانیه | MeV ۱٫۶ |
| %۹۹٫۸ | $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ | 6.13 MeV γ | 7.2 s | MeV ۱٫۲ |
| %۱۰۰ | $^{19}\text{F}(n,d)^{16}\text{N}$ | $\left\{ \begin{array}{l} 4.27 - 10.4 \text{ MeV } \beta^- \\ \end{array} \right.$ | $\left\{ \begin{array}{l} \text{---} \\ \end{array} \right.$ | MeV ۳~ |
| %۱۰۰ | $^{23}\text{Na}(n,\alpha)^{20}\text{F}$ | 5.4 MeV β^- , 1.63 MeV γ | ۱۱ ثانیه | MeV ۷~ |
| %۱۰۰ | $^9\text{Be}(n,\alpha)^6\text{He}$ | 3.51 MeV β^- | ۸۰۰ میلی ثانیه | MeV ۲~ |

Materials Useful as Slow Neutron Activation Detectors

| عنصر | ایزوتوپ (درصد فراوانی) | سطح مقطع فعالسازی حرارتی) 10^{-18} m^2 | Induced Activity | نیمه عمر |
|------------|--|---|---------------------------|-------------|
| Manganese | ^{55}Mn (100) | 0.1 ± 13.2 | ^{56}Mn | ۲,۵۸ ساعت |
| Cobalt | ^{59}Co (100) | 1.5 ± 16.9 | $^{60\text{m}}\text{Co}$ | ۱۰,۴ دقیقه |
| | | 1.9 ± 20.2 | ^{60}Co | ۵,۲۸ سال |
| Copper | ^{63}Cu (69.1) ^{65}Cu (30.9) | 0.20 ± 4.41 | ^{64}Cu | ۱۲,۸۴ ساعت |
| | | 0.4 ± 1.8 | ^{66}Cu | ۵,۱۴ دقیقه |
| Silver | ^{107}Ag (51.35) ^{109}Ag (48.65) | 4 ± 45 | ^{108}Ag | ۲,۳ دقیقه |
| | | 0.4 ± 3.2 | $^{110\text{m}}\text{Ag}$ | ۲۵۳ روز |
| Indium | ^{113}In (4.23) ^{115}In (95.77) | 12 ± 56 | $^{114\text{m}}\text{In}$ | ۴۹ روز |
| | | 0.6 ± 2.0 | ^{114}In | ۷۲ ثانیه |
| | | 2 ± 160 | $^{116\text{m}}\text{In}$ | ۵۴,۱۲ دقیقه |
| Dysprosium | ^{164}Dy (28.180) | 1 ± 42 | $^{165\text{m}}\text{Dy}$ | ۱۴,۱ ثانیه |
| | | 200 ± 2000 | ^{165}Dy | ۱,۳ دقیقه |
| | | 100 ± 800 | | ۱۴۰ دقیقه |
| Gold | ^{197}Au (100) | 0.4 ± 98.5 | ^{198}Au | ۲,۶۹۵ روز |

Source: K. H. Beckurts and K. Wirtz, Neutron Physics. Copyright 1964 by Springer-Verlag, New York. Used with permission.

آزمایش نقشه شار نوترونی در یک رآکتور MTR نوعی

قدرت رآکتور: ۵۰ کیلووات

مدت زمان تابش دهی سیم مسی: ۱۵ دقیقه

فاصله بین دو نقطه‌ی پی در پی: ۲ سانتیمتر

| شمارش مشاهده شده | اندیس | شمارش مشاهده شده | اندیس | شمارش مشاهده شده | اندیس |
|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| ۳۲۰ | ۴۱ | ۱۶۱۶۶ | ۲۱ | ۵۵۴ | ۱ |
| ۱۳۰ | ۴۲ | ۱۶۱۶۶ | ۲۲ | ۱۹۵۹ | ۲ |
| ۵۷ | ۴۳ | ۱۵۸۳۱ | ۲۳ | ۲۳۴۵ | ۳ |
| ۱۲ | ۴۴ | ۱۶۱۲۳ | ۲۴ | ۲۸۷۰ | ۴ |
| | | ۱۶۱۲۹ | ۲۵ | ۳۴۳۲ | ۵ |
| | | ۱۵۵۶۲ | ۲۶ | ۴۵۸۱ | ۶ |
| | | ۱۵۶۴۲ | ۲۷ | ۵۱۳۱ | ۷ |
| | | ۱۵۸۵۶ | ۲۸ | ۶۴۶۳ | ۸ |
| | | ۱۵۴۵۵ | ۲۹ | ۷۲۶۰ | ۹ |
| | | ۱۵۲۴۰ | ۳۰ | ۸۰۰۴ | ۱۰ |
| | | ۱۴۹۶۷ | ۳۱ | ۹۷۹۸ | ۱۱ |
| | | ۱۳۳۷۲ | ۳۲ | ۱۰۸۱۵ | ۱۲ |
| | | ۱۲۶۰۴ | ۳۳ | ۱۱۵۲۴ | ۱۳ |
| | | ۱۲۰۴۹ | ۳۴ | ۱۳۳۱۷ | ۱۴ |
| | | ۱۱۰۳۰ | ۳۵ | ۱۴۵۶۱ | ۱۵ |
| | | ۹۶۳۵ | ۳۶ | ۱۵۰۲۷ | ۱۶ |
| | | ۸۳۷۱ | ۳۷ | ۱۴۹۲۵ | ۱۷ |
| | | ۷۴۱۰ | ۳۸ | ۱۵۸۴۲ | ۱۸ |
| | | ۳۴۱۹ | ۳۹ | ۱۶۹۴۸ | ۱۹ |
| | | ۶۳۶ | ۴۰ | ۱۵۸۸۰ | ۲۰ |

سوالات

- (۱) اکتیویته تابع زمان نمونه‌ها در مدت تابش‌دهی و بعد از آن چگونه است؟ (با استفاده از برنامه آورده شده در قسمت پیوست، محاسبات را انجام دهید و نتایج را رسم کنید)
- (۲) مهمترین خصوصیتی که لازمست سیم مسی واجد آن باشد تا نتایج اندازه‌گیری نسبی شار نوترونی حاوی دقت کافی باشد چیست؟
- (۳) مشکل عملی در استقرار پولک‌های طلا با و بدون پوشش کادمیوم در کنار سیم مسی کدام می‌باشد؟
- (۴) چنانچه علاوه بر امتداد Z ، نیاز به اندازه‌گیری شار نوترونی در راستای x و y نیز در قلب باشد چه باید کرد؟
- (۵) تخمین خطا با توجه به روش اندازه‌گیری و لوازم بکار برده شده چقدر است؟
- (۶) برای تخمین شار نوترونی در گستره‌های خاص انرژی چه پیشنهاد می‌کنید؟
- (۷) با توجه به وسایل بکار رفته، دقت در اندازه‌گیری شار مطلق تعیین گردد.

Niaze-Danesh.com

فصل نهم: مسمومیت رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی

در این فصل با موارد زیر آشنا می‌شوید

آشنایی با تغییرات زمانی رفتار رآکتور در اثر تجمع زینان و ساماریوم

مقدمه

همانطوری که می‌دانیم در اثر کار کردن رآکتور، تدریجاً پاره‌های شکافت در بستر میله‌های سوخت اجتماع می‌کنند. از یک سو با کاهش هسته‌های شکافت^۱ و از سوی دیگر با تجمع پاره‌های شکافت راکتیویته منفی تدریجاً در قلب رآکتور بوجود می‌آید. پاره‌های شکافت گستره وسیعی از ایزوتوپ‌های مختلف (حدود هزار عدد) را تشکیل داده که هر یک دارای فراوانی خاص خود (منحنی معروف دو کوهان) بوده و سطح مقطع جذب نوترونی خاص خود را دار می‌باشند. سطح مقطع متوسط پاره‌های شکافت را در محاسبات معمولاً حدود ۵۰ بارن در نظر می‌گیرند. از میان پاره‌های شکافت دو ایزوتوپ خاص Xe^{135} و Sm^{149} حایز شرایط خاصی هستند که مشروحاً بدان پرداخته می‌شود.

اثر کلی تجمع پاره‌های شکافت به نوان سم رآکتور

اثر سموم رآکتور از طریق فاکتور بهره حرارتی داخل می‌گردد بطوری که:

$$k_o = \epsilon \eta f_o p$$

ضریب تکثیر قلب پاک

$$k = \epsilon \eta f p$$

ضریب تکثیر قلب حاوی سموم

که در آن:

$$f_o = \frac{\bar{\Sigma}_{aF}}{\bar{\Sigma}_{aF} + \bar{\Sigma}_{aM}} \quad (9-1)$$

$$f = \frac{\bar{\Sigma}_{aF}}{\bar{\Sigma}_{aF} + \bar{\Sigma}_{aM} + \bar{\Sigma}_{aP}} \quad (9-2)$$

$\bar{\Sigma}_{aP}$: سطح مقطع ماکروسکوپیکی جذب سموم

از این رو با توجه به تعاریف، راکتیویته منفی حاصله از حضور سموم برابر خواهد بود با:

$$\rho = \frac{k - k_o}{k} = \frac{f - f_o}{f} = - \frac{\bar{\Sigma}_{aP}}{\bar{\Sigma}_{aF} + \bar{\Sigma}_{aM}} \quad (9-3)$$

برای اینکه تخمینی از راکتیویته حاصله داشته باشیم لازم است تخمینی از مخرج کسر یعنی $\bar{\Sigma}_{aF} + \bar{\Sigma}_{aM}$ داشته باشیم که بطریق زیر اقدام می‌نماییم.

$$k_o = \epsilon \eta f_o p = \epsilon \eta p \frac{\bar{\Sigma}_{aF}}{\bar{\Sigma}_{aF} + \bar{\Sigma}_{aM}} \quad (9-4)$$

از آنجا که:

¹ Fissile

$$\eta \bar{\Sigma}_{aF} = \nu \bar{\Sigma}_f \quad (9-5)$$

از این رو خواهیم داشت:

$$k_o = \epsilon \nu p \frac{\bar{\Sigma}_f}{\bar{\Sigma}_{aF} + \bar{\Sigma}_{aM}} \quad (9-6)$$

$$\bar{\Sigma}_{aF} + \bar{\Sigma}_{aM} = \frac{\epsilon \nu p \bar{\Sigma}_f}{k_o} \quad (9-7)$$

و با قرار دادن آن در عبارت راکتیویته خواهیم داشت:

$$\rho = -\frac{\bar{\Sigma}_{ap}}{\bar{\Sigma}_{aF} + \bar{\Sigma}_{aM}} = -\frac{\bar{\Sigma}_{ap}}{\frac{\epsilon \nu p \bar{\Sigma}_f}{k_o}} \quad (9-8)$$

چون معمولاً ضریب تکثیر نزدیک واحد است، از این رو:

$$\rho = -\frac{\bar{\Sigma}_{ap} / \bar{\Sigma}_f}{\epsilon \nu p} \quad (9-9)$$

اکنون برای برآورد عبارت فوق ناچار به بررسی دقیق تر تحول زمانی زینان و ساماریوم هستیم. لازم به توضیح است که جایگاه خاص این دو ایزوتوپ از میان انواع زیاد پاره‌های شکافت سه خاصیت همزمان می‌باشد:

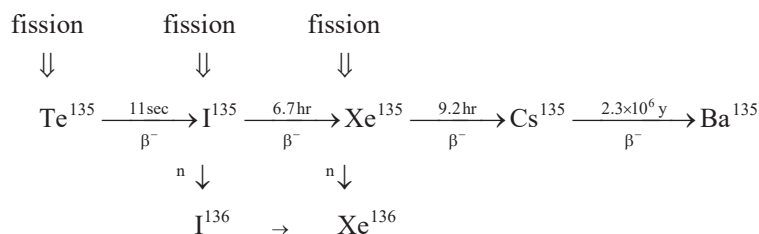
الف- جذب نوترونی زیاد

ب- بهره تولید زیاد در فرآیند شکافت

ج- نیمه عمر متوسط (حدود ساعت) خود یا هسته‌های مادر

زنجیره تحول زینان-۱۳۵

این ایزوتوپ نه تنها خود مستقیماً از شکافت بوجود می‌آید بلکه هسته‌های مادر آن نیز در فرآیند شکافت تولید می‌گردد. از این رو با واپاشی مادر-هسته این عنصر در بستر سوخت بوجود می‌آید. از سوی دیگر خود با واپاشی و نیز جذب نوترونی از بین می‌رود. از این رو:



خلاصه اطلاعات هسته‌ای سموم رآکتور در جدول (۹-۱) مندرج است. در این جدول اطلاعات هسته‌ای زنجیره ساماریوم نیز مندرج است. همانگونه که ملاحظه می‌شود بدلیل نیمه عمر بسیار کوچک تلور، از وجود آن صرف نظر شده و در عوض برای تولید ید از بهره شکافت موثر استفاده کرده‌ایم که قدری بزرگ تر از بهره واقعی آنست. به عبارت دیگر فرض بر آنست که زنجیره ما از ید آغاز می‌گردد.

جدول (۹-۱) خلاصه اطلاعات هسته‌ای سموم رآکتور.

| | Yield (U ²³⁵) | T _{1/2} (h) | λ (s ⁻¹) | σ _a (b) |
|-------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------|------------------------|
| I ¹³⁵ | ۰٫۰۶۹۳ | ۶٫۷ | ۲٫۸۷ × ۱۰ ^{-۵} | ۰٫۱ |
| Xe ¹³⁵ | ۰٫۰۰۲۳۷ | ۹٫۲ | ۲٫۰۹ × ۱۰ ^{-۶} | ۲٫۶۵ × ۱۰ ^۶ |
| Pm ¹⁴⁹ | ۰٫۰۱۰۷۱ | ۵۳ | ۳٫۶۳ × ۱۰ ^{-۶} | ۱۴۰۰ |
| Sm ¹⁴⁹ | - | - | - | ۴۰۱۰۰ |

معادلات دیفرانسیل حاکم بر تغییرات زینان-۱۳۵ بشرح زیر است:

$$\begin{cases} \frac{dI}{dt} = \gamma_I \bar{\Sigma}_f \bar{\phi} - \lambda_I I \\ \frac{dX}{dt} = \lambda_I I + \gamma_X \bar{\Sigma}_f \bar{\phi} - \lambda_X X - \sigma_{aX} \bar{\phi} X \end{cases} \quad (9-10)$$

که در آن I و X بترتیب غلظت هسته‌ای ید و زینان و $\bar{\phi}$ شار متوسط نوترون‌های حرارتی می‌باشد. با حل دستگاه فوق تغییرات زمانی هریک از ایزوتوپ‌های ید و زینان بطور کامل بدست می‌آید. شکل‌های (۹-۱) و (۹-۲) رفتار تابع زمان ایزوتوپ‌های ید-۱۳۵ و زینان-۱۳۵ در مقایسه با تغییرات شار نوترون آورده شده است.

مقدار تعادلی زینان-۱۳۵

با توجه به اینکه در شرایط تعادلی تجمع زینان وید خواهیم داشت:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dX}{dt} = 0 \quad (9-11)$$

از این‌رو:

$$\begin{cases} I_{\infty} = \frac{\gamma_I \bar{\Sigma}_f \bar{\phi}}{\lambda_I} \\ X_{\infty} = \frac{(\gamma_I + \gamma_X) \bar{\Sigma}_f \bar{\phi}}{\lambda_X + \sigma_{aX} \bar{\phi}} \end{cases} \quad (9-12)$$

حال با توجه به شرایط تعادلی، میزان راکتیویته منفی ناشی از حضور X¹³⁵ را مطابق عبارتی که قبلاً بدست آورده بودیم محاسبه نماییم:

$$\rho = - \frac{\bar{\Sigma}_{ap} / \bar{\Sigma}_f}{\epsilon \nu p} \quad (9-13)$$

$$\bar{\Sigma}_X = \sigma_{aX} X_{\infty} = \frac{(\gamma_I + \gamma_X) \bar{\Sigma}_f \bar{\phi}}{\frac{\lambda_X}{\sigma_{aX}} + \bar{\phi}} \quad (9-14)$$

$$\rho = -\frac{(\gamma_I + \gamma_X)}{\epsilon \nu p} \times \frac{\bar{\phi}}{\frac{\lambda_X}{\sigma_{aX}} + \bar{\phi}} \quad (9-15)$$

از فرمول فوق می توان برای سادگی در شرایط حدی استفاده کرد:

الف- شار نوترونی پایین:

$$\bar{\phi} \ll \frac{\lambda_X}{\sigma_{aX}} \quad (9-16)$$

$$\rho = -\frac{(\gamma_I + \gamma_X)\bar{\phi}}{\epsilon \nu p \frac{\lambda_X}{\sigma_{aX}}} \quad (9-17)$$

ب- شار نوترونی بالا:

$$\bar{\phi} \gg \frac{\lambda_X}{\sigma_{aX}} \quad (9-18)$$

$$\rho = -\frac{(\gamma_I + \gamma_X)}{\epsilon \nu p} \quad (9-19)$$

در شرایط اخیر میتوان تخمین خوبی از حد بالای راکتیویته ناشی از زینان در حال تعادل در رآکتوری در حال کار با بیشترین توان بدست آورد (با سوخت U^{235}):

$$\rho \approx \epsilon \approx 1 \quad (9-20)$$

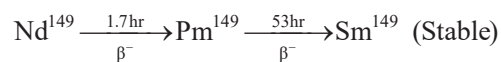
$$\rho = -\frac{(\gamma_I + \gamma_X)}{\nu} = \frac{0.066}{-2.43} = -2.71 \% \frac{\Delta k}{k} \quad (9-21)$$

زنجیره ساماریوم-۱۴۹

برای تکمیل بحث سموم، زنجیره ساماریوم را نیز در نظر گرفته و همان نتایجی که بر راکتیویته ناشی از زینان مترتب بوده است عیناً و متشابهاً برای این ایزوتوپ عمل می گردد.

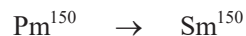
fission

↓



n ↓

n ↓



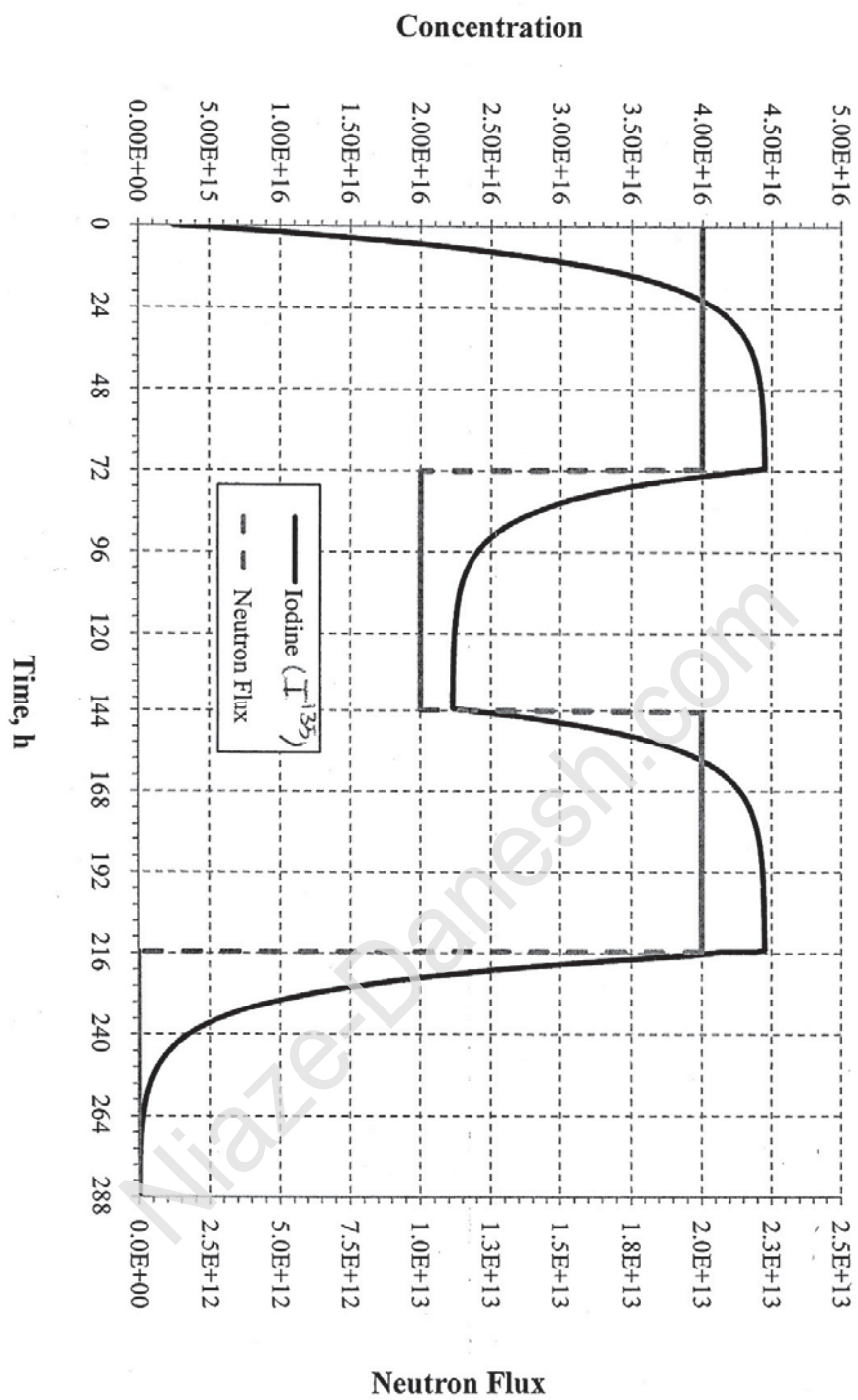
در اینجا نیز باتوجه به اینکه، از نظر نسبی، تجزیه نئودیمیوم خیلی سریعتر از پرومتیوم می باشد. از این رو می توان برای سادگی زنجیره را از عنصر اخیر در نظر گرفته و بهره شکافت برای نئودیمیوم را برای پرومتیوم در نظر گرفت که در جدول (۹-۱) بعنوان بهره موثر تلقی می گردد. ضمناً باید توجه داشت که ساماریوم-۱۴۹ ایزوتوپ پایدار است و دچار واپاشی نمی شود. از این رو معادلات دیفرانسیل حاکم عبارتند از:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = \gamma_p \bar{\Sigma}_f \bar{\phi} - \lambda_p P - \bar{\sigma}_{ap} \bar{\phi} P \\ \frac{dS}{dt} = \lambda_p P - \bar{\sigma}_{as} \bar{\phi} S \end{cases} \quad (9-22)$$

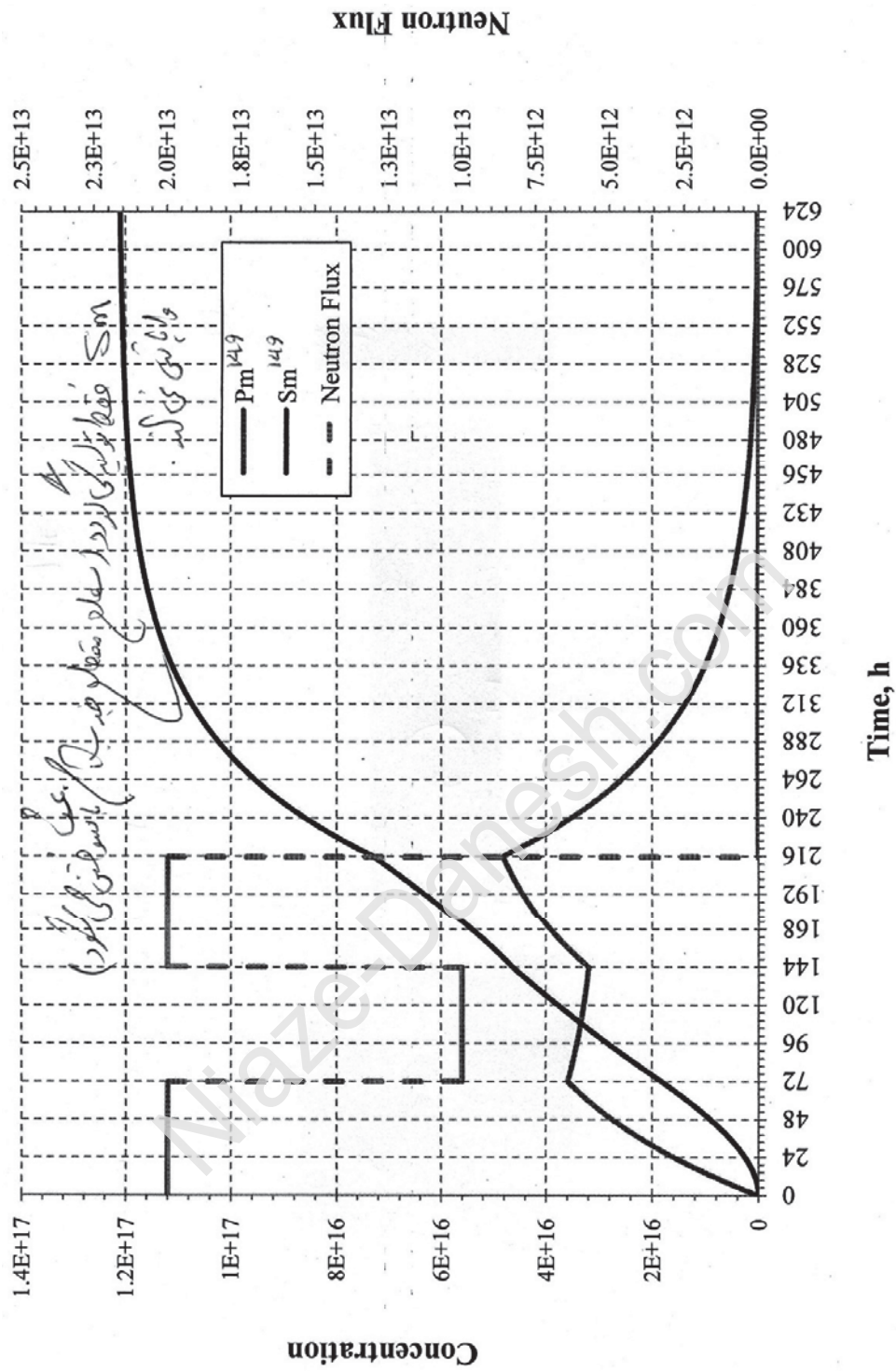
که در آن P و S بترتیب نماینده غلظت هسته‌های پرومتیوم و ساماریوم می‌باشد. متشابهاً و به سادگی با حل معادلات فوق غلظت این هسته‌ها و به ویژه ساماریوم بدست می‌آید که عیناً مانند گذشته راکتیویته ناشی از حضور آن را می‌توان حساب کرد. شکل (۳-۹) رفتار تابع زمان ایزوتوپ‌های Sm^{149} و Pm^{149} در مقایسه با تغییرات شار نوترون نشان می‌دهد.

شرح آزمایش

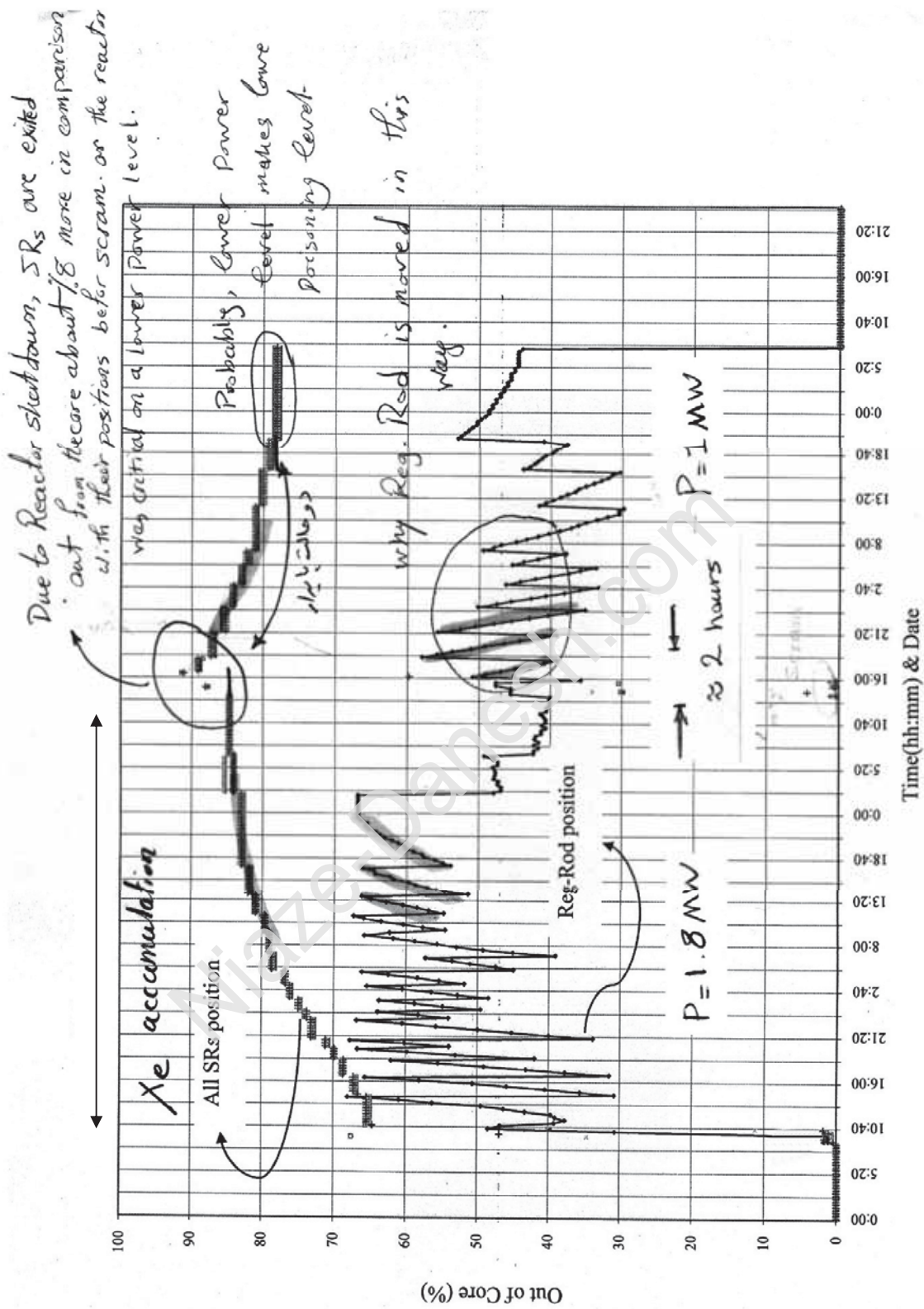
با توجه به آزمایش کالیبراسیون میله‌های کنترل، برای هر میله کنترل منحنی راکتیویته برحسب موقعیت آن در دسترس است. اطلاعات موقعیت میله‌های کنترل مانند سایر پارامترها در جدول اطلاعات ساعتی راکتور درج می‌گردد. از این رو این اطلاعات برای یک دوره شیفته راکتور که حدود یک هفته بطول می‌کشد در جدولی با ذکر تاریخ و ساعت و ذکر قدرت راکتور بصورت خلاصه مرتب می‌گردد. دانشجویان با داشتن اطلاعات کالیبراسیون هر یک از میله‌ها لازمست تغییرات موقعیت میله‌ها را به راکتیویته تبدیل و جمع آنها را در ستون آخر در برابر زمان درج نماید. منحنی مربوطه، رفتار راکتیویته منفی ایجاد شده ناشی از سموم زینان و ساماریوم را در طی کارکرد مداوم راکتور و نزدیک شدن به حالت تعادلی را نشان می‌دهد. در شکل (۴-۹) اطلاعات تجربی تغییرات موقعیت میله‌های کنترل در طول بازه یک هفته‌ای کار راکتور تحقیقاتی MTR نوعی آورده شده است.



شکل (۹-۱) رفتار تابع زمان ایزوتوپ I^{135} در مقایسه با تغییرات شار نوترون.



شکل (۳-۹) رفتار تابع زمان ایزوتوپ‌های Pm^{149} و Sm^{149} در مقایسه با تغییرات شار نوترون.



شکل (۹-۴) اطلاعات تجربی تغییرات موقعیت میله‌های کنترل در طول بازه یک هفته‌ای کار یک رآکتور MTR نوعی.

پیوست: حل عددی معادلات دیفرانسیل توصیف کننده رفتار سموم در قلب رآکتور تحت نرم افزار متلب

```
clear
clc
options = odeset('RelTol',1e-100,'AbsTol',[1e-20 1e-20 1e-20 1e-20 1e-20 1e-20 1e-20 1e-20]);
[T,Y] = ode15s(@point,[0:2E3:30*24*3600],[0 0 0 0]);
k=length(T);
for i=1:k
    if T(i)<(3*24*3600)
        Flux(i)=2E13;
    end
    if T(i)>=(3*24*3600)
        Flux(i)=1E13;
    end
    if T(i)>(6*24*3600)
        Flux(i)=2E13;
    end
    if T(i)>(9*3600*24)
        Flux(i)=0;
    end
end
figure(1)
plot(T,Y(:,1),T,Y(:,2),T,Flux);
grid on
xlabel('Time, sec');
ylabel('Precursor Density')
legend('Iodine','Neutron Flux')
figure(2)
plot(T,Y(:,3),'-b',T,Y(:,4),'y','LineWidth',2);
grid on
xlabel('Time, sec');
ylabel('Precursor Density')
legend('Pm','Sm')
Flux=Flux';
Results=cat(2,Y,Flux,T);
```

```

function dy = Point(t,y)
if t<3*24*3600
    F=2E13;
end;
if t>=3*24*3600
    F=1E13;
end;
if t>=6*24*3600
    F=2E13;
end;
if t>=9*24*3600
    F=0;
end;
SigmaI=1;
SigmaAI=0.1E-24;
SigmaAXe=2.65E6*1E-24;
SigmaAPm=1400E-24;
SigmaASm=40100E-24;
GI=0.0639;
GXe=0.00237;
GPm=0.01071;
LamndaI=2.87E-5;
LamndaXe=2.093E-5;
LamndaPm=3.63E-6;
dy = zeros(4,1);
dy(1)=(GI*SigmaI*F)-(LamndaI*y(1))-(SigmaAI*F*y(1));
dy(2)=(LamndaI*y(1))+(GXe*SigmaI*F)-(LamndaXe*y(2))-(SigmaAXe*F*y(2));
dy(3)=(GPm*SigmaI*F)-(LamndaPm*y(3))-(SigmaAPm*F*y(3));
dy(4)=(LamndaPm*y(3))-(SigmaASm*F*y(4));

```

سوالات

- ۱) چقدر طول می کشد تا حالت تعادلی عملاً استقرار یابد؟
- ۲) میزان راکتیویته منفی حالت تعادلی در قدرت ۵ مگاوات در رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی چقدر است؟
- ۳) مقایسه مقدار فوق با مقدار نظری تخمینی در بخش قبل چه چیزی را نشان می دهد؟
- ۴) سهم ناشی از Sm^{149} در راکتیویته منفی را حساب کنید؟
- ۵) مقایسه سهم ناشی از زینان با سهم ناشی از ساماریوم چه چیزی را نشان می دهد؟
- ۶) آیا منحنی تغییرات ρ بر حسب زمان در رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی فقط مربوط به این دو پاره شکافت است. توضیح دهید.
- ۷) در اثر خاموش شدن رآکتور چه تغییراتی در راکتیویته ناشی از سموم ایجاد شده و علت آن را مشروحاً توضیح دهید.
- ۸) معادلات دیفرانسیل حاکم بر سموم را در حالت خاموش نوشته و آن را حل کرده، نقاط اکسترمم را استخراج کنید.
- ۹) با توجه به شکل (۴-۹) نتایج عملی مترتب بر رفتار سموم را در کل سیکل کاری یک هفته ای رآکتور تحلیل کنید؟ راهنمایی: به موقعیت میله های کنترل توجه کنید.
- ۱۰) معادلات حاکم بر رفتار سموم را با استفاده از نرم افزار متلب به صورت عددی حل کنید (جهت راهنمایی لطفاً به استاد درس مراجعه کنید).

فصل دهم: کالیبراسیون قدرت حرارتی به روش کالریمتری

در این فصل با موارد زیر آشنا می‌شوید

آشنایی با کالیبراسیون کانال‌های اندازه‌گیری قدرت در رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی با کمک روش کالریمتری

تنوری آزمایش

خروجی همه کانال‌های اندازه‌گیری قدرت که در فصل سوم شرح داده شدند از جنس جریان بوده که متناسب با قدرت رآکتور می‌باشد. این درحالیست که جریان خروجی این کانال‌ها به خودی خود نماینده قدرت واقعی رآکتور نمی‌باشد. از این رو در عمل این کانال‌ها بایستی ابتدا کالیبره شده و سپس بعنوان یک کانال نمایش دهنده قدرت مورد استفاده قرار گیرند. یکی از روش‌های کالیبراسیون استفاده از نقشه شار نوترونی در قلب است که معمولاً در مورد رآکتورهای صفر قدرت بکار می‌رود. روش دقیقتر روش کالریمتری است که برای رآکتورهای با قدرت متوسط قابل استفاده می‌باشد. خود این روش به دو صورت زیر قابل اجراست:

صورت اول: در این حالت قدرت را مستقیماً با استفاده از تفاوت دمای سیال آب خنک کننده ورودی و خروجی از

قلب بدست می‌آوریم. به عبارت دیگر قدرت رآکتور، P ، در هر لحظه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P = \dot{m} \times C_p \times (T_{out} - T_{in}) \quad (10-1)$$

\dot{m} [$\frac{kg}{s}$]: دبی جرمی سیال خنک کننده عبوری از قلب رآکتور:

C_p [$=4180 \frac{Joule}{kg.C^{\circ}}$]: گرمای ویژه آب:

$T_{coreout}$ [C°]: دمای آب خنک کننده خروجی از قلب:

T_{corein} [C°]: دمای آب خنک کننده ورودی به قلب:

در رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی از این رابطه به عنوان یک شاخص مستقل برای اندازه‌گیری قدرت رآکتور در زمان کار آن استفاده می‌شود. یادآور می‌شود که به هر حال به دلیل خطای زیاد نمیتوان از این رابطه برای کالیبراسیون دقیق قدرت رآکتور سود جست. ضمناً با توجه به وجود قسمتی از آب استخر بصورت راکد در سطوحی پایین تر از قلب که در عبور از قلب مشارکت نمی‌کند، لازمست یک ضریب تصحیح به رابطه قبلی اضافه گردد یعنی:

$$P = \gamma \times \dot{m} \times C_p \times (T_{coreout} - T_{corein}) \quad (10-2)$$

صورت دوم: در این حالت تغییرات دمای متوسط آب استخر در بازه زمانی Δt اندازه‌گیری شده و اجازه داده می‌شود

تا درجه حرارت آب مدار اولیه طی این مدت افزایش یافته و سپس طبق روابط زیر قدرت حرارتی رآکتور را محاسبه کرد:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = M \times C_p \times \frac{\Delta T_{Pool}}{\Delta t} \quad (10-3)$$

قدرت حرارتی رآکتور: $P [w]$

مقدار انرژی تولیدی توسط قلب رآکتور که در آب مدار اولیه جذب شده: $Q [J]$

کل جرم آب در گردش در مدار اولیه: $M [Kg]$

ظرفیت گرمایی ویژه آب: $C_p \left[\frac{J}{kg \cdot C^\circ} \right] = 4180$

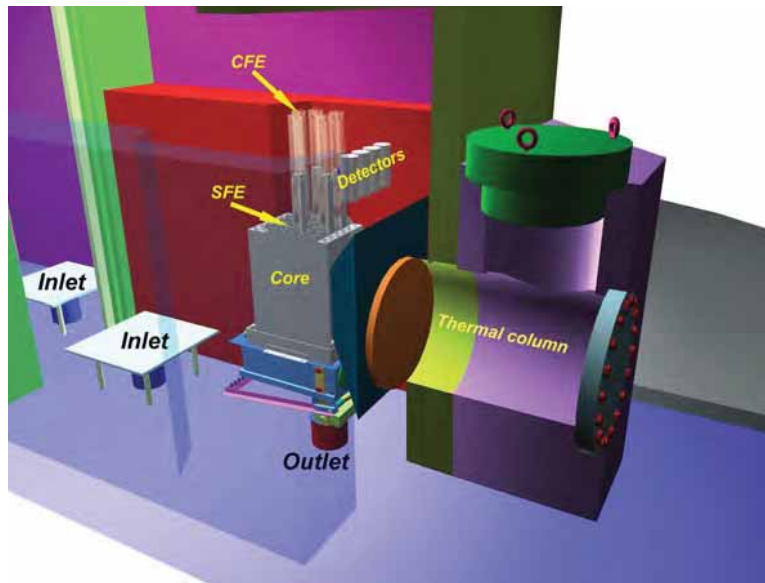
افزایش دمای متوسط آب استخر: $\overline{\Delta T_{Pool}} [C^\circ]$

بازه زمانی مورد آزمایش $\Delta t [sec] =$

دلایل کالیبراسیون قدرت رآکتور

آشکارسازهای نوترونیکی و به طور کلی آشکارسازهای تابش‌های هسته‌ای، هر نوع از تابش رابه جریانی از الکترون‌ها تبدیل می‌کنند. از جمله عواملی که بر شدت جریان ایجاد شده تاثیر گذار است مقدار تابش رسیده به آشکارساز و میزان یونیزاسیون می‌باشد که خود تابعی از شار نوترون می‌باشد. از آنجا که خروجی هر یک از این کانال‌های اندازه‌گیری قدرت، یک شدت جریان الکتریکی بشمار می‌رود. از این رو لازم است پاسخ نهایی بر حسب قدرت واقعی رآکتور مدرج گردد. از اینرو لازم است در ابتدای کار رآکتور، نسبت به کالیبراسیون کانال‌های مربوطه اقدام گردد. لازم به ذکر است که در طول عمر رآکتور، با توجه به تغییراتی که در چیدمان سوخت و بزرگی و کوچکی قلب رخ می‌دهد و نیز با توجه به تغییرات مصرف سوخت^۱ و نیز در نظرگیری این حقیقت که آشکارسازهای نوترونی نیز طی زمان حساسیت خود را از دست می‌دهند. از این رو علاوه بر کالیبراسیون انجام شده در دوره راه اندازی رآکتور، لازم است اینکار به تناوب در مقاطع مختلف دوران بهره برداری نیز تکرار گردد.

با بحث فوق میتوان اینطور نتیجه گرفت که لازم است هر چند مدتی کانال‌های اندازه‌گیری قدرت دوباره تنظیم و کالیبره شوند تا از صحت اندازه‌گیری آنها اطمینان حاصل شود. برای کالیبراسیون این کانال‌ها از تنظیم فاصله نسبی آنها از قلب رآکتور استفاده میشود. روش کار به این صورت است که پس از تعیین قدرت به روش کالریمتری فاصله آشکارسازها نسبت به قلب طوری تنظیم گردد که عدد متناظر با قدرت اندازه‌گیری شده از روش کالریمتری قرایت گردد. بر حسب آنکه قدرت واقعی اندازه‌گیری شده بیشتر یا کمتر از آنچه آشکارساز نشان می‌دهد باشد لازم است فاصله آشکارساز از قلب رآکتور نزدیکتر یا دورتر تنظیم گردد. شکل (۱-۱۰) محل استقرار آشکارسازهای نوترونیکی مربوط به کانال‌های اندازه‌گیری قدرت، واقع در کنار قلب رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱۰) محل استقرار آشکارسازهای نوترونیکی مربوط به کانال‌های اندازه‌گیری قدرت، واقع در کنار قلب رآکتور.

شرح آزمایش

روش کلی آزمایش به این ترتیب است که با استفاده از چهار دما سنج که در چهار گوشه استخر رآکتور نصب شده اند دمای هر چهار نقطه اندازه‌گیری و سپس متوسط‌گیری می‌شود. دماسنج‌های مورد استفاده دارای دقت بالا و دستکم حدود یکدهم درجه سانتیگراد است.

ابتدا رآکتور را در قدرت دلخواه تنظیم نموده و سامانه کنترل رآکتور را روی حالت اتوماتیک قرار می‌دهیم. چون این آزمایش معمولاً در قدرت‌های بالای یک مگاوات صورت می‌گیرد. از این رو بایستی که قلب در شرایط رژیم اجباری خنک شود. بدین منظور پمپ مدار اولیه را در وضعیت روشن قرار می‌دهیم. از آنجا که هیچ‌گونه تبادل حرارتی با خارج نباید صورت گیرد، پمپ مدار ثانویه و پمپ تصفیه یونی آب مدار اولیه خاموش می‌گردد.

بعد از تنظیمات فوق با توجه به ثابت بودن سطح قدرت، درجه حرارت را در بازه‌های زمانی 15 دقیقه (یا هر بازه دیگری)، قرابت و ضمناً دمای ورود و خروج سیال خنک کننده از قلب رآکتور، و فلوی سیال خنک کننده عبوری از قلب رآکتور را نیز ثبت مینماییم. برای ثبت اطلاعات از فرم پیوست استفاده می‌کنیم.

لازم به ذکر است که جرم کل آب مدار اولیه رآکتور مشتمل است بر جرم آب استخر و آب موجود در مخزن نگه‌دارنده و نیز لوله‌های ارتباطی و آب موجود در مبدل حرارتی. توصیه می‌شود که نهایتاً مقادیر اندازه‌گیری شده دمای متوسط استخر را بر حسب زمان روی منحنی برده تا ضمن کسب اطمینان از خطی بودن روند افزایش دما، نهایتاً با استفاده از شیب متوسط نقاط، قدرت رآکتور با دقت تمام محاسبه و تعیین گردد. شکل (۲-۱۰) نمایش دهنده نحوه اندازه‌گیری قدرت در یکی از جلسات کالیبراسیون می‌باشد.

نکاتی در خصوص صورت دوم

در محاسبات دقیق لازم است تلفات حرارتی به خارج از استخر نیز در نظر گرفته شود. این تلفات عمدتاً عبارتند از تلفات از طریق دیواره‌های استخر، تلفات از طریق سطح چه از طریق جابجایی و چه از طریق تابش. ضمناً قسمتی از تلفات نیز از طریق لوله‌های ارتباطی و نیز آب باقیمانده و راکد در مبدل حرارتی انجام می‌گردد. دانشجو میتواند با بررسی بیشتر تخمینی از این تلفات بدست آورد.

برای اطلاع از دقت (چه در صورت نخست و چه در صورت دوم اندازه‌گیری) از تخمین خطای نسبی که بصورت زیر استفاده می‌شود میتوان محاسبات مربوط به خطا را انجام داد:

$$\frac{dP}{P} = \frac{dM}{M} + \frac{dC}{C} + \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} + \frac{d(\Delta t)}{\Delta t} \quad (10-4)$$

با توجه به تخمینی از پارامترهای مورد اندازه‌گیری بسادگی روشن است که دقت اندازه‌گیری در حالتی که از کل آب مدار اولیه استفاده می‌شود بسیار بیشتر از دقت روش دیگر می‌باشد (دانشجو این مطلب را راستی آزمایی کند).

قابل توجه است که در صورتی که آزمایشگر علاقمند به رعایت تغییرات ناچیز خواص آب در گستره معمول تغییرات دمایی باشد، در این صورت جدول (10-1) می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. به این ترتیب $\frac{dC}{C}$ دیگر صفر نبوده و می‌تواند برآورد شود. ضمناً در خصوص خطای جرم خواهیم داشت:

$$\frac{dM}{M} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} \quad (10-5)$$

جدول (10-1) اطلاعات فیزیکی آب در گستره دمایی ۲۵ الی ۴۵ درجه‌ی سانتیگراد.

| T (C°) | $\rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$ | $C_p \left(\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{C}^\circ}\right)$ | $\mu \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$ |
|--------|--|--|---------------------------------|
| ۲۵ | ۹۹۷/۱ | ۴۱۷۹/۳ | 0.897×10^{-3} |
| ۳۵ | ۹۹۴/۰ | ۴۱۷۷/۹ | 0.723×10^{-3} |
| ۴۰ | ۹۹۲/۳ | ۴۱۷۸/۳ | 0.659×10^{-3} |
| ۴۵ | ۹۹۰/۲ | ۴۱۷۹/۲ | 0.599×10^{-3} |

نکته ۱: به علت رابطه خطی که بین شار نوترونی و قدرت رآکتور وجود و به عبارت دیگر:

$$\text{Total Power} \propto \text{Power Density} \propto \text{Neutron Flux} \propto \text{Neutron Density}$$

از این رو به محض آنکه آشکارسازها در یک سطح قدرت خاص کالیبره شوند، در این صورت درستی نمایشگر قدرت رآکتور در کلیه سطوح قدرت (منظور قدرت نوترونی) محرز می گردد.

نکته ۲: تاکید می شود که کلیه ادوات الکترونیکی منجمله کانالهای اندازه گیری قدرت، قبل از کالیبراسیون فیزیکی لازمست از نقطه نظر صحت کارکرد، کالیبراسیون الکترونیکی خود را داشته باشند که با کالیبراسیون مورد نظر در این آزمایش متفاوت است.

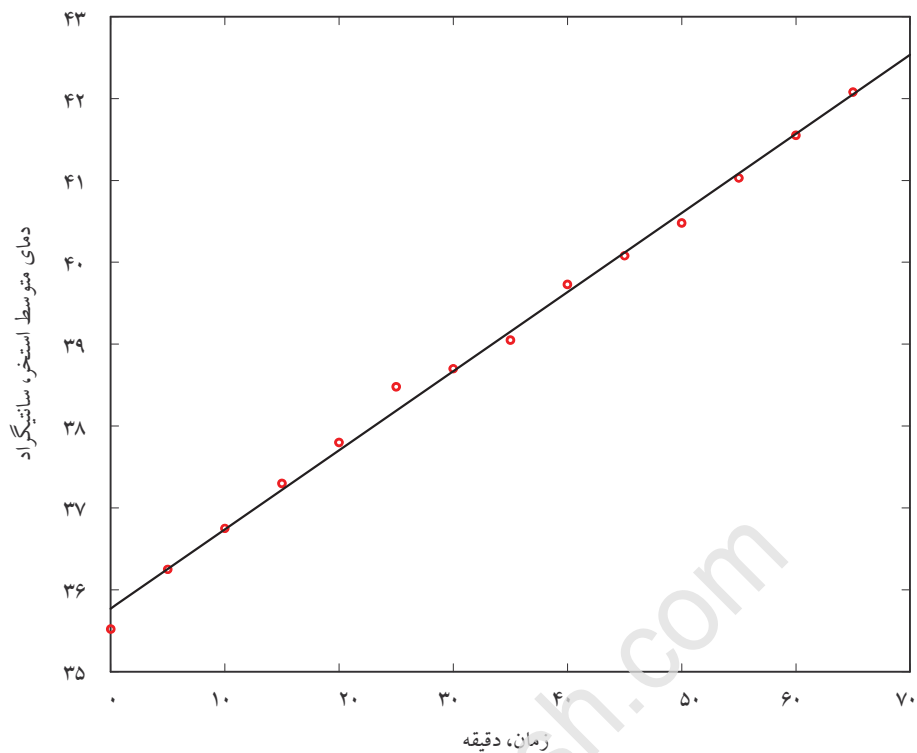
نکته ۳: برای تعیین قدرت حرارتی در زمان حقیقی فلومتر روی کنسول رآکتور می بایست کالیبره گردد. برای این کار خروجی آب از استخر رآکتور سریعاً گشوده شده و با اندازه گیری حجم از دست رفته آب بین دو فاصله زمانی معین، دبی واقعی بدست آمده و فلومتر تنظیم می گردد. از تغییرات سطح آب در مخزن نگه دارنده نیز می توان استفاده کرد.

آزمایش کالیبراسیون قدرت حرارتی در یک رآکتور MTR نوعی

حجم آب موجود در مدار اولیه: حدود ۶۰۰ متر مکعب آب در مدار اولیه رآکتور وجود دارد.

قدرت حرارتی اندازه گیری شده توسط سامانه کنترل قدرت راکتور: ۵ مگا وات

| قدرت رآکتور [MW] $\gamma m^{\circ} \Delta T$ $\gamma = 1/0.6$ | دبی حجمی آب عبوری از قلب رآکتور [gpm] | دمای قلب رآکتور [F] | | | دمای استخر [C] | | | | | زمان | اندیس |
|--|--|---------------------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | ΔT | خروجی | ورودی | T_{ave} | T_f | T_r | T_p | T_1 | hh:mm | |
| ۴/۸ | ۲۰۷۰ | ۱۵ | ۱۰۷ | ۹۲ | ۳۵,۵۲ | ۳۵,۵ | ۳۵,۶ | ۳۵,۵ | ۳۵,۵ | ۸:۴۰ | ۱ |
| ۴/۸ | ۲۰۷۰ | ۱۵ | ۱۰۷ | ۹۲ | ۳۶,۲۵ | ۳۵,۹ | ۳۶,۸ | ۳۶,۴ | ۳۵,۹ | ۸:۴۵ | ۲ |
| ۴/۸ | ۲۰۷۰ | ۱۵ | ۱۰۸ | ۹۳ | ۳۶,۷۵ | ۳۶,۴ | ۳۷,۲ | ۳۶,۹ | ۳۶,۵ | ۸:۵۰ | ۳ |
| ۴/۵ | ۲۰۷۰ | ۱۴ | ۱۰۸ | ۹۴ | ۳۷,۳۰ | ۳۷,۰ | ۳۷,۶ | ۳۷,۶ | ۳۷ | ۸:۵۵ | ۴ |
| ۴/۵ | ۲۰۷۰ | ۱۴ | ۱۰۹ | ۹۵ | ۳۷,۸۰ | ۳۷,۵ | ۳۸,۳ | ۳۷,۸ | ۳۷,۶ | ۹:۰۰ | ۵ |
| ۴/۵ | ۲۰۷۰ | ۱۴ | ۱۱۰ | ۹۶ | ۳۸,۴۸ | ۳۸,۱ | ۳۸,۷ | ۳۸,۵ | ۳۸,۶ | ۹:۰۵ | ۶ |
| ۴/۵ | ۲۰۷۰ | ۱۴ | ۱۱۱ | ۹۷ | ۳۸,۷۰ | ۳۸,۴ | ۳۹,۱ | ۳۸,۹ | ۳۸,۴ | ۹:۱۰ | ۷ |
| ۴/۵ | ۲۰۷۰ | ۱۴ | ۱۱۲ | ۹۸ | ۳۹,۰۵ | ۳۹,۰ | ۳۹,۰ | ۳۹,۲ | ۳۹,۰ | ۹:۱۵ | ۸ |
| ۴/۵ | ۲۰۷۰ | ۱۴ | ۱۱۳ | ۹۹ | ۳۹,۷۳ | ۳۹,۵ | ۴۰,۱ | ۳۹,۸ | ۳۹,۵ | ۹:۲۰ | ۹ |
| ۴/۵ | ۲۰۷۰ | ۱۴ | ۱۱۴ | ۱۰۰ | ۴۰,۰۸ | ۴۰,۰ | ۴۰,۳ | ۴۰,۲ | ۳۹,۸ | ۹:۲۵ | ۱۰ |
| ۴/۵ | ۲۰۷۰ | ۱۴ | ۱۱۴ | ۱۰۰ | ۴۰,۴۸ | ۴۰,۲ | ۴۰,۷ | ۴۰,۶ | ۴۰,۴ | ۹:۳۰ | ۱۱ |
| ۴/۵ | ۲۰۷۰ | ۱۴ | ۱۱۵ | ۱۰۱ | ۴۱,۰۳ | ۴۰,۹ | ۴۱,۵ | ۴۱,۲ | ۴۰,۵ | ۹:۳۵ | ۱۲ |
| ۴/۵ | ۲۰۷۰ | ۱۴ | ۱۱۶ | ۱۰۲ | ۴۱,۵۵ | ۴۱,۳ | ۴۱,۹ | ۴۱,۷ | ۴۱,۳ | ۹:۴۰ | ۱۳ |
| ۴/۵ | ۲۰۷۰ | ۱۴ | ۱۱۷ | ۱۰۳ | ۴۲,۰۸ | ۴۱,۹ | ۴۲,۴ | ۴۲,۳ | ۴۱,۷ | ۹:۴۵ | ۱۴ |



شکل (۱۰-۲) تغییرات دمای متوسط آب استخر رآکتور نسبت به زمان (در یک رآکتور MTR نوعی).

رابطه‌ی خط برازش شده به داده‌های تجربی نشان داده شده در شکل (۱۰-۲) عبارتست از:

$$T = 0.09664t + 35.77 \quad (10-6)$$

از آنجا که در این رابطه زمان بر حسب دقیقه است، شیب خط برازش شده را بر عدد ۶۰ تقسیم می‌کنیم، در نتیجه داریم:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{0.09664}{60} = 0.0016107 \quad (10-7)$$

به این ترتیب قدرت رآکتور عبارتست از:

$$P = MC \frac{\Delta T}{\Delta t} = 600 \times 997.77 \times 4177.9 \times 0.0016107 = 4.0 \text{ MW} \quad (10-8)$$

قدرت محاسبه شده از این آزمایش برابر با ۴ مگاوات است، در حالیکه مقادیری که از کانال‌های اندازه‌گیری قدرت رآکتور قرائت شده متفاوت و در حدود ۵ مگاوات هستند.

پیوست: فرم انجام آزمایش کالیبراسیون قدرت حرارتی در یک رآکتور MTR نوعی

تاریخ: / /

آزمایش کالیبراسیون قدرت حرارتی

حجم آب موجود در مدار اولیه: حدود ۶۰۰ متر مکعب آب در مدار اولیه رآکتور وجود دارد.

قدرت کانال‌های اندازه‌گیری قدرت در رآکتور:

| قدرت رآکتور [MW] $\gamma m^{\circ}C\Delta T$ $\gamma=1/0.6$ | دبی حجمی آب عبوری از قلب رآکتور [gpm] | دمای قلب رآکتور [F] | | | دمای استخر [C] | | | | | زمان | اندیس | |
|--|--|---------------------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| | | ΔT | خروجی | ورودی | T_{ave} | T_f | T_r | T_p | T_s | hh:mm | | |
| | | | | | | | | | | | | ۱ |
| | | | | | | | | | | | | ۲ |
| | | | | | | | | | | | | ۳ |
| | | | | | | | | | | | | ۴ |
| | | | | | | | | | | | | ۵ |
| | | | | | | | | | | | | ۶ |
| | | | | | | | | | | | | ۷ |
| | | | | | | | | | | | | ۸ |
| | | | | | | | | | | | | ۹ |
| | | | | | | | | | | | | ۱۰ |
| | | | | | | | | | | | | ۱۱ |
| | | | | | | | | | | | | ۱۲ |
| | | | | | | | | | | | | ۱۳ |
| | | | | | | | | | | | | ۱۴ |

سوالات

- (۱) میزان خطای نسبی در هریک از دو روش کالریمتریک ذکر شده چقدر است؟
- (۲) از میان دو روش مشابه کالریمتریک، کدام دقیقتر است و چرا؟
- (۳) هنگامی که روش گرمایش کل آب استخر را اجرا می‌کنیم، دو حالت مختلف را تجربه می‌کنیم. در حالت اول چهار دماسنج با دقت $\frac{1}{2}^{\circ}\text{C}$ داشته و از متوسط گیری آنها استفاده می‌کنیم. در حالت دوم فقط یک دماسنج در اختیار داریم که دارای دقت بهتری معادل 0.1°C بوده ولی متأسفانه زمینه داخلی لوله که درجات را نشان می‌دهد شکسته و به اندازه یک درجه سانتیگراد جابجا شده است. به عبارت دیگر، این دماسنج دقیق هست ولی درست نیست. در صورتیکه کلیه شرایط دیگر یکسان باشند، معلوم کنید نتایج اندازه گیری قدرت در کدام یک از این دو حالت از دقت بیشتری برخوردار است؟
- (۴) معمولاً در برازش خط به اطلاعات دمای متوسط آب استخر، از اولین نقطه اندازه گیری صرف نظر کرده نقاط بعدی را مورد استفاده قرار می‌دهند. چرا؟
- (۵) در قرایت چهار دماسنج واقع در چهار گوشه استخر، همزمانی قرایت‌ها نهایت اهمیت را دارد. چرا؟
- (۶) آیا ممکن است ضریب تصحیح که در فرمولاسیون روش اول وجود دارد، عددی کوچک‌تر از واحد باشد؟
- (۷) در این آزمایش، مدار تصفیه یونی آب رآکتور خاموش می‌گردد. چرا؟
- (۸) اگر بعد از آزمایش معلوم شود حجم آب موجود در مبدل حرارتی لحاظ نشده است، قدرت واقعی چند درصد دچار بیراهی خواهد شد؟
- (۹) برای استفاده از صورت اول برای اندازه گیری قدرت حرارتی رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی لازمست فلومتر مدار اولیه کالیبره باشد. چه روشی را برای کالیبراسیون آن پیشنهاد می‌کنید؟
- (۱۰) بنظر شما چگونه می‌توان ضریب تصحیح حرارتی را در رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی اندازه گیری کرد؟

فصل یازدهم: اندازه‌گیری ضریب دمایی راکتیویته قلب راکتور

در این فصل با موارد زیر آشنا می‌شوید

اندازه‌گیری ضریب دمایی راکتیویته در راکتور تحقیقاتی MTR نوعی

مقدمه

اطلاع از ضریب دمایی راکتیویته در راکتورها اهمیت فراوانی دارد. به دلیل گستره وسیع تغییرات دمایی در راکتورها، اطلاع از چگونگی تغییرات ضریب تکثیر به دلیل تغییرات دمایی مورد نیاز می‌باشد. معمولاً به جای در نظر گرفتن ضریب تکثیر از شاخصی به نام ضریب راکتیویته برای بررسی اثرات دما روی کارکرد راکتور استفاده می‌گردد. در ادامه، نحوه اندازه‌گیری ضریب دمایی راکتیویته در راکتور تحقیقاتی MTR نوعی شرح داده می‌شود.

تئوری آزمایش

این آزمایش در شرایطی باید انجام شود که کلیه تغییرات زمانی میان مدت راکتور به حالت پایدار رسیده باشد. از این رو هر گونه تغییر وضعیتی در شرایط قلب، ناشی از تغییرات دمایی قلمداد گردد. برای این منظور کافیسیت با خاموش کردن پمپ مدار ثانویه و قطع ارتباط خنک‌کنندگی راکتور با محیط بیرون، اجازه داد تا دمای آب استخر رفته رفته بالا رفته و همزمان موقعیت میله کنترل تنظیمی مشاهده و درج گردد. از تفاوت ضریب تکثیر راکتور در دو حالت ابتدایی و نهایی که دمای استخر در کمترین و بیشترین دما بوده باشد، ضریب راکتیویته دمایی تعیین می‌گردد. قابل ذکر است که در راکتور تحقیقاتی MTR نوعی نقش کندکننده و خنک‌کننده بطور یکسان بر عهده آب بوده، اما آنچه مشاهده می‌شود حقیقتاً ناشی از تغییر در خواص کندکنندگی می‌باشد.

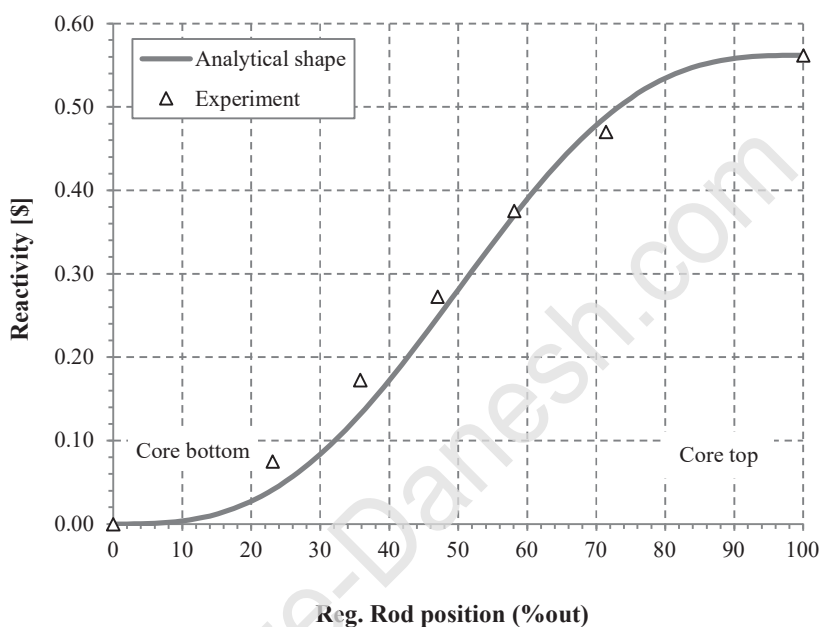
شرح آزمایش

الف- دمای خنک‌کننده (یا کندکننده)

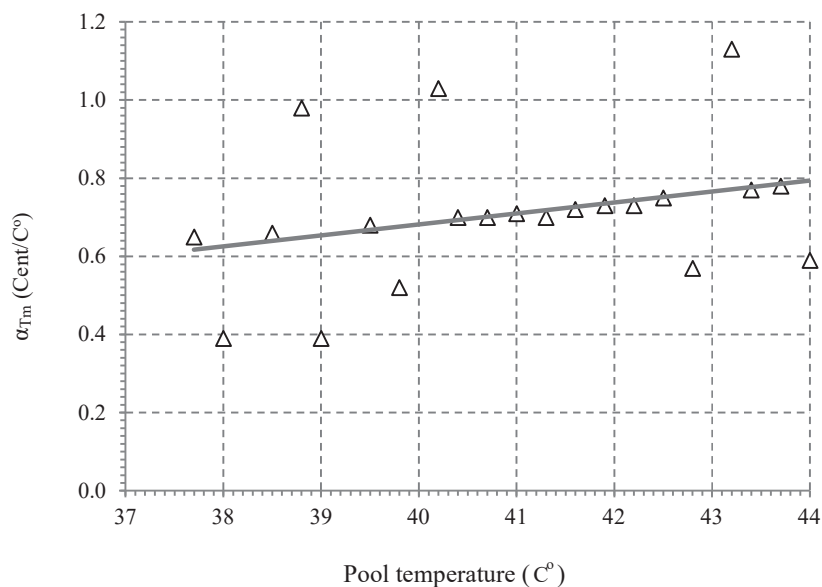
بعد از گذشت چهار یا پنج روز از کار راکتور در قدرت ثابت (مثلاً 2MW) که طی این مدت Xe در حال کار راکتور به حالت تعادل رسیده است، اقدام به انجام این آزمایش میکنیم. قابل ذکر است که این آزمایش معمولاً همزمان با آزمایش کالیبراسیون حرارتی راکتور انجام می‌شود. بدین معنی که ارتباط حرارتی مدار اولیه را با خارج قطع کرده اجازه می‌دهیم که دمای آب استخر از دمای ثابت (مثلاً $T_{Pool} = 30^{\circ}C$) افزایش یافته به دمای بالاتر و دستکم ۱۰ درجه بالاتر از دمای ثابت قبلی، و در همان قدرت، افزایش یابد (مثلاً $T_{Pool} = 40^{\circ}C$). تاکید می‌شود که قدرت راکتور کماکان طی روزهای پیشین و نیز طی چند ساعتی که آزمایش انجام می‌شود یکسان و ثابت است. لازمست کسب اطمینان شود که هرگونه اثرات تابع زمان، بویژه تجمع زینان و ساماریوم، به حالت پایدار می‌رسد. از این رو محل میله کنترل تنظیمی در قلب بدون تغییر باشد. اکنون در اثر افزایش دمای آب و اثرات راکتیویته قلب ناشی از آن (مثبت یا منفی)، محل میله کنترل تنظیمی شروع به تغییر کرده تا سامانه همچنان بتواند سطح قدرت را ثابت نگاه دارد. از میزان تغییر محل میله کنترل تنظیمی برای ثابت نگهداشتن قدرت در انتهای کار، مقدار $\Delta\rho$ و سپس $\alpha_{T_m} = \frac{\Delta\rho}{\Delta T}$ حساب می‌شود. لازم به ذکر است که تنها مولفه‌ای که در حین کار راکتور تغییر کرده است دمای آب بوده در حالیکه دمای سوخت کماکان ثابت می‌ماند. برای محاسبه $\Delta\rho$ کافیسیت با مراجعه به منحنی کالیبراسیون میله کنترل تنظیمی (شکل (۱-۱۱)) مقدار ρ در هر یک از موقعیت‌های ابتدایی و انتهایی میله کنترل تنظیمی

مشخص می‌شود. از این رو در نهایت مقدار $\Delta\rho$ تعیین شود. واحد α بستگی به اختیار واحدهای مناسب ρ و T دارد. شکل (۱۱-۲) نه تنها مقدار α_T بلکه تغییرات آرام آن را در گستره کاری دمای استخر رآکتور تحقیقاتی MTR نوعی طی یک آزمایش نوعی نشان می‌دهد.

نکته ۱: تغییرات تدریجی محل میله کنترل تنظیمی را طی یکی دو ساعت تکمیل آزمایش ملاحظه و یادداشت کرده تا احیاناً اگر α_T خود در گستره دمایی دارای ساختاری است، آشکار شود.



شکل (۱۱-۱) منحنی کالیبراسیون میله کنترل تنظیمی یک رآکتور MTR نوعی.



شکل (۲-۱۱) تغییرات نوعی ضریب دمایی راکتیویته آب خنک کننده در یک رآکتور MTR نوعی. مقدار متوسط حدود 0.7 Cent/C° .

ب- دمای سوخت

در این مورد اندازه گیری $\alpha_{T_F} = \frac{\Delta\rho}{\Delta T_F}$ ضریب راکتیویته دمایی سوخت مورد نظر می باشد. این آزمایش را می توان در دنباله آزمایش قبلی انجام داده بشرطی که مجال افزایش قدرت وجود داشته باشد. تنها راهی که می توان دمای داخل سوخت را افزایش داد بکمک افزایش قدرت رآکتور است. فرض بر اینست که دمای متوسط سوخت با استفاده از دمای ورود و خروج سیال قابل استخراج است. یعنی با استفاده از رابطه $P = 1.06 \dot{m} C (T_{\text{Core out}} - T_{\text{Core in}})$ که قدرت رآکتور را به دمای متوسط آب در ورود و خروج از قلب مرتبط می سازد (به آزمایش کالیبراسیون قدرت مراجعه شود). ضمناً بطور اصولی از روی این دو دما، می توان \bar{T}_F را نیز استخراج نمود. از این رو در انجام این بخش از آزمایش:

۱. محل میله کنترل تنظیمی را در قدرت ثابت (مثلاً دو مگاوات) یادداشت می کنیم.
۲. دماهای ورود و خروج به قلب و دمای متوسط استخر را درج می کنیم.
۳. سریعاً قدرت را به مقدار بالاتر (مثلاً ۵ MW) رسانیده و محل جدید میله کنترل تنظیمی را یادداشت می کنیم. از روی تغییرات محل میله کنترل تنظیمی مقدار $\Delta\rho$ ناشی از افزایش دمای سوخت بدست می آید.
۴. دماهای جدید ورود و خروج به قلب را یادداشت و \bar{T}_F جدید سوخت را حساب کل ذرات گسیل شده از نمونه در مدت شمارش کنیم.
۵. $\Delta\bar{T}_F$ را با توجه به دمای متوسط سوخت قبل از افزایش قدرت بدست می آوریم.
۶. $\alpha_{T_F} = \frac{\Delta\rho}{\Delta T_F}$ محاسبه می شود.

نکته ۲: شرایط کاری راکتور تحقیقاتی MTR نوعی در این بخش از آزمایش ترجیحاً باید در شرایط پایدار حرارتی باشد. به عبارت دیگر حرارت قلب تخلیه و نهایتاً به مدار ثانویه و به محیط داده شود. در این شرایط ثابت $T_{Pool} \approx$ و هر گونه تغییر در راکتیویته ناشی از تغییر دمای متوسط سوخت خواهد

حال اگر قدرت از ۲ MW به ۵ MW افزایش یابد:

$$T_{Corein} = T_{Pool} = \text{Fix}$$

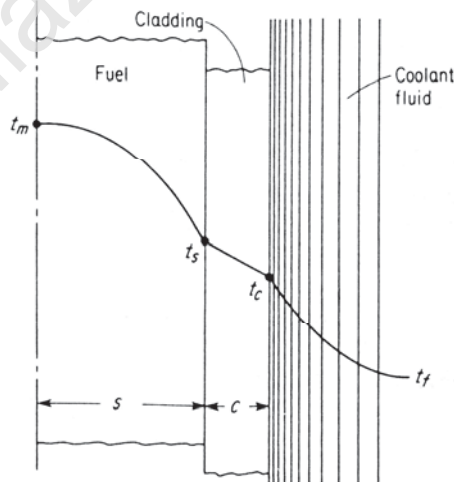
$$T_{Coreout} = \text{نسبت به قبل افزایش یافته}$$

از این رو نسبت به قبل افزایش می یابد.

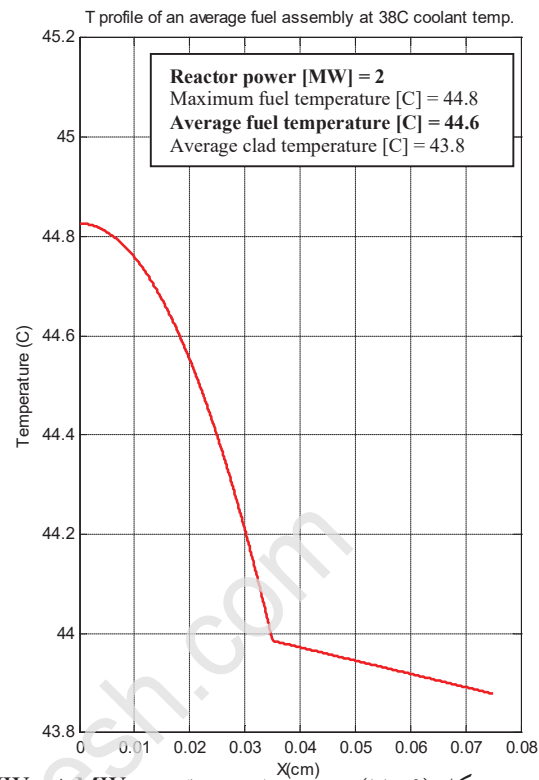
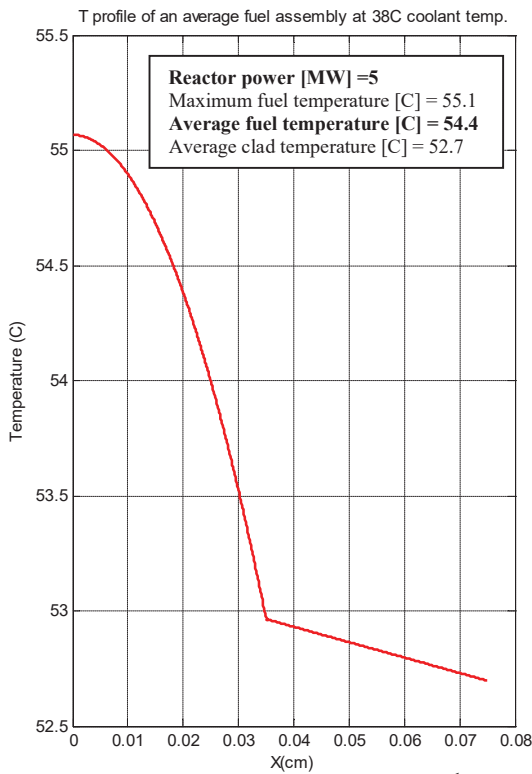
نکته ۳: مولفه دمایی خنک کننده (کند کننده) در اینجا بی تاثیر است زیرا دمای آب ورودی همچنان یکسان و مانند گذشته است. کلاً آبی که قلب را در بر گرفته همچنان همان دمای استخر را داراست. البته صحیح است که آب خروجی از قلب داغ تر شده ولی باید توجه داشت دمای داخل سوخت بسی بیشتر افزایش یافته است.

لازم به ذکر است که تعیین \bar{T}_F در گام چهارم اندکی پیچیده بوده و نیاز به استفاده از منحنی تغییرات دما از مرکز سوخت به خنک کننده دارد. شکل (۱۱-۳) نشان دهنده یک توزیع نوعی دما در توده سوخت، غلاف، و خنک کننده اطراف آنست. با در دست داشتن مشخصات حرارتی و فیزیکی مواد موجود، دمای سطح سوخت و دمای مرکز سوخت و در نتیجه دمای متوسط سوخت قابل محاسبه می باشد. شکل (۱۱-۴) نشان دهنده توزیع نوعی دما در دو قدرت متفاوت (۲ MW و ۵ MW) می باشد. برای این حالت خاص عبارتست از:

$$\Delta \bar{T}_F = 54.4 - 44.6 = 9.8 \text{C}^\circ$$



شکل (۱۱-۳) توزیع نوعی دما در سوخت صفحه ای از مرکز سوخت به خنک کننده.



شکل (۴-۱۱) توزیع دما در دو قدرت ۵ MW و ۲ MW در یک تیغه سوخت رآکتور MTR نوعی.

که معرف تیغه سوخت در شرایط متوسط می باشد.

سوالات

- ۱) در چه فصلی از سال، اندازه گیری α_{T_m} متضمن اطلاعات بیشتری است و چرا؟
- ۲) توقع می رود ضریب دمایی راکتیویته آب در مثبت باشد یا منفی. چرا؟
- ۳) آیا می توان این آزمایش را در روز اول شیفت کاری رآکتور در حالیکه قدرت تثبیت شده است انجام داد؟ چرا؟
- ۴) برای افزایش دقت در آزمایش α_{T_m} چه راه های دیگری را پیشنهاد می کنید.
- ۵) انتظار می رود ضریب دمایی راکتیویته سوخت در مثبت باشد یا منفی. چرا؟
- ۶) چرا در آزمایش ضریب دمایی راکتیویته سوخت، هر گونه تغییر در راکتیویته را نباید ناشی از تغییرات غلظت Sm ، Xe بعلت تغییرات قدرت دانست؟
- ۷) برای تصحیح اثرات هر چند اندک Xe ناشی از افزایش قدرت برای اندازه گیری ضریب دمایی سوخت، چه راه هایی را پیشنهاد می کنید؟ آیا عمل عکس یعنی اندازه گیری در روند کاهش قدرت می تواند پاسخگو باشد؟ چرا و چگونه؟

1. Banerjee, S., Pandey, P. and Singh, T., 2020. Benchmark study of 10 MW th Material Test Reactor by standard deterministic codes. Life Cycle Reliability and Safety Engineering, 9, pp.147-159.
۲. بنویدی. غلامرضا، قریب. مرتضی، اندازه‌گیری شار و پارامترهای کند شدن نوترون‌های یک چشمه آمرسیوم-بریلیم (Am-Be) ۲۰کوری در آب سبک به دو روش تجربی و کد MCNP، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ۱۳۸۴.
۳. حسنی رخ. اشکان، راهنمای استفاده از نرم افزار Labview برای انجام آزمایش Rod Drop، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۳۸۸.
۴. صیفی. سمیه، قریب. مرتضی، طراحی و ساخت یک سامانه مستقل اندازه‌گیری قدرت رآکتور تحقیقاتی تهران بر مبنای واپاشی ^{17}N ، دانشگاه پیام نور، ۱۳۸۸.
۵. مصطفائی. مریم، قریب. مرتضی، بررسی و اجرای یک سامانه ابزار دقیق ^{16}N در رآکتور تحقیقاتی تهران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۳۸۸.
6. Arkani. M, Gharib. M, Hossnirokh. A., Design and application of MTR fuel assemblies in new proposed inverted mode, Nuclear Engineering and Design, Volume 240, 2010, Pages 2981–2987.
7. Arkani. M, Gharib. M, Reactor core power measurement using Cherenkov radiation and its application in TRR, Annals of Nuclear Energy, Volume 36, Issue 7, July 2009, Pages 896-900.
8. Beeley. P. A, Determination of in-core power in low energy research reactors by measurement of N-16 and F-18 in the primary coolant, Journal of Radio analytical and chemistry, Vol. 215, No. 1, 1997, Pages 135-139.
9. Fischer. B, Nitrogen-16 generation and transport and associated shielding requirements in a supercritical-water-cooled reactor, Nuclear Technology, Vol. 147, Aug. 2004, Pages 269-283
10. Khalafi. H, Gharib. M, Installation, calibration and application of incore miniature neutron detector in Tehran research reactor (TRR), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 413, 1998, Pages 374-378.
11. Knoll. G. F., Radiation detection and measurements, 3rd ED, Jhon Wiley & Sons, Inc, 2000.
12. Lamarsh. J.R, Introduction to nuclear reactor theory, Addison - Wesley Pub.Co. Inc. 1966.
13. Profio. Edward. A., Experimental reactor physics, Jhon Wiley & Sons, Inc, 1976.
14. Schultz. M. A., Control of nuclear Reactors and power plants, Mc Grow-Hill Book Co, 1961.
15. Weiss. H, Power measurement and automatic Reactor control by Gamma or Cherenkov radiation, Nuclear Electronics IAEA Bombay, November 1965, IAEA Vienna, 1966.