

ارزیابی تأثیر فرسایش سوخت رآکتور تحقیقاتی تهران بر تعیین چیدمان و تعداد بهینه آشکارسازهای ثابت داخل قلب با استفاده از تئوری اطلاعات

محمدصادق تerman*، نعیم‌الدین مناجی کجوری، حسین خلفی

پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۹/۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۲/۱۴

چکیده

پایش توزیع توان قلب رآکتور، یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها در بهره‌برداری ایمن از رآکتورهای هسته‌ای است. تعداد و چیدمان آشکارسازهای یک سیستم پایش قلب باید به نحوی باشد تا ضمن استخراج بیش‌ترین میزان اطلاعات از حالت قلب رآکتور، تا حد ممکن از گردآوری اندازه‌گیری‌های مشابه و وابسته اجتناب شود. تئوری اطلاعات از کارآمدترین روش‌های تعیین محل و تعداد بهینه ابزارهای اندازه‌گیری است. در این پژوهش، تأثیر عامل فرسایش سوخت رآکتور بر چیدمان بهینه آشکارسازهای ثابت داخل قلب رآکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از تئوری اطلاعات بررسی شده است. مقایسه نتایج حاصل برای دو حالت با و بدون در نظر گرفتن فرسایش سوخت رآکتور نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن فرسایش سوخت در تولید توزیع‌های مختلف شار نوترونی، اطلاعات بیش‌تری از قرائت‌های آشکارسازها قابل استخراج است. همچنین برای تعداد برابر آشکارسازها، چیدمان تعیین شده با در نظر گرفتن فرسایش سوخت، عموماً سهم بیش‌تری از کل اطلاعات موجود در مجموعه داده‌ها را جمع‌آوری می‌کند. با استفاده از چیدمان بهینه تعیین شده می‌توان بیشینه اطلاعات را از حداقل تعداد آشکارساز داخل قلب به دست آورد. این امر موجب کاهش قابل توجه هزینه ساخت، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری برای آشکارسازهای داخل قلب رآکتور خواهد شد که برای پایش شار نوترونی به کار می‌روند.

کلیدواژه‌ها: رآکتور تحقیقاتی، آشکارساز ثابت داخل قلب، جایابی بهینه، تئوری اطلاعات، فرسایش سوخت

Burn up effect on optimal placement of fixed in-core detectors for Tehran research reactor using information theory

M.S. Terman*, N. Mataji Kojouri, H. Khalafi

Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

Research Article

Received 23.11.2019, Accepted 4.3.2020

Abstract

Monitoring the power distribution of reactor core is one of the most challenging issues in the safe operation of nuclear reactors. The Number and arrangement of detectors in a core monitoring system should be determined in a way that maximum amount of information about core states is extracted, while avoiding duplication of similar and correlated measurements. Information theory is the best method to deal with the problem of optimal number and placement of instruments. In this paper, the effects of reactor fuel burn-up on the optimal number and arrangement of in-core fixed detectors of Tehran Research Reactor has been investigated using information theory. Comparison the results for the two modes, with and without consideration of the fuel burn-up, shows that by considering fuel burn-up in the placement problem, more information can be extracted from measurements of the detectors. Also, for an equal number of detectors, determined arrangement by considering fuel burn-up, mostly provide larger share of total available information in the data set. Using the optimal arrangement, maximum information can be obtained from minimum number of the detectors, which leads to considerable decrease in the cost of construction, implementation, operation, and maintenance of the in-core detectors for monitoring of neutron flux.

Keywords: Research reactor, Fixed in-core detector, Optimal placement, Information theory, Fuel burn-up

*Email: ms.terman1978@gmail.com

۱. مقدمه

خارجی (جمع‌کننده)^۸ تشکیل شده‌اند که ساختار استوانه‌ای هم‌محور^۹ دارند [۷]. الکتروود داخلی معمولاً از رادیم، کبالت، هافنیم، نقره و ... ساخته می‌شود و با جذب نوترون، ذرات بتا گسیل می‌کند [۷، ۸]. تعداد آشکارسازهای مورد استفاده در هر سیستم با توجه به ملاحظات اقتصادی، محدودیت‌های مکانیکی، هزینه‌های بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری بایستی محدود بوده [۹] و از بیشینه بازده آشکارسازها استفاده شود [۱۰]. از این رو لازم است محل قرارگیری آشکارسازها به نحوی بهینه‌سازی شود که علاوه بر بیشینه کردن مقدار اطلاعات دریافتی از هر آشکارساز، از تکرار اطلاعات مشابه نیز اجتناب شود [۱۱].

هدف از انجام این پژوهش ارزیابی تأثیر فرسایش سوخت رآکتور تحقیقاتی تهران بر تعیین چیدمان و تعداد بهینه آشکارسازهای ثابت داخل قلب با استفاده از تئوری اطلاعات است. این پژوهش در قالب پروژه طراحی سیستم نگاشت برخط شار برای رآکتور تحقیقاتی تهران انجام شده است. سایر مطالب ارائه‌شده در این مقاله به ترتیب زیر است: در بخش ۲ پس از مروری بر روش‌های بهینه‌سازی چیدمان ابزارهای اندازه‌گیری، روش تئوری اطلاعات به‌طور خلاصه معرفی شده است. در بخش ۳ فرایند مدل‌سازی قلب رآکتور تهران به‌منظور تولید داده‌های قرائت آشکارسازها تشریح خواهد شد. در بخش ۴ نتایج به‌دست آمده است از تعیین چیدمان و تعداد بهینه آشکارسازها در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن فرسایش سوخت با هم مقایسه شده و مورد بحث قرار خواهند گرفت. در نهایت، بخش ۵ نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

۲. کاربرد تئوری اطلاعات در تعیین چیدمان و تعداد بهینه ابزارهای اندازه‌گیری

روش‌های به‌کار گرفته‌شده در تعیین چیدمان بهینه ابزارهای اندازه‌گیری را به‌صورت کلی می‌توان به سه دسته روش‌های مبتنی بر کمینه کردن خطای تخمین پارامتر [۱۲، ۱۳]، روش‌های مبتنی بر واریانس [۱۴، ۱۵] و روش‌های مبتنی بر تئوری اطلاعات [۱۶-۱۸] تقسیم کرد. در این میان، روش‌های

پایش توزیع توان قلب یکی از موضوعات مهم در ایمنی رآکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی و قدرت است [۱]. توزیع شار نوترونی اساسی‌ترین پارامتر عملکردی برای ارزیابی شرایط کاری و حاشیه ایمنی رآکتور است و برای تعیین پارامترهایی نظیر DNBR^۱، فاکتور قله توان (PPF)^۲ و انحراف محوری^۳ توان به‌کار می‌رود. با توجه به‌وجود حرکت میله‌های کنترل، فرسایش سوخت و مکانیزم‌های متعدد بازخورد^۴ در رآکتورهای هسته‌ای، توزیع توان (شار نوترونی) داخل قلب به‌طور پیوسته و پیچیده‌ای تغییر می‌کند و به‌دست آوردن آن به‌صورت تئوری با پیچیدگی‌های زیادی همراه است. از طرفی محل وقوع پدیده‌های مورد علاقه در قلب رآکتورها، ممکن است منطبق با محل آشکارسازها نباشد؛ از این رو مشاهده پدیده‌هایی از این دست مستلزم بازسازی توزیع شار است. اغلب سیستم‌های کنترل و پایش رآکتورهای هسته‌ای دارای قسمتی به‌نام نگاشت برخط شار^۵ نظیر سیستم BEACON [۲] و GNF-ARGOS [۳] می‌باشند که با بازسازی توزیع شار و توان رآکتور در پی دستیابی به ارتقاء ایمنی، کالیبره نمودن آشکارسازها و بهینه سازی مصرف سوخت هستند. از قرائت مجموعه‌ای از آشکارسازها، علاوه بر اندازه‌گیری مقادیر محلی، می‌توان برای تخمین پارامترهای کلی رآکتور نظیر توان تولیدی نیز استفاده کرد. برای مثال، استفاده از این خصوصیت در رآکتورهای با آب سنگین تحت‌فشار (PHWR) که دارای قلب بزرگ و شار نوترونی با وابستگی ضعیف هستند، بسیار مفید است [۴]. در رآکتورهای تحقیقاتی نیز بازسازی توزیع شار نوترون برای طراحی آزمایش‌ها و هم‌چنین افزایش بهره‌وری و ایمنی رآکتور بسیار مهم است.

در حال حاضر، اغلب سیستم‌های نگاشت شار به‌دلیل صرفه اقتصادی و ابعادی، با استفاده از آشکارسازهای خودتوان نوترونی^۶ پیاده‌سازی می‌گردند [۵، ۶]. آشکارسازهای SPND، از الکتروود داخلی (گسیلنده^۷)، لایه میانی عایق و الکتروود

1. Departure from Nucleate Boiling Ratio
2. Power Peaking Factors
3. Axial Offset
4. Feedback
5. Online Flux Mapping (OFM) System
6. Self-Power-Neutron-Detector (SPND)
7. Emitter

8. Collector
9. Coaxial

در جایابی بهینه آشکارسازها، پس از تعریف تابع هدف (رابطه ۱)، لازم است مقدار آن بیشینه شود. این کار عمدتاً توسط الگوریتم‌های ابتکاری^۳ انجام می‌شود تا ضمن حرکت به سمت بیشینه سراسری^۴، از گیر کردن در بیشینه‌های محلی^۵ جلوگیری شود. با توجه به اینکه برای جایابی بیش‌تر از یک آشکارساز، مسئله به‌صورت بهینه‌سازی چند متغیره می‌شود، از این‌رو می‌توان از الگوریتم ژنتیک^۶ (GA) برای جستجوی حالت بهینه استفاده کرد. بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک مبتنی بر فرایند انتخاب یا تکامل زیستی است و در آن راه‌حل‌های ممکن برای مسئله به‌صورت ژن‌هایی در داخل کروموزوم‌ها ذخیره می‌شوند. در فرایند بهینه‌سازی، انتخاب جواب‌های بهینه با انتخاب کروموزوم‌های غالب در طی جمعیت‌ها و نسل‌های مختلف با در نظر گرفتن عامل جهش صورت می‌گیرد [۲۵].

۳. تولید توزیع‌های مختلف شار نوترونی رآکتور تهران با استفاده از کد نوترونیک MCNP

برای تعیین تعداد و محل قرارگیری بهینه آشکارسازهای داخل قلب رآکتور تهران، لازم است مجموعه‌ای از داده‌های توزیع شار در قلب رآکتور برای حالت‌های مختلف ورود میله‌های کنترل و فرسایش سوخت تهیه شود. توزیع شار نوترونی در قلب رآکتور تحقیقاتی تهران که از نوع استخری است، می‌تواند در اثر عوامل زیر تغییر شکل یابد: (۱) میزان ورود میله‌های کنترل، (۲) مصرف سوخت و (۳) توزیع سموم نوترون و نیا هسته‌ها. با توجه به پیچیدگی‌های وارد شده به مسئله برای شبیه‌سازی شرایط گذرای قلب، در این پژوهش، مسئله به حالات عملکرد پایا محدود شده است. لازم به ذکر است که اثر نیا هسته‌ها دارای ثابت زمانی هم‌مرتبه با ثابت زمانی آشکارساز (از مرتبه دقیقه) بوده و بنابراین با پایدار شدن قرائت آشکارسازها، اثر نیا هسته‌ها نیز از بین می‌رود. در مورد اثر سموم نوترونی (نظیر زینان) نیز با توجه به کم بودن سطح شار در رآکتورهای تحقیقاتی (در مقایسه با رآکتورهای قدرت) و هم‌چنین یکنواختی توزیع آن در قلب (به نسبت اثر ناحیه‌ای میله‌های کنترل)، صرف‌نظر کردن از آن منطقی است.

مبتنی بر تئوری اطلاعات مناسب‌ترین روش برای تعیین چینش و تعداد بهینه ابزارهای اندازه‌گیری هستند [۱۹]. علی‌رغم اینکه نظریه تئوری اطلاعات سال‌ها پیش توسط Shannon [۲۰] برای کاربرد در شناسایی بیشینه ظرفیت کانال‌های انتقال اطلاعات در سیستم‌های مخابراتی ارایه شده است، تا به حال از پرکاربردترین روش‌های حل مسایل از نوع انتخاب تعداد و محل بهینه حسگرها در زمینه‌های مختلف نظیر سیستم‌های انتقال آب [۱۹]، کانال‌های حمل و نقل آبی [۲۱]، سیستم‌های پایش آلودگی هوا [۲۲] و سیستم‌های تهویه مطبوع و کنترل دما [۲۳] به شمار می‌رود. اگر $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ یک متغیر تصادفی با احتمال وقوع پیشامدهای $\{p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n)\}$ باشد، محتوای اطلاعاتی این منبع اطلاعاتی را می‌توان با تابع زیر نشان داد [۲۰]:

$$H(X) = -k \cdot \sum_{i=1}^n p(x_i) \log p(x_i) \quad (1)$$

$H(X)$ تابع آنتروپی^۱ یا Shannon برای متغیر تصادفی X است و بیان‌گر میزان عدم‌یقین^۲ نسبت به نتایج ممکن است. هم‌چنین k یک عدد ثابت است. لازم به ذکر است که آنتروپی به توزیع متغیر X وابسته است و رابطه‌ای با مقدار آن ندارد. در حالت کلی، هر چه احتمال وقوع یک پیشامد موردنظر بزرگ‌تر باشد (محتمل‌تر)، میزان اطلاعی که از وقوع آن کسب خواهیم کرد، کم‌تر خواهد شد و هر چقدر احتمال وقوع پیشامد کم‌تر باشد (دور از انتظارتر)، میزان اطلاعات به‌دست آمده از وقوع آن، بیش‌تر خواهد بود.

با توجه به اینکه تابع $p(x_i) \log_m \frac{1}{p(x_i)}$ به ازای $p(x_i) \in [0, 1]$ یک تابع مثبت است، بنابراین $H(X)$ نیز یک تابع مثبت خواهد بود و مقدار بیشینه آن در حالت توزیع یکنواخت احتمالات $p(x_i)$ است. هم‌چنین اگر پایه لگاریتم ۲ باشد، واحد $H(X)$ برابر bit و در صورتی که پایه لگاریتم e باشد، واحد آن nat است [۲۴].

3. Heuristic
4. Global
5. Local
6. Genetic Algorithm

1. Entropy
2. Uncertainty

صورتی که هر میله‌ی کنترل n حالت داشته و حالات مصرف سوخت با m نشان داده شود، برای اجرای کامل نیاز به n^{5m} اجرا خواهد بود که در این پژوهش به ۲۰۴۸ اجرا کاهش یافته است.

با توجه به ابعاد مؤثر قلب در راستای x و y که به ترتیب برابر ۷۲ cm و ۴۶ cm می‌باشند، دقت خروجی مش‌تالی برابر با ۱ سانتی‌متر در هر راستا انتخاب شده است. لازم به ذکر است که کاهش این تفکیک‌پذیری منجر به کاهش دقت در نمایش شار بازسازی شده خواهد شد. در حالی که افزایش آن با ثابت نگه‌داشتن تعداد ذرات استفاده‌شده برای اجرای کد، با افزایش اثرات آماری در پایه‌ی شار هر حالت، علاوه‌بر وارد کردن خطای آماری در تولید پایه‌ها، تأثیر منفی در کیفیت شار بازسازی شده و تشخیص حالت فعلی رآکتور دارد.

در کد مونت کارلویی MCNP در حالت KCODE که برای شبیه‌سازی مسایل بحرانیّت مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای تخمین ضریب تکثیر و سپس برآورد تالی‌های لازم در توزیع شار، از روش تکراری مشابه با روش تکرار قدرت^۳ استفاده می‌شود. بدین منظور، کد با شروع از مقدار اولیه‌ای برای ضریب تکثیر که در ورودی از کاربر گرفته می‌شود و به‌صورت پیش‌فرض برابر با ۱ است و هم‌چنین چشمه اولیه‌ای که به صورت SDEF یا KSRC قابل اعمال است، با تعداد معینی ذره اولیه به‌عنوان تحقق‌های آماری مسئله، شروع به شبیه‌سازی مونت کارلویی کرده و در هر سیکل براساس الگوریتمی به توزیع شار بحرانی و ضریب تکثیر حقیقی سامانه نزدیک‌تر می‌شود. با توجه به این که گرفتن خروجی از کدهای مونت-کارلویی براساس روش تالی است (برآورد کمیت از طریق تعداد قابل‌قبولی تحقق آماری)، باید در حین نزدیک شدن چشمه‌ی بحرانیّت به مقدار صحیح آن، تالی‌گیری نیز انجام شود. از آنجا که سیکل‌های ابتدایی اجرای کد احتمالاً از حالت بحرانیّت فاصله دارند، برای کاهش خطای تالی‌ها آمارگیری از یک سیکل به بعد انجام می‌شود. به این سیکل‌ها که صرفاً در همگرایی به چشمه بحرانی و ضریب تکثیر تأثیر دارند و در محاسبه‌ی تالی استفاده نمی‌شوند، سیکل‌های غیرفعال گویند. بدیهی است که در سیکل‌های فعال هم همگرایی به بحرانیّت صورت می‌گیرد و

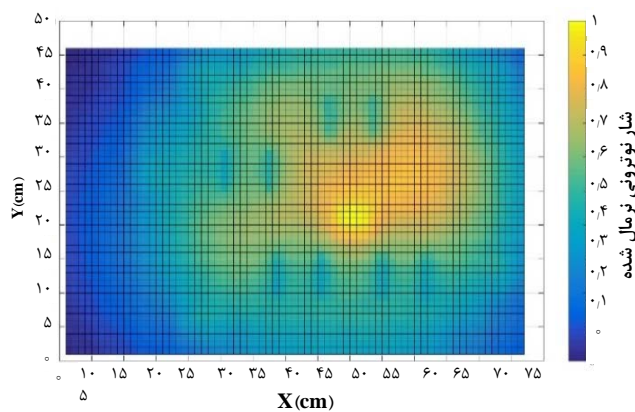
با صرف‌نظر کردن از توزیع سموم نوترون و نپاهسته‌ها، مجموعه داده‌های توزیع شار نوترونی در قلب رآکتور با استفاده از اثرات میزان ورود و خروج میله‌های کنترل و مصرف سوخت شبیه‌سازی و تولید شده‌اند. برای شبیه‌سازی تأثیر میزان ورود میله‌های کنترل بر توزیع شار رآکتور تحقیقاتی تهران متشکل از ۴ میله ایمنی (Safety rod) و ۱ میله تنظیم دقیق (Regulation rod)، از کد ترابرد مونت کارلویی MCNPX2.7E استفاده شده است. با تغییر میزان ورود میله‌های کنترل در هر بار اجرای کد در حالت KCODE، توزیع شار با کارت TMESH به‌دست می‌آید. با توجه به منابع محاسباتی موجود و هم‌چنین در نظر گرفتن این نکته که رآکتور تهران در مجموع دارای ۵ میله کنترل است، ۱۰۲۴ توزیع شار نوترونی برای ابتدای دوره بهره‌برداری^۱ از سوخت رآکتور، با در نظر گرفتن ۴ حالت برای میزان ورود هر میله کنترل به قلب، تولید شده است. همه شبیه‌سازی‌های مورد نیاز در توان نامی رآکتور تحقیقاتی تهران انجام شده و از وابستگی شکل شار به توان رآکتور در مقابل وابستگی به میزان ورود میله‌های کنترل و فرسایش سوخت صرف‌نظر شده است.

برای تهیه کردن داده‌های توزیع شار نوترونی با در نظر گرفتن مصرف سوخت، کافی است ابتدا نوع هسته‌ها و مقدار آنان در هر مجتمع سوخت از قلب برحسب میزان مصرف سوخت مشخص شود. برای این منظور، با استفاده از میزان مصرف سوخت (برحسب MWD) و موادی که باید سوزانده شوند، کد MCNP با کارت BURN (در مد بحرانیّت) و بدون مش‌تالی در حالت نامی میله‌های کنترل اجرا می‌شود. هدف از این اجرا، به‌دست آوردن تغییر ایزوتوپی سوخت‌ها در فرایند مصرف سوخت است. با ایجاد خروجی MCNP (که شامل ترکیب جدید هسته‌های موجود در سوخت است)، آرایه‌ای متشکل از نوع و درصد ایزوتوپی هر سوخت تشکیل می‌شود. با اعمال آرایه مواد جدید، ورودی مناسب کد MCNP برای هر حالت از قرارگیری میله‌های کنترل تولید شده و فرایندی مشابه با تولید داده‌های ابتدای دوره بهره‌برداری، برای انتهای دوره بهره‌برداری^۲ از سوخت نیز تکرار شده و ۱۰۲۴ توزیع شار نوترونی دیگر نیز ایجاد شده است. لازم به ذکر است در

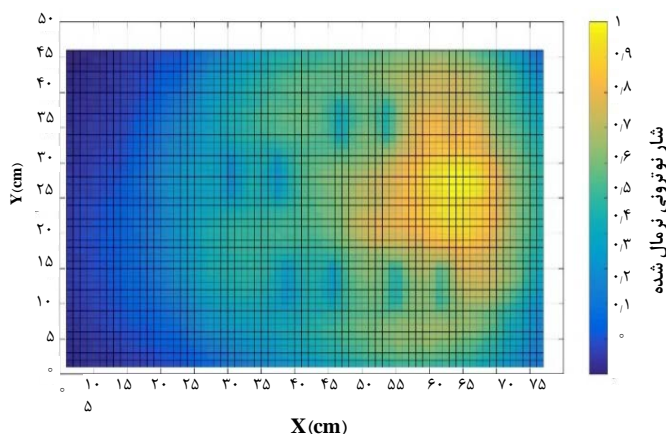
1. Beginning of Cycle (BOC)
2. End of Cycle (EOC)

3. Power Iteration Method

انتخاب شود تا علاوه بر دور بودن از تغییرات غیرخطی اولیه، به میزان کافی نیز از محدوده اشباع اطلاعات دور باشد. پس از تعیین تقسیم‌بندی مناسب برای احتمال قرائت‌های مختلف آشکارسازها، تعیین تعداد و جایابی بهینه آشکارسازها برای قلب رآکتور تهران انجام می‌گیرد. نتیجه دیگری که از این نوع تحلیل حساسیت می‌توان گرفت این است که کل آنتروپی موجود در این مجموعه از اطلاعات برای حالت BOC برابر با 6.932 nat و برای مجموع دو حالت BOC و EOC برابر با 7.625 nat است. با جانمایی بهینه آشکارسازها می‌توان بیشترین مقدار از این اطلاعات موجود را با استفاده از کم‌ترین تعداد آشکارساز جمع‌آوری کرد.



(الف)



(ب)

شکل ۱. توزیع شار در قلب رآکتور تهران در حالت توان نامی برای (الف) شروع دوره بهره‌برداری و (ب) پایان دوره بهره‌برداری.

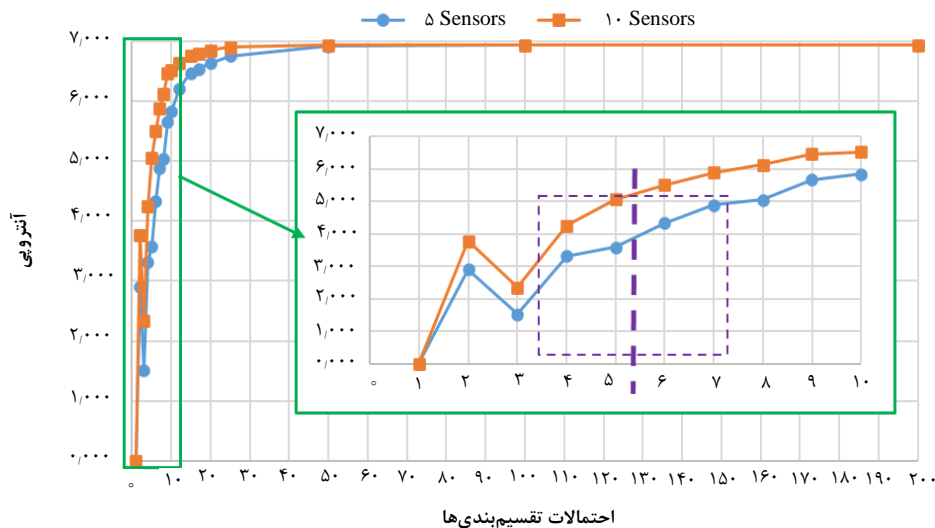
هم تالی‌ها به‌روزرسانی می‌شوند. به‌عنوان نمونه، توزیع شار محاسبه‌شده در مقطع افقی قلب رآکتور تحقیقاتی تهران در شکل ۱ برای توان نامی رآکتور در BOC و EOC نشان داده شده است.

۴. نتایج چیدمان بهینه آشکارسازهای ثابت داخل قلب TRR با استفاده از تئوری اطلاعات

برای تعیین تعداد و چیدمان بهینه آشکارسازهای SPND در قلب رآکتور تهران، مجموعه‌ای از داده‌های توزیع شار در قلب رآکتور برای حالت‌های مختلف ورود میله‌های کنترل در BOC و EOC با استفاده از کد MCNP مطابق قسمت قبل تهیه شد. جهت محاسبه اطلاعات (آنتروپی) موجود در این مجموعه داده‌ها نیاز است که قرائت هر آشکارساز در بازه‌های محدودی گسسته‌سازی شود. توزیع مقادیر به‌دست آمده برای شار در حالت‌های مختلف ورود میله‌های کنترل، به‌صورت احتمال قرائت SPND برای هر بازه تعریف شده است.

اگر قرائت آشکارسازها در تعداد بازه خیلی کم (اندازه بزرگ‌تر بازه‌ها) گسسته‌سازی شود، میزان اطلاعات به‌دست آمده از آشکارساز کم بوده و نیاز به تعداد زیادی از آشکارسازها خواهد بود. از طرفی اگر تعداد بازه انتخابی خیلی زیاد باشد، توزیع تقریباً یکنواختی برای تمام بازه‌ها ایجاد خواهد شد و تمامی اطلاعات موجود در مجموعه داده با یک آشکارساز هم قابل برداشت خواهد بود. به‌عبارت دیگر، اندازه بازه‌ها بیانگر دقت و توان تفکیک حالت‌های مختلف توسط آشکارساز است. استفاده از تعداد بسیار زیاد بازه‌ها، به‌منزله افزایش بسیار زیاد تفکیک‌پذیری و استفاده از یک آشکارساز ایده‌آل است که توانایی تفکیک تمام حالت‌ها را به تنهایی دارد. نتایج تحلیل حساسیت اطلاعات به‌دست آمده از مجموعه داده‌های شار، نسبت به انتخاب تعداد بازه برای گسسته‌سازی توزیع احتمال قرائت آشکارسازها در شکل ۲ نشان داده شده است.

بهتر است تعداد بازه برای تعیین تعداد و چیدمان مناسب آشکارسازها (نقطه انتخابی برای تقسیم‌بندی احتمالات) ۵ عدد



شکل ۲. تغییرات آنتروپی به ازای تعداد تقسیم‌بندی‌های مختلف برای توزیع احتمالات قرائت ۵ و ۱۰ آشکارساز.

۲.۴ تعیین تعداد و محل آشکارسازها با در نظر گرفتن فرسایش سوخت (داده‌های BOC و EOC)

در این قسمت، از تمام داده‌های توزیع شار نوترونی (BOC و EOC) به منظور تعیین چیدمان آشکارسازها استفاده شده است. مشابه قسمت قبل، چیدمان ۲ تا ۲۰ آشکارساز در قلب راکتور تهران با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین شده و در شکل ۴ نشان داده شده است.

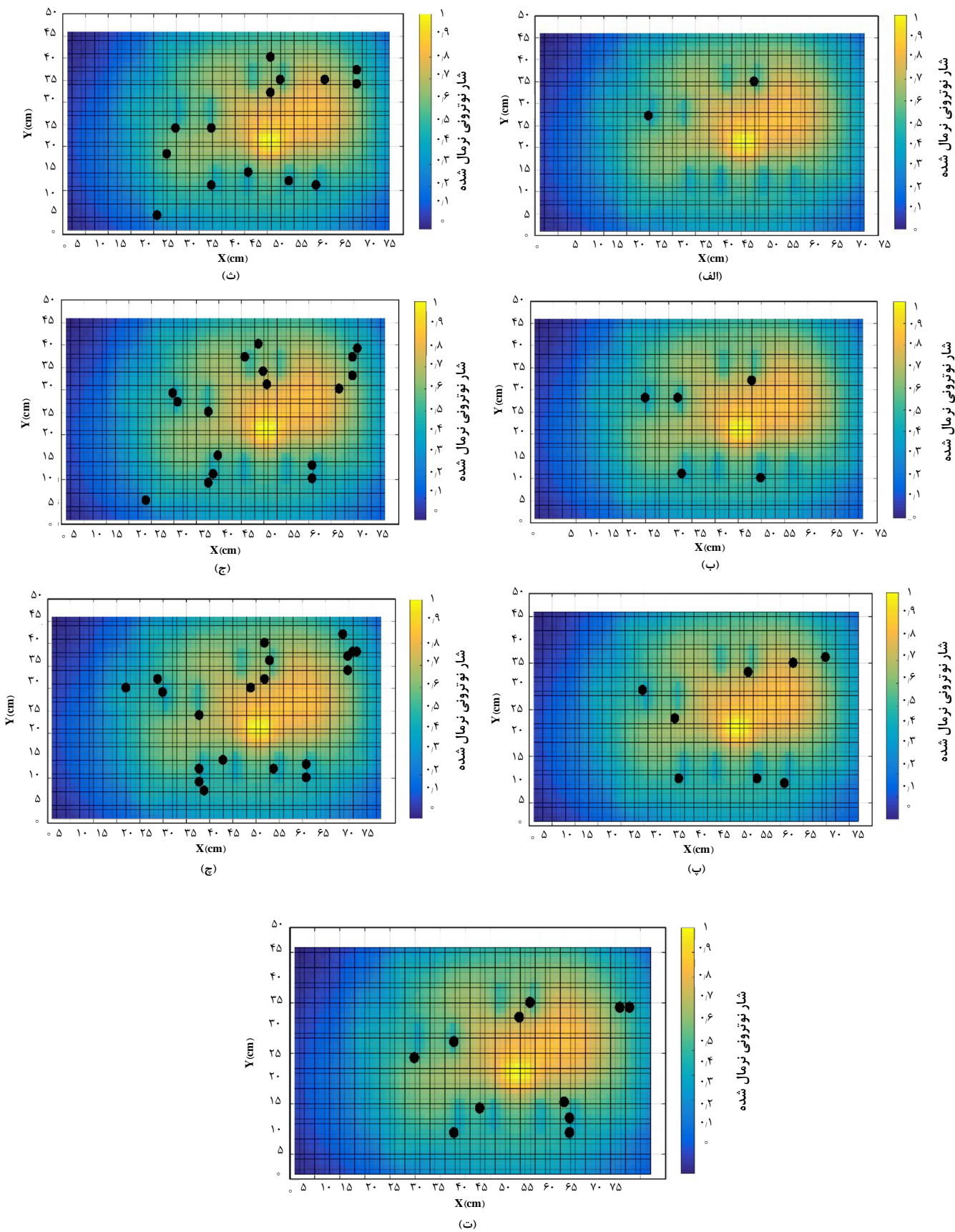
۲.۴ مقایسه نتایج حاصل از چینش آشکارسازها با و بدون در نظر گرفتن فرسایش سوخت

نتایج حاصل از چیدمان بهینه ۲ تا ۲۰ آشکارساز SPND در قلب راکتور تهران در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن عامل فرسایش سوخت در جدول ۱ گزارش شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در تعداد مساوی از آشکارسازها، با در نظر گرفتن عامل فرسایش سوخت راکتور، عموماً سهم بیشتری از کل اطلاعات موجود در مجموعه داده‌ها قابل استخراج است. دلیل این پدیده می‌تواند توزیع پراکنده‌تر آشکارسازهایی باشد که با در نظر گرفتن عامل فرسایش سوخت چیده شده‌اند (شکل ۳ و ۴). چنان‌که در قسمت پیشین نیز اشاره شد، تمام اطلاعات موجود (آنتروپی کل) در مجموعه داده‌های BOC و EOC تقریباً ۱۰٪ بیشتر از همه اطلاعات موجود در فقط داده‌های BOC است. در تعداد مساوی از آشکارسازهای SPND نیز همین مقدار افزایش آنتروپی در اطلاعات به دست آمده از آشکارسازهایی که با مجموعه داده‌های BOC و EOC چیده شده‌اند، نسبت به آشکارسازهایی که فقط با داده‌های BOC چیده شده‌اند، مشهود است.

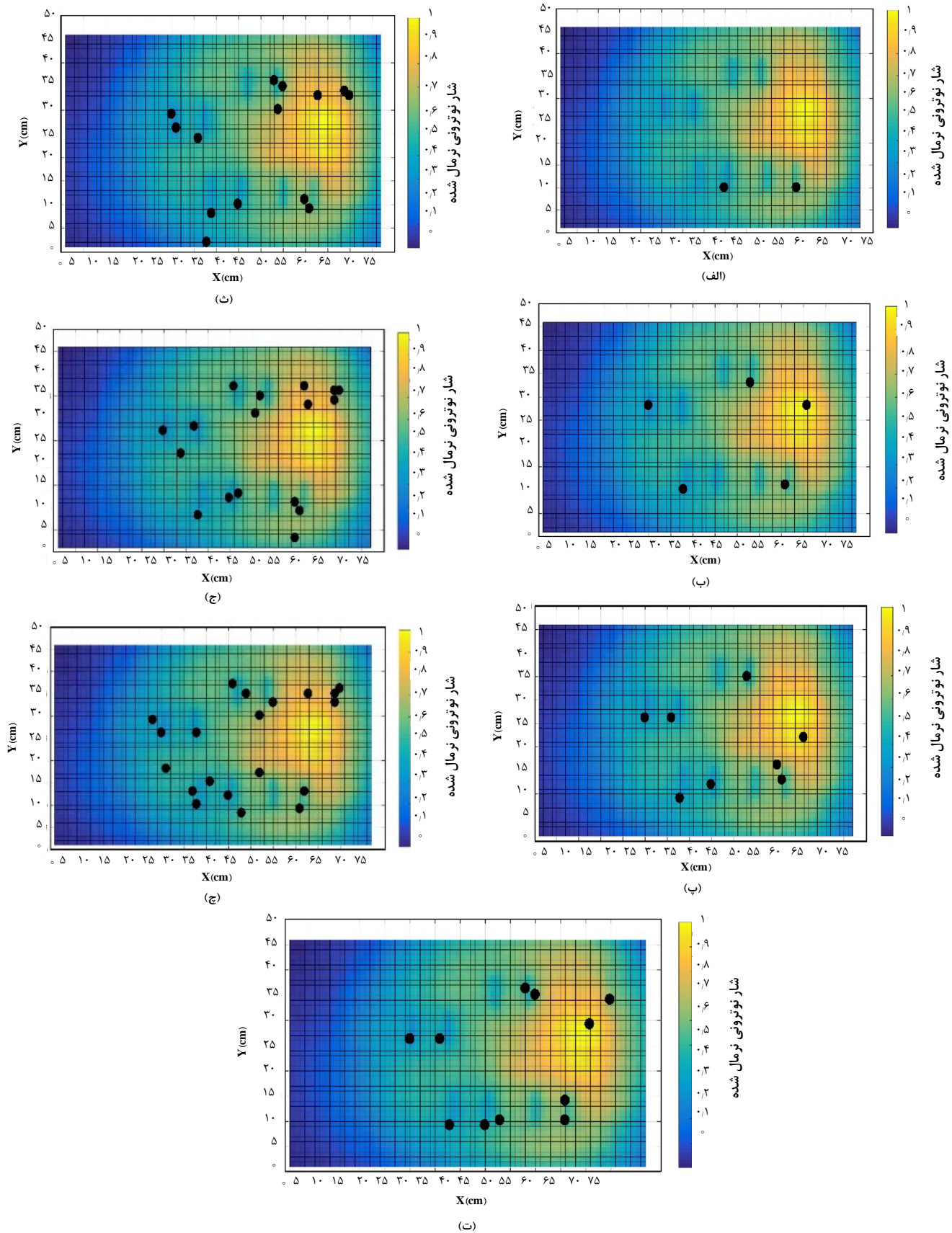
به منظور ارزیابی میزان تأثیر فرسایش سوخت، در ادامه تعیین تعداد و چیدمان بهینه آشکارسازهای SPND در دو حالت زیر انجام شده و با هم مقایسه شده‌اند: (۱) چیدمان بهینه آشکارسازها فقط با استفاده از داده‌های BOC (۱۰۲۴) توزیع شار نوترونی) و (۲) چیدمان بهینه آشکارسازها با استفاده از داده‌های BOC و EOC (۲۰۴۸) توزیع شار نوترونی).

۱.۴ تعیین تعداد و محل آشکارسازها بدون در نظر گرفتن فرسایش سوخت (فقط داده‌های BOC)

برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی، به الگوریتم بهینه‌سازی نیاز است. الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های ابتکاری است و از گرادیان تابع هزینه استفاده نمی‌کند، ولی باز هم احتمال گیر کردن آن در کمینه‌های محلی وجود دارد. از این رو بهینه‌سازی چیدمان هر تعداد از آشکارسازها در ۱۰۰ حالت با تنظیمات مختلف الگوریتم ژنتیک انجام شده و چیدمان با بیش‌ترین میزان اطلاعات، به عنوان چیدمان بهینه برای آن تعداد از آشکارسازها انتخاب می‌شود. جهت تعیین تعداد بهینه آشکارسازها، لازم است چیدمان‌ها از ۲ تا ۲۰ آشکارساز بر اساس تئوری اطلاعات انجام شود. موقعیت نسبی آشکارسازها در قلب برای برخی چیدمان‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است. این چیدمان‌ها بدون در نظر گرفتن عامل فرسایش سوخت و فقط با استفاده از داده‌های توزیع شار نوترونی برای BOC به دست آمده‌اند.



شکل ۳. محل قرارگیری آشکارسازها در حالت‌های الف) ۲ آشکارساز، ب) ۵ آشکارساز، پ) ۸ آشکارساز، ت) ۱۱ آشکارساز، ث) ۱۴ آشکارساز، ج) ۱۷ آشکارساز، چ) ۲۰ آشکارساز.



شکل ۴. محل قرارگیری آشکارسازها در حالت‌های الف) ۲ آشکارساز، ب) ۵ آشکارساز، پ) ۸ آشکارساز، ت) ۱۱ آشکارساز، ث) ۱۴ آشکارساز، ج) ۱۷ آشکارساز، چ) ۲۰ آشکارساز.

جدول ۱. تغییرات آنتروپی برای اطلاعات به دست آمده از چیدمان تعداد مختلف آشکارساز و میزان سهم آن‌ها از آنتروپی کل

تعداد آشکارسازهای SPND	چیدمان بدون در نظر گرفتن فرسایش سوخت (BOC)		چیدمان با در نظر گرفتن فرسایش سوخت (EOC و BOC)	
	آنتروپی چیدمان بهینه	سهم از کل آنتروپی (%)	افزایش آنتروپی نسبت به تعداد قبلی (%)	آنتروپی چیدمان بهینه
۲	۲,۰۷۴۳	۲۹,۹۳	-	۲۹,۹۴
۳	۲,۸۹۸۵	۴۱,۸۲	۲۸,۴۳	۴۲,۱۷
۴	۳,۵۷۴۷	۵۱,۵۷	۱۸,۹۲	۵۱,۲۲
۵	۳,۹۷۴۲	۵۷,۳۳	۱۰,۰۵	۵۹,۹۳
۶	۴,۴۲۱۶	۶۳,۷۹	۱۰,۱۲	۶۴,۸۶
۷	۴,۷۰۵۴	۶۷,۸۸	۶,۰۳	۶۹,۷۶
۸	۴,۹۷۱۵	۷۱,۷۲	۵,۳۵	۷۳,۴۹
۹	۵,۳۳۲۴	۷۶,۹۳	۶,۷۷	۷۷,۱۸
۱۰	۵,۵۷۱۱	۸۰,۳۷	۴,۲۸	۸۰,۳۷
۱۱	۵,۶۷۲۷	۸۱,۸۴	۱,۷۹	۸۳,۱۱
۱۲	۵,۷۵۱۰	۸۲,۹۷	۱,۳۶	۸۵,۹۳
۱۳	۵,۹۴۰۱	۸۵,۷۰	۳,۱۸	۸۶,۰۲
۱۴	۶,۰۱۲۶	۸۶,۷۴	۱,۲۱	۸۸,۱۱
۱۵	۶,۰۹۹۳	۸۷,۹۹	۱,۴۲	۸۹,۵۷
۱۶	۶,۱۷۰۱	۸۹,۰۱	۱,۱۵	۹۱,۰۵
۱۷	۶,۳۲۵۶	۹۱,۲۶	۲,۴۶	۹۱,۸۴
۱۸	۶,۳۹۶۳	۹۲,۲۸	۱,۱۱	۹۲,۰۶
۱۹	۶,۴۲۵۳	۹۲,۷۰	۰,۴۵	۹۲,۹۶
۲۰	۶,۵۴۲۸	۹۴,۳۹	۱,۸۰	۹۴,۱۴

داخل قلب به طور پیوسته ضروری است. علاوه بر این، اطلاع از نحوه توزیع توان در حالت‌های مختلف رآکتور، می‌تواند تأثیر به سزایی در بهینه‌سازی مصرف سوخت داشته باشد. تعداد آشکارسازهای مورد استفاده در سیستم‌های نگاشت شار، بنا به ملاحظات اقتصادی، محدودیت‌های مکانیکی، دسترسی محدود، تعمیرات و نگهداری محدود می‌گردد و موجب می‌شود که در بیش‌تر نقاط مهم نتوان از ابزارهای اندازه‌گیری استفاده کرد. از این‌رو لازم است چیدمان آشکارسازهای داخل قلب به گونه‌ای تعیین گردد که بیشینه اطلاعات را بتوان از محیط اطراف دریافت کرد.

در این پژوهش چیدمان و تعداد بهینه برای آشکارسازهای ثابت داخل قلب یک رآکتور تحقیقاتی با استفاده از تئوری اطلاعات تعیین شده و تأثیر عامل فرسایش سوخت رآکتور بر آن مطالعه شده است. برای تولید مجموعه داده‌های توزیع شار نوترونی در ابتدا و انتهای دوره بهره‌برداری سوخت رآکتور تحقیقاتی تهران، از کد MCNP و برای بهینه‌سازی محل قرارگیری آشکارسازهای SPND در قلب از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. مقایسه نتایج حاصل برای دو حالت با و

برای انتخاب تعداد بهینه آشکارسازها نیز می‌توان معیار جمع‌آوری $90 \pm 2\%$ از کل اطلاعات موجود در مجموعه داده‌ها به همراه افزایش قابل توجه (بیش از ۲٪) در آنتروپی نسبت به تعداد قبلی آشکارسازها را تعریف کرد. در این صورت تعداد بهینه بدون در نظر گرفتن عامل فرسایش سوخت، ۱۷ آشکارساز SPND خواهد بود؛ در حالی که با در نظر گرفتن عامل فرسایش سوخت، ۱۴ آشکارساز SPND نیز همان معیار را برآورده خواهد کرد. در نهایت لازم به ذکر است که چیدمان به دست آمده در حالت اول، در طی فرسایش سوخت دیگر حالت بهینه را نخواهد داشت، ولی چیدمان با در نظر گرفتن فرسایش سوخت با وجود حجم محاسبات بالاتر، منجر به نتایج بهتر در مقایسه با چیدمان بدون در نظر گرفتن فرسایش سوخت می‌شود.

۵. جمع‌بندی

تعیین پارامترهایی نظیر DNBR، فاکتور قله توان و انحراف محوری توان، رابطه مستقیم در کارکرد ایمن رآکتور دارد. از این‌رو برای اطمینان از کارکرد ایمن رآکتور، پایش توزیع قدرت

5. K. Lee, C.H. Kim, *The Least-Squares Method for Three-Dimensional Core Power Distribution Monitoring in Pressurized Water Reactors*. *Nuclear Science and Engineering*, **143**(3), 268-280 (2003).
6. M.E. Pomerantz, C.R. Calabrese, C. Grant, *Nuclear reactor power and flux distribution fitting from a diffusion theory model and experimental data*. *Annals of Nuclear Energy*, **29**(9), 1073-1083 (2002).
7. A.M. El-Badry, A.S. Hassan, *Sensitivity of developed self-powered neutron detector*, in *Fourth Conference on Nuclear and Particle Physics*. Fayoum, Egypt., 294 (2003).
8. L. Wanno, et al., *A study on the sensitivity of self-powered neutron detector (SPND)*. in *1999 IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record. 1999 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference* (Cat. No.99CH37019) (1999).
9. A. Krause, et al., *Near-optimal sensor placements: Maximizing information while minimizing communication cost*. in *Proceedings of the 5th international conference on Information processing in sensor networks*. ACM (2006).
10. M. Basseville, et al., *Optimal sensor location for detecting changes in dynamical behavior*. in *1986 25th IEEE Conference on Decision and Control*. (1986).
11. J. Park, Y. Lim, *Survey of Sensor Placement Methods for Structural Health Monitoring*. *International Journal of Energy, Information and Communications*, **6**(4), 35-44 (2015).
12. S. Mishra, R.S. Modak, S. Ganesan, *Selection of fuel channels for Thermal Power Measurement in 700 MWe Indian PHWR by evolutionary algorithm*. *Nuclear Engineering and Design*, **247**, 116-122 (2012).
13. B.R. Upadhyaya, F. Li, *Optimal sensor placement strategy for anomaly detection and isolation*. in *2011 Future of Instrumentation International Workshop (FIW) Proceedings*. (2011).
14. D.Y. Oh, H.C. No, *Determination of the minimal number and optimal sensor location in a nuclear system with fixed incore detectors*. *Nuclear Engineering and Design*, **152**(1), 197-212 (1994).

بدون در نظر گرفتن عامل فرسایش سوخت نشان می‌دهد که اگر در تعریف احتمالات قرائت آشکارسازهای SPND، توزیع شار حالت‌های مربوط به پایان دوره بهره‌برداری سوخت نیز در نظر گرفته شود، چیدمان حاصل اطلاعات بیش‌تری نسبت به حالتی که فقط از داده‌های مربوط به شروع دوره بهره‌برداری سوخت استفاده شده است، به‌دست خواهد داد. هم‌چنین با در نظر گرفتن عامل فرسایش سوخت، با تعداد آشکارساز کم‌تر می‌توان اطلاعات بیش‌تری از حالت قلب استخراج کرد. لذا با چیدمان‌های بهینه‌ای که با در نظر گرفتن فرسایش سوخت تعیین شده‌اند، می‌توان بیش‌ترین اطلاعات را از کم‌ترین تعداد آشکارساز SPND در داخل قلب و در طول بهره‌برداری از رآکتور به‌دست آورد. این امر موجب کاهش قابل توجه هزینه ساخت، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری برای آشکارسازهای SPND داخل قلب رآکتور تحقیقاتی تهران خواهد شد که در طراحی سیستم نداشت شار نوترونی قلب رآکتور به‌کار خواهند رفت.

مراجع

1. X. Peng, K. Wang, Q. Li, *A new power mapping method based on ordinary kriging and determination of optimal detector location strategy*. *Annals of Nuclear Energy*, **68**, 118-123 (2014).
2. W.A. Boyd, R.W. Miller, *The BEACON on-line core monitoring system: functional upgrades and applications*. in *Proc. Specialists' Meeting "In-core instrumentation and core assessment"*, Mito-shi, Japan. (1996).
3. M. Tojo, et al., *Application of the New Core Monitoring System, 'GNF-ARGOS', to the Start-up Tracking Calculation of ABWR*. in *PHYSOR'08: International Conference on the Physics of Reactors 'Nuclear Power: A Sustainable Resource'*. Interlaken (Switzerland) (2008).
4. S. Mishra, R. Modak, S. Ganesan, *Computational Schemes for Online Flux Mapping System in a Large-Sized Pressurized Heavy Water Reactor*. *Nuclear Science and Engineering*, **170**(3), 280-289 (2012).

15. L.M. Nunes, et al., *Optimal estuarine sediment monitoring network design with simulated annealing*. [Journal of Environmental Management](#), **78**(3), 294-304 (2006).
16. M. Al-Zahrani, T. Husain, *An algorithm for designing a precipitation network in the southwestern region of Saudi Arabia*. [Journal of Hydrology](#), **205**(3), 205-216 (1998).
17. P.F. Krstanovic, V.P. Singh, *Evaluation of rainfall networks using entropy: I. Theoretical development*. [Water Resources Management](#), **6**(4), 279-293 (1992).
18. P.F. Krstanovic, V.P. Singh, *Evaluation of rainfall networks using entropy: II. Application*. [Water Resources Management](#), **6**(4), 295-314 (1992).
19. A.K. Mishra, P. Coulibaly, *Developments in hydrometric network design: A review*. [Reviews of Geophysics](#), **47**(2), (2009).
20. C.E. Shannon, *A mathematical theory of communication*. [The Bell System Technical Journal](#), **27**, 379-423, 623-656 (1948).
21. L. Alfonso, A. Lobbrecht, R. Price, *Locating Monitoring Water Level Gauges: An Information Theory Approach*, in [7th ISE & 8th HIC](#). China (2009).
22. B. Ainslie, et al., *Application of an entropy-based Bayesian optimization technique to the redesign of an existing monitoring network for single air pollutants*. [Journal of Environmental Management](#), **90**(8), 2715-2729 (2009).
23. A. Krause, A. Singh, C. Guestrin, *Near-Optimal Sensor Placements in Gaussian Processes: Theory, Efficient Algorithms and Empirical Studies*. [J. Mach. Learn. Res.](#), **9**, 235-284 (2008).
24. R.W. Yeung, *Information theory and network coding*. [Springer Science & Business Media](#) (2008).
25. R.E. Uhrig, L.H. Tsoukalas, *Soft computing technologies in nuclear engineering applications*. [Progress in Nuclear Energy](#), **34**(1), 13-75 (1999).