



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

بررسی نوسانات تصادفی در چگالی نوترون هنگام راه‌اندازی راکتور

سیدسجاد، جبل‌عاملیان : نعیم‌الدین، متاجی کجوری : محسن، شایسته

۱- سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشگاه راکتور

۲- سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، گروه پژوهشی ایمنی هسته‌ای و حفاظت پرتوی

۳- شرکت ساخت و راه‌اندازی نیروگاه‌های اتمی (سورنا)

چکیده:

یکی از مسائل مهم در راه‌اندازی ایمن راکتور هسته‌ای، افزایش سطح توان راکتور با روندی قابل پیش‌بینی هنگام تزریق راکتیویته مثبت است. از طرفی رفتار نوترون در محیط، ماهیت تصادفی داشته و تنها در جمعیت‌های زیاد نوترونیو در صورتی که رفتار جمعی نوترون‌ها بر رفتارهای فردی غلبه داشته باشد می‌توان از اثرات فردی صرف‌نظر و از معادلات یقینی بهره برد. در ابتدای راه‌اندازی راکتور چگالی نوترونی کم بوده، از این رو این برهه زمانی در تشخیص صحیح وضعیت راکتور برای دستیابی به سطح قدرت مطلوب حائز اهمیت خواهد بود، لذا روش‌های مبتنی بر معادلات احتمال که در این پژوهش به آن می‌پردازیم در تحقیقات نظری اهمیت ویژه‌ای می‌یابد.

کلید واژه: نوسانات تصادفی، چشمه ضعیف، راه‌اندازی راکتور، معادلات دیفرانسیل تصادفی، تابع مولد.

مقدمه: در بررسی سیستم‌هایی که چگالی نوترونی پایینی دارند با توجه به این که معادلات یقینی گویای حالت دقیقی از فیزیک حاکم بر رفتار سیستم نیست، معادلات تصادفی که در آن‌ها حداقل علاوه بر مقدار میانگین، همبستگی کمیت‌ها نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد اهمیت می‌یابند. در بررسی اثرات تصادفی بر جمعیت نوترون هنگام راه‌اندازی راکتور، دو کمیت حائز اهمیت‌اند، سرعت تزریق راکتیویته مثبت و قدرت چشمه نوترون. در واقع هدف اولیه محاسبات تصادفی، تعیین شرایط محدود ماندن سطح توان با تزریق راکتیویته مثبت است و از این رو در زمان راه‌اندازی راکتور، با کسب دانش بیش‌تری نسبت به قبل، می‌توان اقدامات آگاهانه‌تری انجام داد، همچنین با استفاده از حل معادلات تصادفی، می‌توان برای جواب‌های معادلات یقینی، محدوده‌ی اطمینان مشخص نمود. در فاز محاسباتی سه روش قابل طرح عبارت‌اند از تابع مولد، مونت‌کارلو و معادلات دیفرانسیل تصادفی. بررسی رفتار آماری ذرات در یک مجموعه، مبحثی غنی برای محققین گوناگونی بوده است. در دهه‌های گذشته بیشتر از روش تابع بسط استفاده شده [۱، ۲، ۳، ۴، ۵] که البته به دلیل هزینه بالای محاسباتی حتی در زمان حاضر، تنها به ارائه معادلات حاکم و بعضاً حل آن معادلات در سیستم‌های بسیار ساده محدود شده است. استفاده از روش مونت‌کارلو به عنوان دقیق‌ترین روش موجود



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

که از ابتدای شروع مطالعات نوترون نیز مد نظر بوده است، به گذشت زمان بسیار طولانی نیاز دارد و عملاً در هندسه‌های واقعی بی‌استفاده است، گرچه در مسائل ساده به عنوان راستی‌آزمایی سایر روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در دهه اخیر، بیشتر از روش معادلات دیفرانسیل تصادفی استفاده شده [۶] که نسبت به دو روش قبل از هزینه محاسباتی کم‌تر و سرعت بیشتری برخوردار است.

روش کار: در حادثه‌های تزریق راکتیویته، استفاده از معادلات سینتیک نقطه‌ای می‌تواند تخمین خوبی از سیر تحولی کمیت‌ها در لحظات ابتدایی ارائه نماید. از این رو در این مقاله به مدل‌سازی و شبیه‌سازی معادله سینتیک نقطه‌ای تصادفی نوترون پرداخته می‌شود. از میان روش‌های موجود و با توجه به جنبه هزینه محاسباتی، دو روش تابع مولد و معادلات دیفرانسیل تصادفی برای بررسی موضوع برگزیده می‌شوند. در ذیل خلاصه‌ای از این روش‌ها بیان می‌شود:

روش اول - تابع مولد

این روش، با نوشتن معادله بالانس احتمال برای وجود n نوترون، وقوع Q واکنش شکافت از زمان

اولیه، وجود C مولد نوترون تأخیری در سیستمی با دمای سوخت $T_f + \Delta T_f$ ، دمای غلاف $T_c + \Delta T_c$ و دمای

خنک‌کننده $T_m + \Delta T_m$ در زمان $t + \Delta t$ که با عبارت زیر نمایش داده می‌شود، شروع می‌گردد.

$$P[n, Q, C, T_f + \Delta T_f, T_c + \Delta T_c, T_m + \Delta T_m, t + \Delta t]$$

احتمالات زیر برای این مجموعه متصور است:

- جذب یک نوترون از مجموع $(n+1)$ نوترون در زمان t با احتمال $\lambda_c \Delta t$:

$$(n+1)\lambda_c P[n+1, Q, C, T_f, T_c, T_m, t] \Delta t$$

- وقوع شکافت و تولید i نوترون و j مولد نوترون با توزیع $f_{i,j}$ در زمان t با احتمال $\lambda_f \Delta t$:

$$\sum_i \sum_j (n+1-i)\lambda_f f_{i,j} P[n+1-i, Q-1, C-j, T_f, T_c, T_m, t] \Delta t$$



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

در معادله بالا T_i برابر دمای ورودی سیال است و ضرایب f_1 تا f_6 ثوابتی هستند که با توجه به هندسه و

خواص فیزیکی و مکانیکی اجزا تعیین می‌شوند. در نهایت تعداد m $\frac{m(m+3)}{2}$ معادله حاصل می‌شود که با

روش‌های معمولی اختلاف محدود قابل حل خواهند بود. با توجه به این که در اینجا m برابر ۶ کمیت است،

تعداد ۲۷ معادله به دست می‌آید که برای رعایت اختصار، معادلات مربوط به مقدار متوسط و واریانس

کمیت‌های چگالی نوترون و تعداد شکافت رخ داده در زیر آورده شده است:

$$\frac{d\langle n \rangle}{dt} = ((1-\beta)v-1)\langle \lambda f n \rangle - \langle \lambda_c n \rangle + \lambda_d \langle C \rangle + S \quad \text{Error! Bookmark not defined.}$$

$$\text{Error! Bookmark not defined.} \quad \frac{d\langle Q \rangle}{dt} = \langle \lambda f n \rangle$$

Error! Bookmark not defined. Bookmark not defined.

$$\frac{d \text{var}(n)}{dt} = 2((1-\beta)v-1) \text{cov}(n, \lambda f n) - 2 \text{cov}(n, \lambda_c n) + 2\lambda_d \text{cov}(n, C) + ((1-\beta)v-1)^2 \langle \lambda f n \rangle + \langle \lambda_c n \rangle + \lambda_d \langle C \rangle + S$$

$$\text{Error! Bookmark not defined.} \quad \frac{d \text{var}(Q)}{dt} = \langle \lambda f n \rangle + 2 \text{cov}(Q, \lambda f n)$$

- روش دوم - معادلات دیفرانسیل تصادفی

در این روش نیز ابتدا تمامی احتمالات ممکن و آثار ناشی از آن برای سیستم در نظر گرفته می‌شود. به این صورت که اگر احتمال جذب یک نوترون با P_1 ، احتمال شکافت با P_2 ، احتمال واپاشی یک مولد نوترون تأخیری با P_3 ، احتمال واپاشی چشمه نوترون تأخیری با P_4 و احتمال عدم وقوع واکنش با P_5 و تغییرات ناشی از وقوع این واکنش‌ها با $\Delta_{i=1 \rightarrow 5}$ نشان داده شود، مقدار متوسط کمیت‌ها از رابطه‌ی ۱۱ حاصل می‌شود:

$$\begin{Bmatrix} n[t+\Delta t] \\ C[t+\Delta t] \\ Q[t+\Delta t] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} n[t] \\ C[t] \\ Q[t] \end{Bmatrix} + E \begin{Bmatrix} \Delta n \\ \Delta C \\ \Delta Q \end{Bmatrix} + \left(E \begin{Bmatrix} \Delta n^2 \\ \Delta C^2 \\ \Delta Q^2 \end{Bmatrix} \right)^{\frac{1}{2}} \eta_t; \quad \eta_t \square N(0,1) \quad \text{Error! Bookmark not defined.}$$



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۸ اسفندماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

قدرت $\rho_0 = 0.008$ در قلب راکتور که دارای چگالی نوترون اولیه $n_0 = 10^5 m^{-3}$ با حضور چشمه نوترونی با چگالی

قدرت $S = 10^3 m^{-3}$ در شکل ۱ آورده شده است.

شکل ۲. تحول زمانی پارامتر $\frac{\sqrt{\text{var}(Q)}}{\langle Q \rangle}$ حاصل از

روش معادلات دیفرانسیل تصادفی در غیاب

چگالی نوترونی اولیه.

شکل ۱. تحول زمانی پارامتر $\frac{\sqrt{\text{var}(Q)}}{\langle Q \rangle}$ حاصل

از دو روش تابع مولد (GF) و معادلات

دیفرانسیل تصادفی (SDE).



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

با توجه به شکل ۱، تطابق خوبی بین نتایج حاصل از دو روش تابع مولد و معادلات دیفرانسیل تصادفی برقرار است. اختلاف موجود در شکل ۱، به سبب تقریبی است که در روش تابع مولد در کاهش درجه‌ی ممان‌های مرتبه سوم به کار رفته است. پارامتر $\frac{\sqrt{\text{var}(Q)}}{\langle Q \rangle}$ دارای اهمیت ویژه‌ای است، زیرا اولاً Q گویای شدت حادثه و میزان انرژی آزادشده در آن بوده و ثانیاً پارامتر $\frac{\sqrt{\text{var}(Q)}}{\langle Q \rangle}$ بیانگر محدوده‌ای است که باید در ملاحظات مربوط به ایمنی علاوه بر نتایج حاصل از معادلات یقینی، در نظر گرفته شود. با وجود اختلاف بین نتایج دو روش در تعیین این کمیت، در زمان‌های قبل از قله‌ی اول قدرت نتایج این دو روش با هم مطابقت داشته و خوش‌بختانه مقدار بیشینه این کمیت نیز در همین بازه اتفاق می‌افتد. در این مثال شدت حادثه می‌تواند به میزان تقریبی ۵ درصد از آنچه معادلات یقینی پیش‌بینی می‌کنند، بیشتر باشد. در شکل ۲ مشاهده می‌شود که بیشینه پارامتر $\frac{\sqrt{\text{var}(Q)}}{\langle Q \rangle}$ با قدرت چشمه نوترونی ارتباط معکوس دارد.

بحث و نتیجه‌گیری: در این مقاله، آثار نوسانات تصادفی در چگالی نوترون هنگامی که چگالی نوترونی پایینی وجود دارد، با استفاده از دو روش تابع بسط و معادلات دیفرانسیل تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج یکسان دو روش، مشخص گردید که در صورت اهمیت پیدا نمودن آثار تصادفی، ملاحظات ایمنی بیشتری در ارتباط با حوادث راه‌اندازی راکتور باید در نظر گرفت.

مراجع:

[1] D. B. MacMillian and M. L. Storm, Kinetics of Low Source Reactor Startups Part III, Nuclear Science and Engineering, 16, 369-380 (1963).



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

- H. Hurwitz, Jr., D. B. MacMillian, J. H. Smith, M. L. Storm, Kinetics of Low Source Reactor Startups Part I, Nuclear Science and Engineering, 15, 166-186 (1963). [2]
- G. I. BELL, Probability Distribution of Neutrons and Precursors in a Multiplying Assembly, Annals of Physics, 21, 243-283 (1963). [3]
- S. B. Degweker, A Forward Equation for Stochastic Neutron Transport, Nuclear Science and Engineering, 21, 531-539 (1994). [4]
- Y. Ben-haim, Safety Aspects of Temperature Fluctuations During Nuclear Reactor Transients, Progress in Nuclear Energy, 9, 337-347 (1982). [5]
- J. G. Hayes, E. J. Allen, Stochastic Point-Kinetics Equations in Nuclear Reactor Dynamics, Annals of Nuclear Energy, 32, 572-587 (2005) [6]
- IAEA, Safety Analysis Report for Tehran Research Reactor, (2006) [7]
- الشکری، ح.خلفی، ح.کاظمی نژاد - "مطالعه عددی و تجربی نوترونیک و ترموهیدرولیک قلب ترکیبی راکتور تهران" س - پایان نامه دکتری - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - ۱۳۹۳. [۸]