



محاسبات نوترونیکی وابسته به زمان و مکان با استفاده از کد مونت کارلوی TDMC

محسن شایسته*^۱، مجید شهریاری^۲، غلامرضا رئیس‌علی^۳

۱- گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه امام حسین (ع)، صندوق پستی: ۳۴۷-۱۶۵۷۵، تهران - ایران

۲- دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران - ایران

۳- پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

چکیده: بر اساس روش مونت کارلو، رفتار وابسته به زمان رآکتورهای شکافت شبیه‌سازی شده و کدی با عنوان TDMC برای حساب کردن پارامترهای نوترونی توسعه داده شده است. پارامترهایی مانند رآکتیویته، طول عمر نوترون، توزیع مکانی شار و قدرت سیستم با احتساب چندین گروه نوترون تأخیری بصورت تابعی از زمان قابل حساب کردن با این کد می‌باشند. امکان تغییر در ترکیب مواد و مرزهای سیستم بصورت تابعی از زمان، از قابلیت‌های این کد است. نتایج بدست آمده توافق خوبی را با مقادیر بدست آمده از سایر روش‌های متداول نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های تکثیرکننده، روش مونت-کارلو، پارامترهای نوترونی، رفتار وابسته به زمان، شار وابسته به مکان و زمان، توان وابسته به زمان

Time and Space Dependent Neutronic Calculations Using TDMC Monte Carlo Code

M. Shayesteh*¹, M. Shahriari², G. Raisali³

1- Physics Department, Faculty of Basic Science, Imam Hossein University, P.O.Box: 16575-347, Tehran - Iran

2- Nuclear Engineering Department, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 1983963113, Tehran - Iran

3- Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran

Abstract: Time-dependent behavior of fission reactors is simulated using Monte Carlo method and a code named TDMC is developed for neutron parameters calculations. Parameters such as reactivity, neutron life time, space distribution of flux, and power with several groups of delayed neutrons are calculable by the code. Material composition and system boundaries may be changed as time-dependent in the code. The results which have obtained with the code are in good agreement with the benchmark problems results.

Keywords: *Multiplying Systems, Monte-Carlo Method, Neutronic Parameters, Time-Dependent Behavior, Space and Time-Dependent Flux, Time-Dependent Power*

*email: mohsen_shayesteh@hotmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۸۵/۹/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۷/۲/۱۷



آمده است [۲، ۳ و ۴]. تقریب اساسی بکار رفته در این روش‌ها، کوچک فرض کردن نوسانات مرزی سیستم است، بگونه‌ای که دامنه نوسانات مرزی سیستم باید از طول امتداد یافته^(۲) کوچکتر باشد [۲، ۳ و ۴]، در حالیکه در TDMC چنین محدودیتی وجود ندارد و مرزهای سیستم را به هر مقدار می‌توان تغییر داد.

۲- روش محاسبات

روش مونت کارلو روشی آماری است و با روش‌های یقینی^(۳) متفاوت می‌باشد. در این روش ذره از زمان تولد تا زمان مرگش (جذب یا نشت) دنبال شده و ضمن شبیه‌سازی اندرکنش‌های محتمل آن، توزیع احتمال آنها بطور آماری نمونه‌برداری می‌شود. فرایندهای نمونه‌برداری با استفاده از اعداد تصادفی انجام می‌گیرد، و از این رو به این روش نام مونت کارلو داده شده است. با شبیه‌سازی رفتار تک‌تک ذرات و به کمک قضیه حد مرکزی^(۴) رفتار متوسط ذرات بدست می‌آید. از این دیدگاه، نتایج روش مونت کارلو را می‌توان پاسخی به یک سیستم ماکروسکوپی از طریق اندرکنش‌های میکروسکوپی آن سیستم دانست. استفاده از این روش در سیستم‌های دو یا سه بعدی، به ویژه متغیر با زمان مفید است. به هریک از این ذرات و سرنوشت آنها از تولد تا مرگ یک تاریخچه گفته می‌شود. با انتخاب تعداد زیادی تاریخچه، رفتار متوسط بدست آمده به رفتار واقعی ذرات نزدیک تر می‌شود.

شار حجمی نوترون را می‌توان از جمع‌زدن روی مسیرهایی که ذره در تاریخچه خود طی می‌کند و با توجه به وزن آماری آن بدست آورد. میزان هر نوع اندرکنش از حاصل ضرب شار در سطح مقطع ماکروسکوپی آن اندرکنش بدست می‌آید. با استفاده از این مفهوم کمیتی مانند رآکتیویته یا ضریب تکثیر مؤثر سیستم را می‌توان از روش‌های مختلفی حساب کرد. کد TDMC ضریب تکثیر را از سه روش موسوم به طول مسیر^(۵)، چگالی برخورد و جذب حساب کرده و مقدار متوسط آنها را به نام ضریب تکثیر سیستم اعلام می‌کند. خطای آماری هر روش نیز بطور جداگانه حساب و مقدار متوسط آنها اعلام می‌شود. زمان‌های از بین رفتن^(۶) و تولید شدن^(۷) نوترون‌ها (میانگین زمان بین تولد نوترون و جذب شامل شکافت آن)، و خطای آماری آنها نیز با استفاده از نوع واکنش‌های صورت گرفته حساب

برای انجام دادن محاسبات نوترونی حالت پایدار سیستم‌های شکافت‌پذیر، کدی با عنوان TDMC^(۱) توسعه یافته است که با استفاده از روش مونت کارلو کمیاتی مانند ضریب تکثیر مؤثر سیستم یا رآکتیویته، طول عمر نوترون و توزیع شار وابسته به مکان و انرژی و زمان با آن قابل محاسبه است. این کد در هر سیکل (برابر با طول عمر متوسط نوترون که بسته به نوع سیستم از مرتبه نانو تا میکرو ثانیه است) پارامترهای نوترونی و خطای آماری آنها را بر اساس روش مونت کارلو و با استفاده از مفاهیم مختلف بدست آورده و مقدار متوسط و انحراف معیار آنها را حساب می‌کند [۱]. در این کد، ذرات در هندسه‌هایی مانند کره، تیغه و استوانه (محدود و نامحدود) دنبال می‌شوند. نحوه دنبال کردن ذرات در این هندسه‌ها بصورت زیر برنامه‌هایی در کد تعریف شده و متناسب با وضعیت هندسی مسأله بکار گرفته می‌شود. قدرت سیستم یا میزان شکافت‌های انجام شده بر اساس یک روش آماری و با محسوب کردن نوترون‌های تأخیری به عنوان نوترون‌های چشمه، حساب می‌شود. با این کد همچنین می‌توان در شرایطی که سیستم در حالت پایدار نباشد این کمیات را به صورت وابسته به زمان حساب کرد. تغییرات زمانی قدرت از دیگر کمیاتی است که با این کد حساب می‌شود. هرگونه تغییری در سطح مقطع ماکروسکوپی مواد تشکیل‌دهنده سیستم که ممکن است ناشی از تغییر در ترکیب مواد باشد، منجر به تغییر رآکتیویته سیستم خواهد شد. تغییرات زمانی مرزهای سیستم، حتی در صورتی که مقدار مواد تشکیل‌دهنده سیستم ثابت بماند، نیز ممکن است منجر به تغییر در رآکتیویته گردد. هر یک از این تغییرات در TDMC قابل اعمال است. در واقع در آغاز هر سیکل، که بازه زمانی آن بسته به نوع رآکتور از مرتبه نانو تا میکروثانیه است، از ترکیب و مرزهای تغییر یافته در حین سیکل قبل (در صورتی که تغییراتی در ترکیب یا مرزهای نواحی مختلف در برنامه تعریف شده باشد) استفاده می‌گردد.

اخیراً برای حل مسأله سیستم‌های شکافت‌پذیر با مرزهای متغیر با زمان در حالت‌های ساده، تلاش‌هایی صورت گرفته و جواب‌های مسأله با استفاده از تکنیک‌های ریاضی خاصی از جمله استفاده از تبدیل فوریه و توابع گرین نوع اول و دوم بدست



از زمان است، از k محاسبه شده در هر سیکل برای محاسبه کمیات فوق استفاده خواهد شد. در سیستم‌هایی که رآکتیویته آنها ثابت است و با زمان تغییر نمی‌کند، دو معادله اول از روابط (۲) بصورت زیر ساده می‌شوند:

$$P_m = N_0 (k_p)^m$$

$$D_m = D_{m-1} k_p + C_{m-1} \lambda \ell = C_0 \lambda \ell (k_p)^{m-1} + C_1 \lambda \ell (k_p)^{m-2} + \dots + C_{m-1} \lambda \ell \quad (۳)$$

در بدست آوردن این روابط، تعداد هسته‌های مولد نوترون تأخیری در هر سیکل ثابت در نظر گرفته شده است، از اینرو در سیستم‌هایی که طول عمر نوترون طولانی‌تر است (یا محاسبات برای فاصله زمانی طولانی‌تری انجام می‌گیرد)، انتظار می‌رود که تعداد نوترون‌های تأخیری و بنابراین کل نوترون‌های موجود در سیستم، اندکی کمتر بدست آید. برای اصلاح این کمیت می‌توان از مقدار متوسط تعداد مولدها در هر سیکل، برای محاسبه تعداد نوترون‌های تأخیری تولید شده در آن سیکل استفاده کرد. در اینصورت تعداد کل نوترون‌های تأخیری و تعداد مولدها در پایان سیکل m ام بترتیب عبارتند از:

$$N_m = \frac{P_m + D_{m-1} k_p + C_{m-1} \lambda \ell (1 - 0.5 \lambda \ell)}{(1 - 0.5 \beta \lambda \ell)}$$

$$C_m = C_{m-1} (1 - \lambda \ell) + \beta \frac{P_m + D_{m-1} k_p + C_{m-1} \lambda \ell (1 - 0.5 \lambda \ell)}{(1 - 0.5 \beta \lambda \ell)} \quad (۴)$$

در واقع انواع زیادی از گونه‌های مختلف ایزوتوپ‌های مولد نوترون تأخیری، در واکنش‌های زنجیره‌ای شکافت بوجود می‌آید (حداقل ۴۵ نوع). مرسوم است در تحلیل رفتار رآکتور، این مولدها به شش گروه تقسیم‌بندی شوند [۶]. روابط فوق با فرض یک گروه نوترون تأخیری بدست آمده‌اند، با افزودن چند خط به برنامه می‌توان آن را به شش گروه (یا هر تعداد گروه دلخواه) تعمیم داد. در اینصورت لازم است شش گروه نوترون تأخیری D_m^i ، و شش گروه مولد نوترون تأخیری C_m^i ، و به ازای هر گروه، یک ثابت واپاشی λ_i ، و کسر نوترون‌های تأخیری β_i مشخص شوند.

می‌شوند. شار سطحی یا توزیع مکانی شار، از به سمت صفر میل دادن حجمی که شار در آن حساب می‌شود، بدست می‌آید [۱]. برای اعمال اثر نوترون‌های تأخیری در قدرت رآکتور، فرض می‌کنیم سیستم تا لحظه $t=0$ بحرانی بوده و چگالی هسته‌های مولد نوترون تأخیری به حالت پایدار رسیده باشد. با در نظر گرفتن یک گروه نوترون تأخیری، چگالی این مولدها عبارتست از:

$$C(t=0) \equiv C_0 = \beta N_0 / (\ell \lambda) \quad (۱)$$

که β کسر نوترون‌های تأخیری، N_0 تعداد نوترون‌های موجود در سیستم در لحظه $t=0$ ، ℓ زمان تولید و λ ثابت واپاشی مولد نوترون‌های تأخیری است. اگر در لحظه $t=0$ رآکتیویته‌ای کوچکتر از β به سیستم تزریق شود، سیستم در حالت فوق بحرانی تأخیری قرار می‌گیرد. در این حالت رآکتیویته سیستم کمتر از حالت بحرانی آنی است و می‌توان نوترون‌های تأخیری را بعنوان چشمه‌ای با قدرت $S_d = \sum \lambda_i C_i$ در نظر گرفت. به این ترتیب ضریب تکثیر سیستم برای نوترون‌های آنی معادل با $k_p \equiv [(1 - \beta)k]$ می‌باشد که k ضریب تکثیر مؤثر سیستم است. در پایان هر سیکل می‌توان تعداد نوترون‌های آنی و تأخیری را محاسبه و با یکدیگر جمع کرد [۵]. احتمال باقی ماندن هر یک از مولد نوترون‌های تأخیری تا پایان سیکل اول برابر $\exp(-\lambda \ell)$ و احتمال واپاشی هر یک از آنها $1 - \exp(-\lambda \ell)$ می‌باشد که با توجه به اینکه $\lambda \ell \ll 1$ این احتمال‌ها به ترتیب تقریباً برابر با $(1 - \lambda \ell)$ و $\lambda \ell$ است. با توجه به اینکه نوترون‌های موجود در سیستم اعم از آنی و تأخیری با ضریب تکثیر $k_p \equiv [(1 - \beta)k]$ در سیستم تکثیر می‌شوند، اگر تعداد نوترون‌های آنی، تأخیری، کل نوترون‌ها و مولد نوترون‌های تأخیری در پایان سیکل m ام را بترتیب با D_m ، P_m ، N_m و C_m نشان دهیم، این کمیات عبارتند از:

$$P_m = P_{m-1} k_p$$

$$D_m = D_{m-1} k_p + C_{m-1} \lambda \ell$$

$$N_m = P_m + D_m$$

$$C_m = C_{m-1} (1 - \lambda \ell) + \beta N_m \quad (۲)$$

و $P_0 = N_0$ و $D_0 = 0$ بوده k_p یا k مربوط به همان سیکل m ام است. وقتی با سیستم‌هایی سروکار داریم که رآکتیویته آنها تابعی

۳- روش کار TDMC

کد کامپیوتری TDMC با ترابرد هر نوترون ناشی از شکافت یا چشمه خارجی (در صورت وجود) در تاریخچه‌اش، اندرکنش‌های محتمل را شبیه‌سازی کرده و اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه کمیات مورد نظر را ثبت می‌کند. ابعاد نواحی مختلف در ورودی داده می‌شود و با توجه به هندسه سیستم از «زیربرنامه» مربوطه در کد، جهت ترابرد ذره استفاده می‌شود. تعداد سیکل‌ها و تعداد تاریخچه‌ها در هر سیکل نیز در ورودی مشخص می‌شوند. چنانچه هر یک از نواحی تشکیل‌دهنده سیستم ترکیبی از چندین ایزوتوپ باشند، درصد اتمی هر یک از ایزوتوپ‌ها در هر ناحیه خاص داده می‌شود. داده‌های هسته‌ای ایزوتوپ‌های موجود در سیستم مانند سطح مقطع‌های ماکروسکوپی، تعداد نوترون‌های آزاد شده در شکافت و انرژی آنها (چنانچه ایزوتوپ شکافت‌پذیر باشد) بصورت زیربرنامه در کد گنجانده شده‌اند. چنانچه چشمه خارجی وجود داشته باشد، شدت آن و طیف انرژی و زاویه‌ای نوترون‌های گسیلی از آن مشخص می‌شود. در سیستم‌های متغیر با زمان، کسر نوترون‌های تأخیری و ثابت واپاشی هر یک از گروه‌های مولد^(۸) نوترون‌های تأخیری در گروه‌های مختلف انرژی نیز مشخص می‌شوند. چنانچه مرزهای سیستم با زمان تغییر کنند، میزان این تغییرات در هر ناحیه نیز مشخص می‌گردد که در این صورت بطور خودکار در ابتدای هر سیکل، محاسبات بر اساس مرزهای جدید انجام خواهد شد.

در پایان هر سیکل، مقدار متوسط کمیات مشخص شده و خطای آماری آنها ثبت می‌گردد. بنابر نیاز کاربر می‌توان کمیات متفاوتی را بدست آورد. در مسایل استاتیک معمولاً کمیاتی مانند راکتیویته، زمان تولید و زمان از بین رفتن نوترون و توزیع مکانی شار در گروه‌های مختلف انرژی بیشتر مد نظر هستند. کد TDMC این کمیات را حساب کرده و همچنین مقدار متوسط و خطای آماری آنها را در سیکل‌های فعال (نتایج چند سیکل اولیه به عنوان سیکل‌های غیرفعال در متوسط‌گیری لحاظ نمی‌شوند) در خروجی ثبت می‌کند. در مسایل وابسته به زمان نیز هر یک از این کمیات در سیکل‌های متوالی حساب و ثبت می‌شوند، در نتیجه می‌توان هر یک از این کمیات را بصورت تابعی از زمان رسم کرد. تغییرات زمانی شار و توان سیستم در این گونه مسایل قابل محاسبه‌اند. کمیات دیگری مانند مقدار (یا میزان زمانی) یک اندرکنش خاص، یا زمان لازم برای تشکیل اولین زنجیره شکافت پایدار^(۹) در حضور چشمه‌های ضعیف^(۱۰) را (که کمیت مهمی در

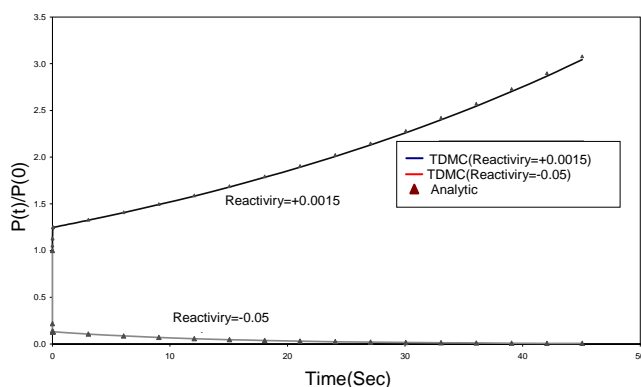
شروع بکار راکتورهای قدرت است)، می‌توان برحسب نظر کاربر در کد تعریف و حساب کرد.

۴ - نتایج

با استفاده از روابط قسمت قبل و همچنین معادلات ارائه شده در مقاله قبلی نویسندگان در مرجع شماره ۱ می‌توان تغییرات زمانی کمیاتی مانند توان راکتور، توزیع مکانی شار، و راکتیویته را برای سیستم‌های زیربحرانی و فوق‌بحرانی، همچنین برای سیستم‌های دارای ترکیب و مرزهای متغیر با زمان، بدست آورد.

۴-۱ تغییرات زمانی توان

به عنوان اولین مسأله آزمون، ساده‌ترین سیستم را که یک راکتور تیغه‌ای تک ناحیه‌ای با یک گروه نوترون تأخیری است و بصورت تحلیلی قابل حل می‌باشد، با پارامترهای ثابت $\beta = 0.0075$ ، $\lambda = 0.08 \text{ s}^{-1}$ ، $\ell = 6 \times 10^{-5} \text{ s}$ می‌گیریم. فرض می‌کنیم راکتور مدتی طولانی در حالت بحرانی با توان $P(0)$ کار کرده و در زمان $t=0$ راکتیویته سیستم، دفعتهاً به مقدار $\rho = +0.0015$ یا $\rho = -0.05$ تغییر داده شده است. نتایج TDMC با استفاده از روابط ۳ و جواب‌های تحلیلی مسأله [۷] در شکل ۱ نشان داده شده است. بطوری که ملاحظه می‌شود، در لحظات اولیه توافق بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد. با گذشتن زمان، مقادیر بدست آمده از TDMC اندکی کمتر می‌شوند که به دلیل ثابت فرض کردن تعداد مولدهای نوترون تأخیری است. اختلاف نسبی بین نتایج TDMC و محاسبات تحلیلی در مدت $t=45\text{s}$ برابر با ۱ درصد برای راکتیویته مثبت، و ۵ درصد برای راکتیویته منفی می‌باشد. استفاده از روابط (۴) این اختلاف را بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.



شکل ۱- تغییرات زمانی توان راکتور در اثر تغییر راکتیویته پله‌ای در زمان $t=0$ به مقدار $+0.0015$ و -0.05 .



پنج درصد کاهش داده شده است. این تغییر بنابر محاسبات TDMC، منجر به افزایش ضریب تکثیر سیستم به مقدار $1/0.011$ شده است. TDMC توان سیستم را با استفاده از روابط (۳) بصورت تابعی از زمان حساب می کند.

ناحیه	ناحیه	ناحیه	ناحیه	ناحیه	ناحیه	ناحیه
۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
بازتابنده	سوخت	میله کنترل	سوخت	میله کنترل	سوخت	بازتابنده

شکل ۲- هندسه مسأله آزمون دوم.

جدول ۱- پارامترهای شش گروهی نوترونهای تأخیری.

(i)	(β_i)	(λ_i) S^{-1}
۱	$8/10 \times 10^{-5}$	۰/۰۱۲۹
۲	$6/87 \times 10^{-4}$	۰/۰۳۱۱
۳	$6/22 \times 10^{-4}$	۰/۱۳۴
۴	$1/14 \times 10^{-3}$	۰/۳۳۱
۵	$5/12 \times 10^{-4}$	۱/۲۶
۶	$1/70 \times 10^{-4}$	۳/۲۱

جدول ۲- سطح مقطع های مسأله آزمون دوم.

ناحیه	گروه انرژی	\sum_f^g	\sum_t^g	$\sum_s^{g \rightarrow g}$	$\sum_s^{g \rightarrow g'}$
۷ و ۱	۱	$8/3441 \times 10^{-4}$	$2/411 \times 10^{-1}$	$2/336 \times 10^{-1}$	$3/598 \times 10^{-3}$
	۲	$3/2776 \times 10^{-4}$	$4/172 \times 10^{-1}$	$4/070 \times 10^{-1}$	۰
۶ و ۴	۱	$7/4518 \times 10^{-3}$	$1/849 \times 10^{-1}$	$1/777 \times 10^{-1}$	$2/085 \times 10^{-3}$
	۲	$1/1061 \times 10^{-2}$	$3/668 \times 10^{-1}$	$3/527 \times 10^{-1}$	۰
۵ و ۳	۱	۰	$9/422 \times 10^{-2}$	$8/571 \times 10^{-2}$	$1/717 \times 10^{-3}$
	۲	۰	$1/876 \times 10^{-1}$	$1/713 \times 10^{-1}$	۰

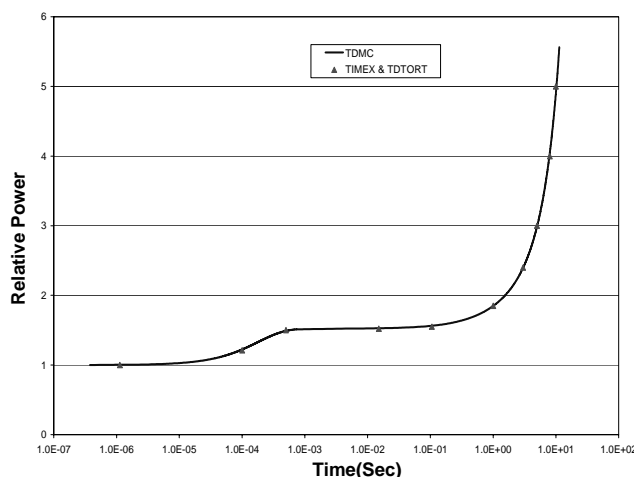
۴-۲ تغییر در سطح مقطع

مسأله آزمون دوم، مسأله ای است که ترابرد نوترون را در یک رآکتور سریع شامل سوخت، بازتابنده و میله های کنترل با دو گروه انرژی و شش گروه نوترون تأخیری شبیه سازی می کند. این مسأله به وسیله کدهای TIMEX [۸] و TDTORT [۹] نیز حل شده است. کد TIMEX معادله ترابرد نوترون را به روش جهات گسسته^(۱۱) و بصورت وابسته به زمان حل می کند. کد TDTORT تعمیم کد TORT به حالت های وابسته به زمان است، که مسایل سه بعدی شامل چشمه های ثابت، را به روش جهات گسسته حل می کند. هندسه این مسأله متشکل از هفت تیغه مجاور هم است که اطراف آنها خلاء می باشد. نواحی ۱ و ۷ بازتابنده، نواحی ۲، ۴ و ۶ سوخت و نواحی ۳ و ۵ میله های کنترل را تشکیل می دهند. ضخامت نواحی مختلف این سیستم به ترتیب برابر با $40/00$ ، $47/37$ ، $9/00$ ، $34/00$ ، $9/00$ ، $9/00$ و $47/37$ (مجموعاً $226/74$) سانتی متر است. هندسه مسأله در شکل ۲ و پارامترهای شش گروهی نوترون های تأخیری و سطح مقطع های نواحی مختلف این رآکتور به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ نشان داده شده اند [۹]. کسر کل نوترون های تأخیری $0/0032$ است. نتایج TDMC برای ضریب تکثیر و زمان تولید نوترون در این سیستم به ازای ۳۰ سیکل و 1500000 تاریخچه (پس از کنار گذاشتن نتایج ۱۰ سیکل اولیه جهت رسیدن سیستم به حالت پایدار) عبارتست از:

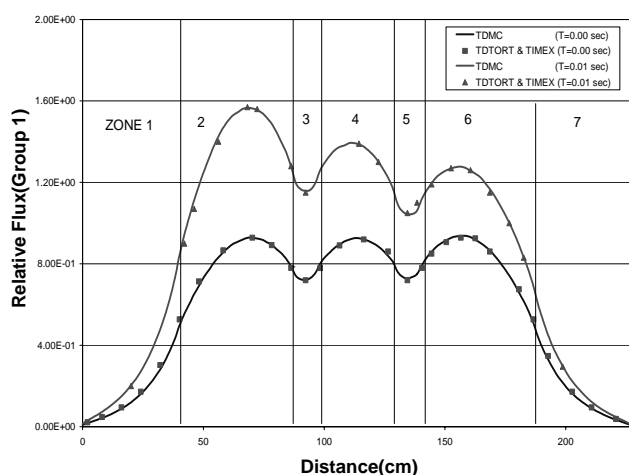
$$k = 1.0001 \pm 0.0007$$

$$\tau_p \equiv \ell = 0.3791 \pm 0.0007 \mu\text{sec}$$

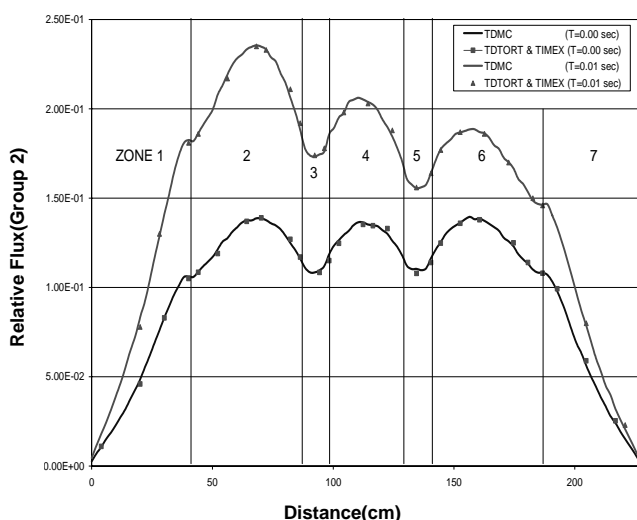
تزریق رآکتیویته به سیستم ممکن است با تغییر در مقدار، ابعاد، چگالی، یا سطح مقطع مواد موجود در سیستم صورت پذیرد. هر یک از این موارد در TDMC قابل شبیه سازی می باشد. بدین منظور تغییرات صورت گرفته در طی هر سیکل، بطور خودکار در محاسبات سیکل بعد اعمال می گردد. به منظور نشان دادن این موضوع تغییراتی در سطح مقطع ماکروسکوپی شکافت نواحی ۲ و ۶ اعمال شده است، بدین گونه که پس از رسیدن سیستم به حالت پایدار در زمان $t=0$ ، سطح مقطع ماکروسکوپی شکافت در ناحیه ۲ پنج درصد افزایش و در ناحیه ۶



شکل ۳- تغییرات توان نسبی سیستم بر حسب زمان.



شکل ۴- توزیع شار نوترون‌های گروه اول (سریع) پس از تزریق رآکتیویته بصورت تغییر در سطح مقطع شکافت نواحی ۲ و ۶.



شکل ۵- توزیع شار نوترون‌های گروه دوم (کند) پس از تزریق رآکتیویته بصورت تغییر در سطح مقطع شکافت نواحی ۲ و ۶.

تغییرات زمانی توان سیستم در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج این کد با نتایج بدست آمده از کدهای TIMEX و TDTORT بخوبی مطابقت دارد. این تزریق رآکتیویته سبب تغییراتی در توزیع شار نیز خواهد شد. نتایج حاصل از TDMC، همچنین کدهای مذکور برای توزیع مکانی شار در زمان‌های $t=0$ و $t=0.01$ ثانیه، برای نوترون‌های گروه ۱ و ۲ بترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند [۸ و ۹]. این دو شکل توزیع نسبی شار برای رفتار متوسط یک نوترون را نشان می‌دهند. نسبت شار گروه‌های یک و دو در نقاط مختلف سیستم، از مقایسه این دو شکل بدست می‌آید. همچنین وجود قله کوچک در شار گروه دوم در ناحیه بازتابنده مشهود است. خطای آماری نتایج نشان داده شده در این دو شکل، در حدود ۰/۳ درصد است که برای اجتناب از شلوغی شکل نشان داده نشده است.

همانطور که گفته شد، کد TDMC محاسبات را برای هر سیکل انجام می‌دهد. این مسأله آزمون، یک رآکتور سریع را شبیه‌سازی می‌کند که فاصله زمانی هر سیکل آن در حدود چند دهم میکروثانیه است، از اینرو بدست آوردن جواب‌هایی با خطاهای آماری کم زمان قابل توجهی را از کامپیوتر می‌گیرد. برای بدست آوردن نمودار مربوط به یک صدم ثانیه بعد از تزریق رآکتیویته، با استفاده از ۲۰۰۰۰ تاریخچه، محاسبات کامپیوتری حدود ده ساعت بطول انجامیده است.

۳-۴ توزیع مکانی شار در حالت گذرا

یکی دیگر از قابلیت‌های TDMC، محاسبه توزیع مکانی شار در حالت گذرای سیستم، یعنی قبل از رسیدن آن به مد اصلی خود، می‌باشد. اگر توان سیستم تا زمان $t=0$ در حد صفر بوده و در این لحظه یک چشمه نقطه‌ای پالسی، تعداد قابل ملاحظه‌ای نوترون در مرکز سیستم آزاد کند، در لحظات اولیه که سیستم حالت گذرای خود را طی می‌کند، توزیع شار در صفحه مرکزی بیشتر است و با گذشت زمان به مد اصلی خود نزدیکتر می‌شود. شکل ۶ توزیع مکانی شار نوترون‌های سریع را در حالت گذرای سیستم در زمان‌های ۰/۳۸، ۰/۷۶، ۱/۱۳، ۱/۸۹ و ۴/۲ میکروثانیه نشان می‌دهد. بطوری که ملاحظه می‌شود با گذشت زمان، توزیع شار به مد اصلی خود نزدیکتر شده و پس از گذشت حدود ۴ میکروثانیه به حالت پایدار می‌رسد. کدهایی مانند ANISN و TDTORT، توزیع شار حالت پایدار سیستم را حساب می‌کنند ولی قادر به محاسبه توزیع شار حالت گذرای سیستم نیستند.



تغییرات زمانی توان سیستم با استفاده از معادله سینتیک نقطه‌ای عبارتست از [۱۰]:

$$P(t) = \exp[A(t)] \left\{ P(0) + \int_0^t Q(t') \exp[-A(t')] dt' \right\} \quad (5)$$

که در آن:

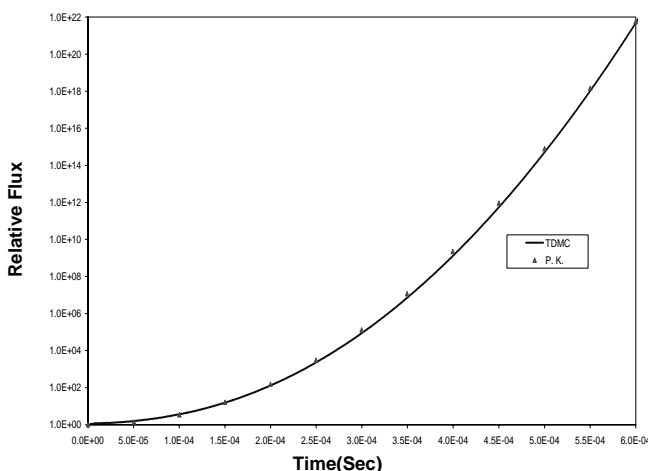
$$A(t) = (\beta / \ell) \int_0^t [\kappa(t') - 1] dt' ,$$

$$Q(t) = (\beta / \ell) \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(0) + S(t)$$

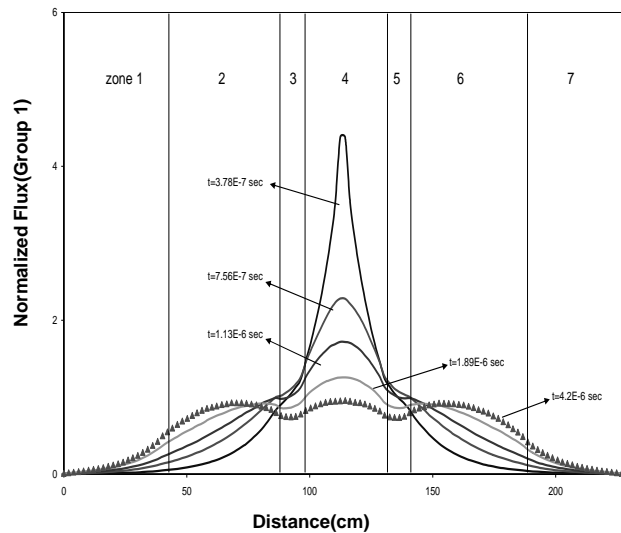
κ رآکتیویته بر حسب دلار و S قدرت چشمه خارجی است. با توجه به اینکه سیستم تا زمان $t = 0$ بحرانی بوده است، با صرف نظر کردن از تغییرات میزان تولید نوترون‌های تأخیری در زمان‌های کوتاه پس از تزریق رآکتیویته داریم: $Q(t) = (\beta / \ell) P(0)$. با جای گذاری $\kappa(t) = \gamma t$ ، که γ' ضریب رآکتیویته خطی بر حسب دلار بر ثانیه است، تغییرات زمانی توان سیستم عبارتست از:

$$P(t) = \exp[(\beta / \ell)(\gamma t^2 / 2 - t)] \left\{ P(0) + (\beta / \ell) P(0) \int_0^t \exp[-(\beta / \ell)(\gamma t'^2 - t')] dt' \right\} \quad (6)$$

این انتگرال را می‌توان به روش‌های عددی حل کرد. تغییرات زمانی قدرت سیستم از رابطه (۶)، همچنین TDMC محاسبه و در شکل ۷ رسم شده است.



شکل ۷- تغییرات زمانی توان سیستم حساب شده با TDMC و معادلات سینتیک نقطه‌ای.



شکل ۶- توزیع مکانی شار نوترون‌های گروه ۱ (سریع) در چند زمان مختلف.

۴-۴ سیستم‌های با مرز متغیر با زمان

بطوری که گفته شد، در مواردی که عملاً با سیستم‌هایی با مرزهای متغیر با زمان روبرو هستیم، TDMC می‌تواند تغییرات زمانی مرزهای سیستم را در محاسبات اعمال کند. مسأله آزمون شماره ۲ را مجدداً در نظر می‌گیریم و فرض می‌کنیم که در فاصله زمانی هر سیکل مرز بین نواحی ۳ و ۴ به مقدار 0.0025 سانتی‌متر به سمت چپ و مرز بین نواحی ۴ و ۵ به همین مقدار به سمت راست جابجا می‌شوند. در اثر این تغییرات، ضخامت میله‌های کنترل با سرعت 0.0066 سانتی‌متر بر میکروثانیه کاهش، و ضخامت ناحیه سوخت مرکزی به میزان دو برابر افزایش می‌یابد که در هندسه یک بعدی می‌توان آن را شبیه بیرون کشیدن میله‌های کنترل از رآکتور در نظر گرفت (هر چند جایگزینی سوخت بجای میله‌های کنترل در یک رآکتور همگن حاوی سوخت محلول اتفاق می‌افتد، ولی بدیهی است که مثال مذکور یک مسأله فرضی است که هدف اصلی آن ارزیابی نتایج کد برای محاسبات مورد نظر می‌باشد نه یک مسأله واقعی تکنولوژیکی). TDMC می‌تواند تغییرات زمانی رآکتیویته سیستم را در اثر تغییرات مذکور حساب کند. بر اساس نتایج این کد، در فاصله‌های زمانی کوتاه پس از آغاز تغییر مرزها، می‌توان رآکتیویته تزریق شده به سیستم را بصورت یک رآکتیویته خطی با ضریب $\gamma = 115 \text{ s}^{-1}$ در نظر گرفت. با توجه به اینکه رآکتیویته سیستم تابعی از زمان است، TDMC تغییرات زمانی قدرت سیستم را از روابط (۲) حساب می‌کند.



References:

1. M. Shayesteh, M. Shahriari, G. Raisali, "Simulation of time dependent neutron transport in fission reactors using Monte-Carlo method," *Journal of Nuclear Science and Technology*, **39**, 1-8 (2007).
2. N.S. Garis, I. Pazsit, D.C. Sahni, "Modeling of a vibrating reactor boundary and calculation of the induced neutron noise," *Annals of Nuclear Energy*, **23**, 1197-1208 (1996).
3. V. Arzhanov, "Multi-group theory of neutron noise induced by vibrating boundaries," *Annals of Nuclear Energy*, **29**, 2143-2158 (2002).
4. I. Pazsit and V. Arzhanov, "Linear reactor kinetics and neutron noise in systems with fluctuating boundaries," *Annals of Nuclear Energy*, **27**, 1385-1398 (2000).
5. Weston M. Stacey, "Nuclear reactor physics," John Wiley & Sons, New York, Chapter, **2** (2001).
6. J.J. Duderstadt and L.J. Hamilton, "Nuclear reactor analysis," John Wiley & Sons, New York, Chapter, **2** (1976).
7. A.F. Henry, "Nuclear reactor analysis," MIT Press, Cambridge, Massachusetts, Chapter, **7** (1975).
8. T.R. Hill and W.H. Reed, "TIMEX: a time-dependent explicit discrete ordinates program for the solution of multigroup transport equation with delayed neutron," LA-6201-MS, Los Alamos Scientific Laboratory (1976).
9. S. Goluoglu and H.L. Dodds, "A time-dependent three-dimensional neutron transport methodology," *Nucl. Sci. & Eng.*, **139**, 248-261 (2001).
10. Z.A. Akcasu, G.S. Lellouche, S. Gerald, L.M. Shokin, "Mathematical methods in nuclear reactor dynamics," ACADEMIC Press, INC, U.S. (1971).

۵- نتیجه‌گیری

کد TDMC برای بررسی حالت‌های گذرای رآکتورهای شکافتی توسعه داده شده است. در این کد، که ذرات به روش مونت کارلو دنبال شده‌اند و اندرکنش‌های محتمل شبیه‌سازی می‌شوند، پارامترهایی مانند توان، رآکتیویته، تعداد هسته‌های مولد نوترون تأخیری و میزان وقوع هر یک از این اندرکنش‌ها را می‌توان در شرایط گذرا و در زمان‌هایی از مرتبه طول عمر نوترون حساب کرد. برای ارزیابی TDMC جهت محاسبات شرایط گذرای سریع، نتایج آن با روش‌های دیگر مقایسه شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که پاسخ این کد با نتایج بدست آمده از محاسبات تحلیلی که در شرایط ساده شده قابل انجام است و همچنین با نتایج کدهای TIMEX و TDTORT که بر اساس روش جهات گسسته معادله ترابرد نوترون را حل می‌کنند، توافق بسیار خوبی دارد. پارامترهای مختلفی نظیر ترکیب مواد نواحی مختلف، ابعاد نواحی و چگالی مواد را می‌توان تغییر داده و پاسخ سیستم را بدست آورد. بر خلاف روش‌های عددی بکار گرفته شده در حل معادله ترابرد نوترون که اعمال شرایط مرزی متغیر با زمان را مشکل می‌سازد، در این کد می‌توان بدون درگیر شدن با شرایط مرزی، رفتار وابسته به زمان سیستم‌های مختلف را بررسی کرد.

پی‌نوشت‌ها:

- ۱- TDMC: Time-Dependent Monte- Carlo
- ۲- Extrapolation Length
- ۳- Deterministic
- ۴- Central Limit Theorem
- ۵- Track Length
- ۶- Destruction Time
- ۷- Generation Time
- ۸- Precursor
- ۹- First Persistent Fission Chain
- ۱۰- Weak Source
- ۱۱- Discrete Ordinates