

محاسبه طول پخش نوترون حرارتی در محیط آب‌سبک با استفاده از کد MCNP

محمد ارکانی*

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

*Email: markani@aeoi.org.ir

مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۳/۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۹/۱۹

چکیده

یکی از پارامترهای مهم محیط‌های پخش نوترون، طول پخش نوترون حرارتی است. روش مرسوم محاسباتی استفاده از کد MCNP بر مبنای توزیع شار نوترون در محیط و برازش تابع ریاضی مربوطه بر آن است. در این پژوهش، روشی نوین که بر مبنای استفاده از کارت PTRAC است، ارائه شده است. پارامتر طول پخش نوترون حرارتی برای آب‌سبک بر اساس روش‌های فوق محاسبه شده و با مقادیر گزارش شده در مراجع مقایسه گردیده که تطابق خوبی نیز مشاهده شده است. حسن استفاده از روش فوق، عدم نیاز به برازش تابع توزیع شار نوترون است. علاوه بر آن در روش برازش تابع توزیع شار نوترون، فرض می‌شود که تا محل چشمه، فاصله‌ی کافی وجود دارد. این مسأله بر میزان خطای نتایج حاصل، اثرگذار است، چرا که تابع توزیع شار نوترون در همه جا غیر از محل چشمه صادق است. در این پژوهش درستی روش پیشنهادی به صورت عددی در محیط آب سبک مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: کد MCNPX، طول پخش نوترون حرارتی، شار نوترون

Calculation of Thermal Neutron Diffusion Length in a Light Water Media using MCNP Code

M. Arkani*

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

Technical Paper

Received 24.5.2022, Accepted 10.12.2022

Abstract

One of the key parameters of neutron diffusing media is the thermal neutron diffusion length. The popular calculational method is founded on utilizing MCNP code and curve fitting of a mathematical function to the neutron flux distribution in the media. In this investigation, a novel method based on the PTRAC card is proposed. The thermal neutron diffusion length parameter for light and water is calculated based on the above methods. The results are compared with the reported values and significant agreement is seen. The advantage of the above method is its independence from curve fitting to calculate the neutron flux distribution. In addition, in the curve fitting method, it is assumed that there is enough distance from the source location. This affects the error of the results because the neutron flux distribution function is correct everywhere except at the neutron source location. In the present investigation, the correctness of the proposed method in light water media is evaluated numerically.

Keywords: MCNP code, Neutron diffusion length, Neutron flux

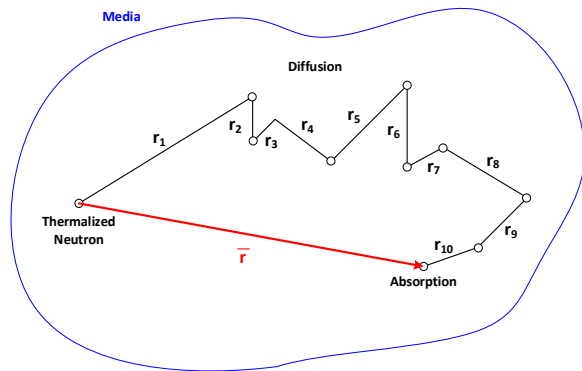


۱. مقدمه

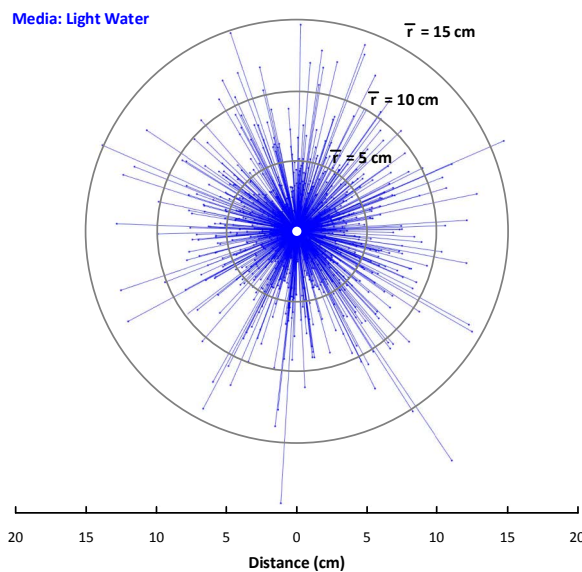
در رآکتور هسته‌ای، تولد نوترون‌ها به واسطه‌ی شکافت هسته‌ای است. نوترون‌های حاصل از شکافت دارای متوسط انرژی ۲ MeV می‌باشند. این نوترون‌ها بعد از تولد توسط برخوردهای متوالی انرژی خود را از دست می‌دهند. دورانی که نوترون‌ها با برخوردهای متوالی کند می‌شوند را دوران کند شدن می‌نامند. نوترون حرارتی شده در برخوردهای بعدی خود می‌تواند انرژی از دست بدهد و یا انرژی دریافت کند. یعنی از لحاظ انرژی با ذرات پیرامون خود در محیط به تعادل می‌رسد و در نهایت با جذب نوترون در محیط، تاریخچه‌ی آن به پایان می‌رسد. فاصله‌ی بین نقطه‌ای که نوترون در آن حرارتی شده تا نقطه‌ای که جذب می‌شود متناسب با طول پخش نوترون حرارتی است. این مطلب در شکل ۱ نشان داده شده است. نوترون حرارتی شده طی برخوردهای متوالی مسیری زیگزاگی را می‌پیماید و سرانجام جذب می‌شود. قابل ذکر است در این تعریف فرض شده که محیط بی‌نهایت است. فاصله‌ی بین نقاطی که نوترون، حرارتی شده و جذب می‌شود در این شکل برابر با \bar{r} می‌باشد. ارتباط بین فاصله‌ی \bar{r} و طول پخش نوترون حرارتی توسط رابطه‌ی زیر بیان می‌شود [۱]:

$$L = \sqrt{\frac{1}{6} \bar{r}^2} \quad (1)$$

چشمه‌ی نوترونی را در نظر بگیرید که نوترون‌های گسیل شده از آن به صورت هم‌سان‌گرد و تک انرژی (۰٫۰۲۵۳ eV) می‌باشند. این چشمه در مبدأ مختصات قرار دارد. اگر تعداد ۱۰۰۰ تاریخچه از نوترون‌های گسیل شده از چشمه را با استفاده از کد MCNP [۲] شبیه‌سازی کنید (در قسمت‌های بعدی راجع به نحوه شبیه‌سازی مسأله‌ی فوق شرح داده شده است)، محل تولد همه‌ی نوترون‌ها مبدأ مختصات (جایی که چشمه‌ی نوترون در آن مستقر شده است) و نقطه‌ی مرگ آن‌ها محل جذب آن‌هاست. از این‌رو فاصله‌ی تولد تا نقطه‌ی مرگ نوترون‌ها برابر \bar{r} می‌باشد. در شکل ۲ این مطلب به نمایش گذاشته شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، تنها تعداد کمی از نوترون‌ها در فواصل بیش‌تر از ۱۵ سانتی‌متر در محیط آبسبک جذب می‌شوند.



شکل ۱. برخوردهای متوالی نوترون از نقطه‌ای که حرارتی شده است تا نقطه‌ای که جذب می‌گردد.



شکل ۲. فاصله‌ی تولد تا مرگ (جذب) نوترون‌ها در محیط آبسبک که با استفاده از کد MCNP شبیه‌سازی شده است. در مرکز چشمه‌ای نقطه‌ای و هم‌سان‌گرد برای نوترون‌های حرارتی (تک‌انرژی و برابر با ۰٫۰۲۵۳ eV) قرار دارد.

در رابطه با محاسبه و یا اندازه‌گیری طول پخش نوترون حرارتی در گذشته کارهای متعددی به انجام رسیده است [۳-۸]. به عنوان مثال، در تحقیقی که توسط مارتینیهو [۳] به انجام رسیده، با استفاده از روش استیشنری^۱، به صورت تئوری طول پخش نوترون حرارتی در محیط آب تخمین زده شده است و یا در پژوهشی که توسط سیکال [۶] به انجام رسیده، طول پخش نوترون حرارتی در محیط آب و در دماهای مختلف اندازه‌گیری شده است.



در نتیجه داریم:

$$dn = \frac{S_0}{L^2} \exp\left(-\frac{r}{L}\right) r dr \quad (8)$$

اگر رابطه‌ی فوق را به ازای یک نوترون بهنجار کنیم، در این صورت خواهیم داشت:

$$p(r) dr = \frac{r}{L^2} \exp\left(-\frac{r}{L}\right) dr \quad (9)$$

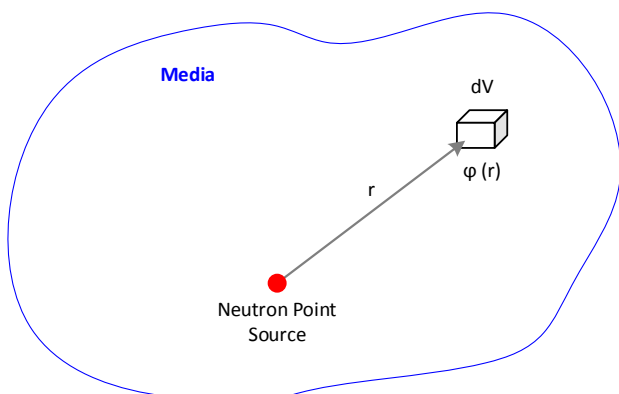
از این رو $p(r)$ احتمال رسیدن نوترون به نقطه‌ی r (بدون واکنش جذب) و انجام واکنش منجر به جذب در ناحیه‌ی r و $r+dr$ می‌باشد. قابل ذکر است انتگرال‌گیری از رابطه‌ی فوق در کل فضا (از شعاع صفر تا بی‌نهایت)، مقدار واحد را به دست می‌دهد. اگر با وزن $p(r)$ مقدار r^2 در کل فضا متوسط‌گیری شود، داریم [۱]:

$$\bar{r^2} = \int_0^{\infty} r^2 p(r) dr = \frac{1}{L^2} \int_0^{\infty} r^2 \exp\left(-\frac{r}{L}\right) dr = 6L^2 \quad (10)$$

در نتیجه داریم [۱]:

$$L = \sqrt{\frac{1}{6} \bar{r^2}} \quad (11)$$

این رابطه، همان رابطه‌ی (۱) می‌باشد که در فوق برای طول پخش نوترون حرارتی آورده شد.



شکل ۳. چشمه‌ی نقطه‌ای و همسان‌گرد نوترون در مرکز قرار دارد و المان دیفرانسیلی حجمی در فاصله‌ی r از آن می‌باشد. محیط بی‌نهایت است و شار نوترون در نقطه‌ی r برابر با $\phi(r)$ است.

۲. توزیع شار نوترون حاصل از چشمه‌ی نقطه‌ای و همسان‌گرد

شار نوترون ناشی از چشمه‌ی نقطه‌ای با شدت S_0 و همسان‌گرد در محیطی نامحدود را در نظر می‌گیریم. به علت تقارن کروی، معادله‌ی پخش به صورت زیر نوشته می‌شود [۱]:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\phi}{dr} \right) - \frac{1}{L^2} \phi = 0 \quad (2)$$

این معادله در همه جا غیر از $r=0$ یعنی محل چشمه صادق است. با حل معادله‌ی دیفرانسیل (۲) و استفاده از شرایط مرزی، $\phi(r)$ به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید [۱]:

$$\phi(r) = \frac{S_0}{4\pi D r} \exp\left(-\frac{r}{L}\right) \quad (3)$$

قابل ذکر است با توجه به رابطه‌ی فوق، شار نوترون با قدرت چشمه، S_0 ، به صورت مستقیم متناسب است.

۳. طول پخش نوترون حرارتی

چشمه‌ی نقطه‌ای با شدت S_0 و همسان‌گرد در محیطی نامحدود را در نظر بگیرید (به شکل ۳ مراجعه شود). در فاصله‌ی r از چشمه‌ی نوترون، المان دیفرانسیلی حجمی از محیط که در شار نوترون $\phi(r)$ قرار دارد را فرض کنید. آهنگ واکنش منجر به جذب نوترون در المان دیفرانسیلی حجمی dV برابر است با [۱]:

$$dn = \sum_a \phi(r) dV \quad (4)$$

المان حجمی dV که در ناحیه‌ی r و $r+dr$ قرار دارد برابر است با [۱]:

$$dV = 4\pi r^2 dr \quad (5)$$

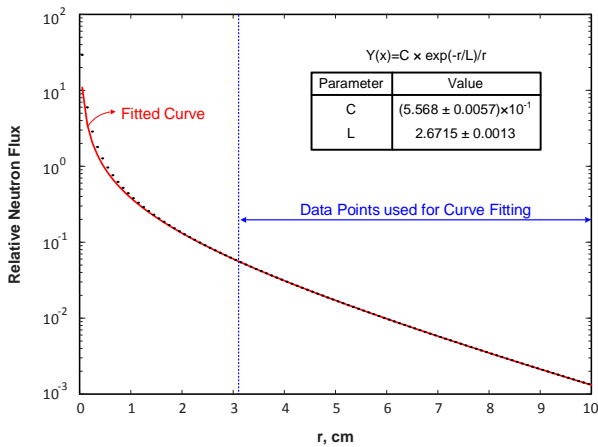
با جای‌گذاری روابط (۳) و (۵) در رابطه‌ی (۴) خواهیم داشت [۱]:

$$dn = \frac{\sum_a S_0}{D} \exp\left(-\frac{r}{L}\right) r dr \quad (6)$$

می‌دانیم سطح پخش نوترون حرارتی دارای تعریفی به صورت زیر است [۱]:

$$L^2 = \frac{D}{\sum_a} \quad (7)$$





شکل ۴. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از کد MCNP برای توزیع شار نوترون در کره و برازش رابطه‌ی (۳) بر آن.

روش دوم: استفاده از کارت PTRAC و تعقیب نوترون‌ها

به رابطه‌ی (۸) توجه کنید، چنان‌چه بتوان با استفاده از کد MCNP تابع $p(r)$ را محاسبه نمود، با حل عددی انتگرال آورده شده در رابطه‌ی (۹) و استفاده از رابطه‌ی (۱۰) می‌توان طول پخش نوترون حرارتی را در محیط محاسبه نمود. بدین ترتیب که نتایج عددی حاصل از کارت PTRAC در مقدار r^2 ضرب شده و نتیجه به صورت عددی انتگرال‌گیری می‌شود. برای این منظور کافیسیت در ورودی کد MCNP چشمه‌ای در مبدأ مختصات به صورت همسان‌گرد برای نوترون‌های حرارتی تعریف نمود. به این ترتیب با استفاده از کارت PTRAC می‌توان مختصات نقاطی را که نوترون‌ها در آن‌ها جذب محیط می‌شوند را محاسبه و ثبت نمود. خروجی کارت PTRAC به صورتی فایلی مجزا است که قرائت آن در محیط نرم‌افزار متلب نیازمند کار کردن با دستورات مربوط به فایل‌ها است. در شکل ۵ نمونه دستورات استفاده شده برای تحلیل فایل خروجی کارت PTRAC آورده شده است.

فراوانی بهنجار شده‌ی جذب نوترون‌ها در فواصل مختلف از چشمه‌ی نوترون، همان $p(r)$ است. استفاده از کارت PTRAC به سادگی استفاده از کارت TMESH نمی‌باشد. با اجرای شبیه‌سازی، فایلی با نام PTRAC ایجاد می‌شود که دارای فرمت اسکی است. فایل اسکی PTRAC بایستی در مرحله‌ی بعد، پردازش شود. برای این منظور می‌توان از محیط‌های مختلف برنامه‌نویسی بهره جست. در این پژوهش ابزار برنامه‌نویسی نرم‌افزار متلب انتخاب شده است. تابع $p(r)$ با استفاده از کارت PTRAC در محیط آبسبک محاسبه شده و نتیجه‌ی آن در شکل ۶ ترسیم شده است. طول پخش نوترون حرارتی محاسبه شده از این روش برای آبسبک به ازای

۴. محاسبه‌ی طول پخش نوترون حرارتی با استفاده از کد

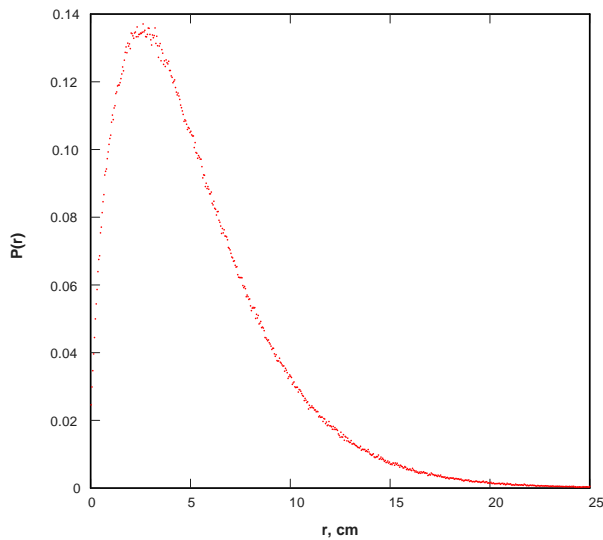
MCNP

روش اول: استفاده از برازش رابطه‌ی (۳) بر توزیع شار نوترون در محیط

یکی از روش‌های محاسبه‌ی طول پخش نوترون حرارتی، استفاده از رابطه‌ی (۳) است. به این ترتیب که با استفاده از کد MCNP (و یا اندازه‌گیری تجربی) چشمه‌ای نقطه‌ای و همسان‌گرد را در مرکز محیطی نسبتاً بزرگ (آن‌قدر بزرگ که نشت نوترون‌ها از مرزهای آن بسیار ناچیز باشد) شبیه‌سازی می‌گردد. با استفاده از کد MCNP می‌توان توزیع شار نوترون را در فواصل مختلفی محاسبه نمود. بعد از محاسبه‌ی شار نوترون، رابطه‌ی (۳) بر نتایج به‌دست آمده برازش شده و طول پخش نوترون حرارتی محاسبه می‌گردد.

چشمه‌ای با انرژی نوترون‌های حرارتی را در نظر بگیرید که در مرکز کره‌ای از آب سبک به شعاع ۱۵۰ سانتی‌متر قرار دارد. چشمه از نوع نقطه‌ای بوده که نوترون تک انرژی (۰/۰۲۵۳ eV) به صورت همسان‌گرد از خود گسیل می‌کند. شعاع طوری انتخاب شده است که از دید نوترون‌هایی که در مرکز متولد می‌شوند بی‌نهایت دیده شود. به عبارت دیگر احتمال نشت نوترون‌های متولد شده در مرکز کره، بسیار ناچیز باشد. این درحالیست که تا شعاع ۱۰۰ سانتی‌متر با استفاده از کارت Tmesh در کد MCNP توزیع شار نوترون محاسبه شده است. در مجموع ۱۰۰۰ کره‌ی تودرتو که شعاع هر یک ۰/۱ سانتی‌متر با دیگری تفاوت دارد در نظر گرفته شده است. کارت TMESH نیز برای محاسبه‌ی شار نوترون استفاده شده است. تعداد تاریخچه‌ی در نظر گرفته شده برابر با ۱۰۰ میلیون ذره‌ی نوترون است. نتایج به‌دست آمده با استفاده از کد MCNP را می‌توان در محیط نرم‌افزار متلب [۹] ترسیم کرد و سپس رابطه‌ی (۳) را بر آن‌ها برازش نمود. همان‌طوری‌که در فوق نیز اشاره شد، رابطه‌ی (۳) در نزدیکی چشمه‌ی نوترون صادق نمی‌باشد. از این‌رو برازش رابطه‌ی (۳) بر داده‌های به‌دست آمده از کد MCNP، به ازای شعاع‌های بزرگ‌تر از ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. این مطلب در شکل ۴ نشان داده شده است. مقدار L ، طول پخش نوترون حرارتی، برابر با 2.6715 ± 0.0013 سانتی‌متر محاسبه می‌گردد. شایان ذکر است، روش معرفی شده در فوق، تنها وقتی می‌تواند استفاده شود که محیط همگن، و چشمه‌ی نقطه‌ای در مرکز آن قرار داشته باشد و آن‌قدر بزرگ باشد که نشت نوترون‌ها از لبه‌های آن در مقایسه با میزان جذب نوترون در حجم آن، ناچیز باشد.





شکل ۶. تابع توزیع احتمال $p(r)$ (به رابطه‌ی (۸) مراجعه کنید) که با استفاده از کارت PTRAC از کد MCNP شبیه‌سازی و محاسبه شده است.

جدول ۱. طول پخش نوترون حرارتی (در دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) [cm]

تعداد ذره مدل شده	مقدار محاسبه شده از روش دوم	مقدار محاسبه شده از روش اول	لامارش [۱]
1×10^6	۲,۶۴۴۳	$۲,۶۷۱۵ \pm ۰,۰۰۱۳$	۲,۸۵
$۱,۵ \times 10^6$	۲,۶۴۵۴		
$۱,۷۵ \times 10^6$	۲,۶۴۴۱		
۲×10^6	۲,۶۴۳۶		

۵. نتیجه‌گیری

یکی از پارامترهای مهم نوترونیک محیط، طول پخش نوترون حرارتی است. روش مرسوم برای تخمین طول پخش نوترون حرارتی، استفاده از برازش رابطه‌ی تحلیلی بر توزیع شار نوترون در محیطی که در آن چشمه‌ی نوترون نقطه‌ای قرار دارد است (توزیع شار نوترون می‌تواند محاسبه و یا اندازه‌گیری گردد). این روش نیاز به برازش تابع تحلیلی مربوطه دارد. علاوه بر آن در نزدیکی چشمه نیز صادق نمی‌باشد که خود می‌تواند منشأ خطا در نتایج باشد. در این پژوهش روشی نوین برای محاسبه‌ی طول پخش نوترون حرارتی معرفی شده است که بر اساس کارت PTRAC از کد MCNP می‌باشد. با استفاده از این کارت محل مرگ یا جذب چند میلیون نوترون در فایل‌ی مجزا ثبت می‌گردد. از تحلیل داده‌های به‌نجا شده، طول پخش نوترون حرارتی به‌دست می‌آید.

ره‌گیری دو میلیون ذره برابر است با $۲,۶۴۳۶$ سانتی‌متر. در جدول ۱ خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده از روش‌های مختلف و همچنین مقدار گزارش شده در یکی از مراجع [۱] آورده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، نتیجه‌ی حاصل از روش دوم به ازای مقادیر مختلفی از تعداد ذرات مدل شده است که حساسیت چندانی به تعداد ذرات انتخاب شده مشاهده نمی‌گردد. از این‌رو به ازای دو میلیون ذره، آمار نسبتاً خوبی از شبیه‌سازی به‌دست آمده است.

شایان ذکر است، در شکل‌های ۴ و ۶ تغییرات نتایج نشان داده شده به ترتیب تا ۱۰ و ۲۵ سانتی‌متر است. دنباله‌ی نتایج نشان داده شده به صورت نمایی است، و نشان دادن آن‌ها در شکل‌ها سبب می‌شود تا بخش‌های مهم توابع مورد نظر به خوبی مشاهده نگردند.

```
File Edit Search View Encoding Language Settings Tools Macro Run Plugins Wi
point.m Fission_Energy_Distribution.m TRR_Fuel_Spectrum_01 TRR_Fuel_Spectrum
1 clc
2 clear
3 format long
4
5 fileID = fopen('ptrac');
6 C=textscan(fileID,'%s','delimiter','\n');
7 fclose(fileID);
8
9 LC=(length(C{1}))-2;
10 L_Cell=cell2mat(C{1}(LC));
11 L_Text=textscan(L_Cell,'%d %d');
12 N=cell2mat(L_Text);
13
14
15 Line=10;
16
17 j=1;
18 for i=1:N(1)
19
20 L_Cell=cell2mat(C{1}(Line));
21 L_Text=textscan(L_Cell,'%f %f ');
22 NPS(i,:)=cell2mat(L_Text);
23
24 L_Cell=cell2mat(C{1}(Line+1));
25 L_Text=textscan(L_Cell,'%d %d %d %d %d %d');
26 Reaction(i,:)=cell2mat(L_Text);
27
28 if Reaction(i,3)==17
29 L_Cell=cell2mat(C{1}(Line+4));
30 Line=Line+5;
31 elseif (Reaction(i,3)==12) | (Reaction(i,3)==15)
32 L_Cell=cell2mat(C{1}(Line+2));
33 Line=Line+3;
34 else
35 disp('ERROR');
36 Reaction(i,:);
37 end
38
39 L_Text=textscan(L_Cell,'%f %f %f %f %f %f %f');
40 Point(j,:)=cell2mat(L_Text);
41 j=j+1;
42
43 if mod(j,10000)==0
44 disp(['NPS = ' num2str(j) ' ( ' num2str(N(1)) ' )']);
45 end
46 end
47
48 load('Point.mat')
49
50 R=sqrt((Point(:,1).^2)+(Point(:,2).^2)+(Point(:,3).^2));
51 save('Point.mat','Point','R','NPS','Reaction');
52
53 [H,r]=hist(R,1000);
54 Pr=H./trapz(r,H);
55 Diffusion_Length=sqrt(trapz(r,r.^2.*Pr)/6);
56 plot(r,Pr,'k');
57
```

شکل ۵. دستورات نوشته در محیط متلب برای کار با فایل خروجی کارت PTRAC

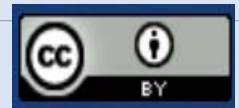


مراجع

1. John R. Lamarsh, *Introduction to Nuclear Reactor Theory*, Addison-Wesley Publishing Company, (1961).
2. Denise B. Pelowitz, *MCNPX User's Manual, Version 2.6*, (2008).
3. E. Martinho, J. Salgado, *Diffusion and extrapolation lengths of thermal neutrons in water by a stationary method*, *Journal of Nuclear Energy*, **22(10)**, 597-600. (1968).
4. V. Bhushan, S.K. Trikha, *Pulsed neutron and diffusion length study in bismuth*, *Journal of Nuclear Energy*, **25(1)**, 41-50 (1971).
5. S.A.M.M. Siddiqui, M.M.R. Williams, *A study of neutron diffusion lengths in heterogeneous, non-multiplying plate assemblies*, *Journal of Nuclear Energy*, **27(5)**, 273-301 (1973).
6. J. Csikai, A. Daroczy, K. Dede, *Measurements of the diffusion length of thermal neutrons in water from 16 to 89° C and in diphyl (Dowtherm A) at 185° C*, *Journal of Nuclear Energy, Parts A/B. Reactor Science and Technology*, **15(4)**, 204-208 (1961).
7. M. Reier, *The diffusion length of thermal neutrons in poisoned water*, *Journal of Nuclear Energy, Parts A/B. Reactor Science and Technology*, **14(1-4)**, 186-188 (1961).
8. I.C. Goyal, A.K. Ghatak, *Diffusion length calculations in water*, *Journal of Nuclear Energy, Parts A/B. Reactor Science and Technology*, **20(8)**, 659-665 (1966).
9. MATLAB 2020b, *The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts*, United State.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

محمد ارکانی (۱۴۰۲)، محاسبه طول پخش نوترون حرارتی در محیط آبسیک با استفاده از کد MCNP، ۱۰۵، ۱۶۵-۱۷۰

DOI: [10.24200/nst.2022.1128.1745](https://doi.org/10.24200/nst.2022.1128.1745)

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1548.html

