



بررسی توزیع انرژی الکترون در پلاسمای چند مؤلفه‌ای در فاصله‌ی بین غلاف و سوخت هسته‌ای

فرشته گلیان*^۱، علی پذیرنده^۲، سعید محمدی^۱

۱. دانشگاه پیام نور تهران، صندوق پستی: ۱۹۵۳۶۳۳۵۱۱، تهران - ایران

۲. گروه مهندسی هسته‌ای، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۱۴۷۷۸۹۳۸۵۵، تهران - ایران

چکیده: با استفاده از معادله‌ی فوکر-پلانک به بررسی تابع توزیع انرژی الکترون در فاصله‌ی بین غلاف و سوخت در رآکتور هسته‌ای VVER-1000 بوشهر پرداخته شد. در این راستا، با استفاده از روش حل عددی رونژ-کوتا معادله‌ی فوکر-پلانک حل شده و رفتار غیرتعادلی الکترون‌های عبوری در فاصله‌ی بین غلاف و سوخت تحلیل شد. برای بالا بردن دقت کار از زبان برنامه‌نویسی C++ استفاده شد. هم‌چنین با به کارگیری کد مونت کارلو GEANT4، واکنش شکافت هسته‌ای در میله‌ی سوخت شبیه‌سازی شده و تابع توزیع انرژی الکترون در فاصله‌ی بین غلاف و سوخت هسته‌ای به دست آمد. نتایج نشان داد که اغلب الکترون‌ها در این ناحیه گرمایی بوده و تابع توزیع انرژی آن‌ها از تابع توزیع ماکسول دور است. هم‌چنین به بررسی اثر گاز کریپتون بر تابع توزیع انرژی الکترون پرداخته و ملاحظه شد که گاز کریپتون اثر ناچیزی بر تابع توزیع الکترون‌ها دارد.

کلیدواژه‌ها: توزیع انرژی الکترون، پلاسمای چند مؤلفه‌ای، فاصله‌ی بین غلاف و سوخت، رآکتور هسته‌ای VVER-1000

Investigation on Electron Energy Distribution in Multi-Component Plasma in Nuclear Fuel Rod Gap

F. Golian*¹, A. Pazirandeh², S. Mohammadi¹

1. Payam Noor University, P.O.Box: 1953633511, Tehran - Iran

2. Nuclear Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, P.O.Box: 1477893855, Tehran - Iran

Abstract: The electron energy distribution function in fuel rod gap of Busheher's VVER-1000 nuclear reactor was investigated using the Fokker-Planck equation. In this regard, the Fokker-Planck equation was solved by using the Runge-Kutta numerical method, and the non-equilibrium behavior of electrons passing through the gap, as an absorbing medium, was evaluated and analyzed. The programming language C++ was employed to acquire high accuracy. Besides, by utilizing the Monte Carlo GEANT4 code, the fission reaction in the fuel rod was simulated and the energy distribution of electron was calculated. Furthermore, it was found that most of the electrons are essentially thermal in the fuel rod gap and the electrons energy distribution is far from Maxwellian distribution. Also, the krypton effect on the energy distribution of electron was investigated. One of the outstanding points that should be mentioned here is that the krypton has no significant effect on the energy distribution function of electrons in the fuel rod gap.

Keywords: Electron Energy Distribution, Multi-Component Plasma, Nuclear Fuel Rod Gap, VVER-1000 Nuclear Reactor

*email: fereshtehgolian@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۹/۱۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۴/۱۴



۱. مقدمه

در عصر حاضر پژوهش‌های زیادی در ارتباط با سوخت هسته‌ای و واکنش شکافت در رآکتورهای هسته‌ای انجام شده است. در این زمینه، محصول‌های شکافت تولید شده در میله‌ی سوخت از اهمیت بسزایی برخوردار هستند. این محصول‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند، تعدادی از آن‌ها در سوخت حل شده و در بستر سوخت باقی می‌مانند، ولی برخی از محصول‌های گازی مانند زنون و کریپتون و یا محصول‌های فرار نظیر ید، سزیم و روییدیم در سوخت نامحلول‌اند و تحت حرکات تصادفی از سوخت خارج می‌شوند.

فاصله‌ی بین غلاف و سوخت در ابتدای کار رآکتور با گاز هلیم با فشار حدود ۲٫۵ مگاپاسکال پر می‌شود و محصول‌های شکافت پس از خروج از سوخت وارد این فضا شده و تشکیل یک پلاسمای چند مؤلفه‌ای می‌دهند که دارای یون‌هایی با درجه‌ی یونش بالا (حدود ۲۰ تا ۲۲ مرتبه) است [۱]. از طرف دیگر الکترون‌ها، ذرات بتای پرنرژی و پرتوهای گاما نیز وارد این فضا می‌شوند و محیطی با شیب دمایی و فشار به وجود می‌آورند که سبب ایجاد مقاومت دمایی می‌شود.

یکی از نکات مهم در سلامت رآکتور هسته‌ای، دمای میله‌ی سوخت است. لازم به ذکر است که دمای میله‌ی سوخت رآکتورهای VVER-۱۰۰۰ در شرایط طبیعی حدود ۱۰۰۰ کلوین است و با افزایش آن، رآکتور در شرایط بحرانی قرار می‌گیرد. از این‌رو در این مقاله به بررسی تابع توزیع انرژی الکترون در فاصله‌ی بین غلاف و سوخت، که در انتقال دمای سوخت مؤثر است، پرداخته شده است. در واقع مسأله‌ی عبور ذرات باردار سبک از یک محیط جاذب بررسی شده است.

پژوهش‌های چندی در ارتباط با محاسبه‌ی تابع توزیع انرژی الکترون انجام شده است [۲، ۳، ۴]. در این پژوهش‌ها تابع توزیع انرژی الکترون در یک پلاسمای تک مؤلفه‌ای محاسبه شده است. هم‌چنین در مرجع [۵] به محاسبه‌ی تابع توزیع انرژی الکترون در پلاسمای تولید شده به وسیله‌ی شکافت - پاره‌ها اشاره شده است. در این مقاله با استفاده از معادله‌ی فوکر - پلانک^(۱) و با به کارگیری روش حل عددی رونژ - کوتا^(۲) توزیع انرژی الکترون در فاصله‌ی بین غلاف و سوخت هسته‌ای رآکتور VVER-۱۰۰۰ بوشهر، به دست آمده است. این تابع توزیع شکل

ساده شده‌ای از معادله‌ی ترابرد بولتزمن است که ابزار مناسبی برای بررسی پدیده‌ی ترابرد ذره در درون سیستم‌های دارای شیب چگالی و دما است. به منظور بالا بردن دقت محاسبه، از زبان برنامه‌نویسی C++ استفاده شده است. هم‌چنین با استفاده از کد مونت کارلوی GEANT^۴ رفتار کاتوره‌ای الکترون در درون این پلاسمای شبیه‌سازی و نتایج حاصل از حل معادله‌ی فوکر - پلانک با نتایج کد مقایسه شده است. در مرجع [۶] نیز از شبیه‌سازی مونت کارلو در تعیین تابع توزیع انرژی الکترون استفاده شده است. از طرف دیگر در این پژوهش به بررسی اثر گاز کریپتون بر توزیع انرژی الکترون پرداخته شد و ملاحظه شد که این گاز اثر قابل ملاحظه‌ای بر این تابع ندارد. در این رابطه، نتایج مرجع [۷] با نتیجه‌ی به دست آمده در این مقاله هم‌خوانی دارد.

۲. معادله‌ی فوکر - پلانک

معادله‌ی بولتزمن توصیف‌کننده‌ی رفتار غیر تعادلی ذرات در یک محیط جاذب است. در این راستا آهنگ تغییرات تابعی مانند احتمال یافتن ذره در فضای فاز، برابر جمع عبارت‌هایی هم‌چون نیروهای خارجی، برخورد و پخش ذرات است. معادله‌ی ترابرد ذرات در سیستم‌های دارای شیب چگالی و دما این است [۸]

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + v \cdot \nabla_r + \frac{F(x)}{m} \nabla_v\right) w(x, v, t) = \left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)_{\text{coll}} \quad (1)$$

که در آن، $w(x, v, t)$ ، m ، $F(x)$ ، v ، ∇_r و ∇_v ، به ترتیب، تابع توزیع در فضای فاز، جرم، نیرو، سرعت، شیب موقعیت و شیب سرعت هستند. در حرکت‌های براونی، بررسی کامل یک سیستم میکروسکوپی شامل حل همه‌ی معادله‌های میکروسکوپی است و چون این امر ناممکن است، توصیف آماری را جای‌گزین می‌کنیم، به عبارت دیگر سیستم را به وسیله‌ی متغیرهای میکروسکوپی توصیف می‌کنیم که دارای افت و خیزهای کاتوره‌ای هستند.

با در نظر گرفتن پراکندگی‌های زاویه‌ای کوچک در برهم‌کنش‌های کولنی، از معادله‌ی بولتزمن به معادله‌ی فوکر - پلانک می‌رسیم. معادله‌ی فوکر - پلانک یک معادله‌ی پخش با مشتق‌های مرتبه‌ی دوم است که در ریاضیات تحت عنوان معادله‌ی



الکترون‌های نسبیتهی علاوه بر اتلاف انرژی برخوردی دارای اتلاف انرژی تابشی نیز هستند که با رابطه زیر مشخص می‌شود

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{N_e Z^2 \rho (T + mc^2)}{137 m^2 c^4 A} \left[4 \ln \frac{2(T + mc^2)}{mc^2} - \frac{4}{3} \right] \quad (5)$$

که در آن، T انرژی جنبشی الکترون، Z ، A ، ρ ، I و N_e ، به ترتیب، عدد اتمی، عدد جرمی، چگالی محیط مورد گذار، انرژی برانگیزش متوسط و عدد آووگادرو هستند.

رفتار کاتوره‌ای الکترون‌ها در سه ناحیه‌ی سوخت هسته‌ای، فاصله‌ی بین غلاف و سوخت هسته‌ای، با استفاده از کد مونت کارلوی GEANT4 شبیه‌سازی شده و تابع توزیع انرژی الکترون به دست آمد.

۴. تجزیه و تحلیل محاسباتی

۴.۱ استفاده از معادله‌ی فوکر-پلانک در تعیین توزیع انرژی الکترون

برای تعیین تابع توزیع انرژی الکترون عبوری از فاصله‌ی بین غلاف و سوخت از معادله‌ی فوکر-پلانک استفاده شد (معادله‌ی ۲)

$$\frac{\partial w(\beta c, t)}{\partial t} = \left[-\frac{1}{mc} \left\{ \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{dE}{dx} \right) w(\beta c, t) \right\} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \left\{ \frac{\gamma k T}{m} w(\beta c, t) \right\} \right] \quad (6)$$

همان‌گونه که اشاره شد (معادله‌ی ۳)، ضریب رانش برابر توان ایستاندگی و ضریب پخش برابر $\frac{\gamma k T}{m}$ در نظر گرفته شد. بازه‌ی انرژی الکترون‌ها در فاصله‌ی بین غلاف و سوخت به دو ناحیه‌ی کلاسیک و نسبیتهی تقسیم و از تقریب کند شدن پیوسته استفاده شد. محاسبه‌ی ضریب پخش، مستلزم زمان واهلش بود که از رابطه‌ی زیر استفاده شد [۱۱]

$$\tau = \frac{u}{\left(1 + \frac{m}{m_f}\right) \alpha_r \beta_r^2 \psi(\beta_r u)} \quad (7)$$

که در آن، m جرم ذرات ورودی، m_f جرم ذرات زمینه و α_r ثابت پخش است که چنین به دست می‌آید [۱۱]

$$\alpha_r = \frac{\lambda \pi Z_f^2 Z^2 e^4 \ln \Lambda}{m^2} \quad (\text{c. g. s}) \quad (8)$$

کولموگروف^(۳) از آن نام برده می‌شود و می‌توان آن را از بسط معادله‌ی کرامرز-موپال^(۴) به دست آورد [۸]

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \sum_{\nu=1}^{\infty} \left(-\frac{\partial}{\partial x}\right)^{\nu} D^{\nu}(x) w \quad (2)$$

در این حالت، ضریب‌های $D^{\nu}(x)$ برای $\nu \geq 3$ صفر فرض شده و بسط کرامرز-موپال به معادله‌ی فوکر-پلانک منتهی می‌شود. در واقع این معادله ابزاری برای توصیف فرایندهای مارکوی^(۵) پیوسته است که حافظه‌ی متغیر فقط مربوط به یک زمان عقب‌تر است.

۳. روش‌های به کار گرفته شده

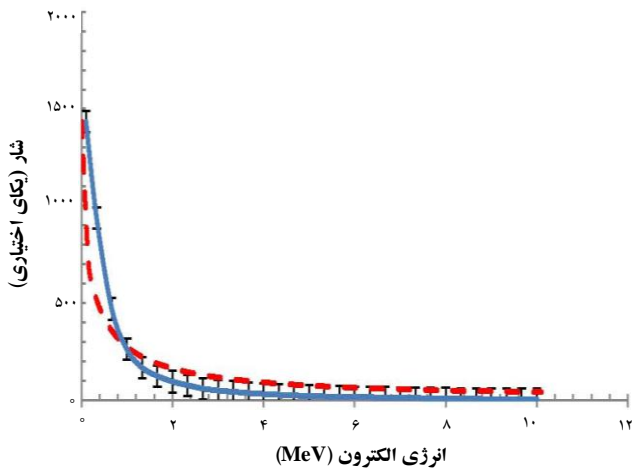
در این مقاله از معادله‌ی فوکر-پلانک برای تعیین تابع توزیع انرژی الکترون در فاصله‌ی بین غلاف و سوخت هسته‌ای رآکتور VVER-1000 بوشهر استفاده شد. حل این معادله به تعیین ضریب‌های پخش^(۶) و رانش^(۷) نیاز دارد. در این پژوهش ضریب رانش برابر توان ایستاندگی^(۸) بته^(۸) برای حرکت ذرات باردار در یک محیط مادی در نظر گرفته شد. الکترون در حین عبور از این محیط مادی با آن برهم‌کنش می‌کند.

رابطه‌ی بته به توصیف فرایند اتلاف انرژی الکترون از طریق برخورد و گسیل تابش (یونش و تابش ترمزی) می‌پردازد [۹]

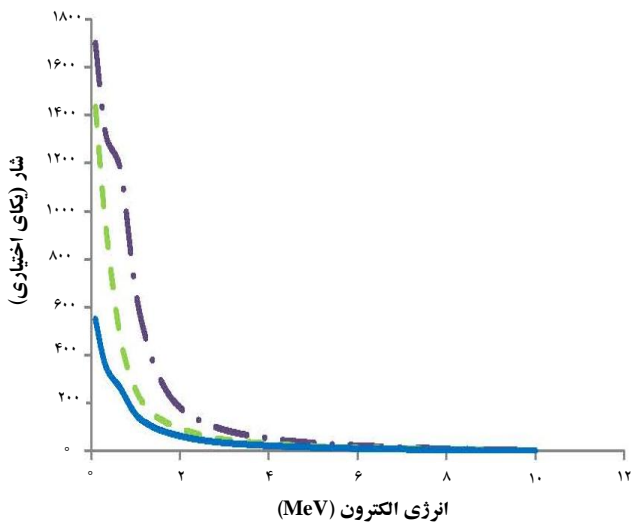
$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ion}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{brams}} \quad (3)$$

الکترون‌های نانسبیتهی دارای اتلاف انرژی از طریق یونش هستند. اتلاف انرژی در واحد طول مسیر این است [۱۰]

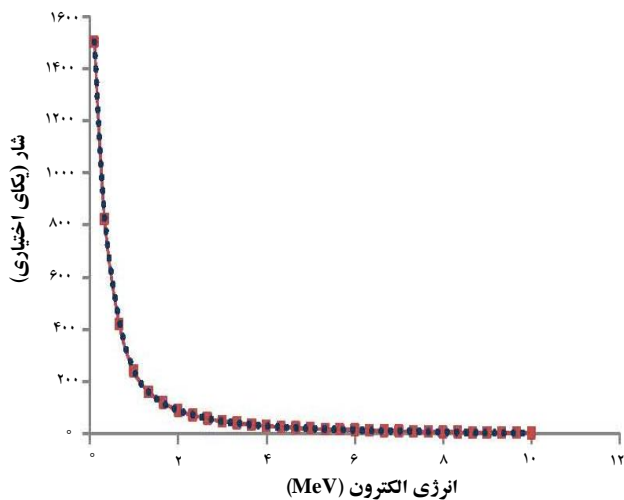
$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_c = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{\pi N_e Z \rho}{m c^2 \beta^2 A} \left[\ln \frac{T(T + mc^2)^2 \beta^2}{v^2 m c^2} + (1 + \beta^2) - (2\sqrt{1 - \beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + \frac{1}{\lambda} (1 - \sqrt{1 - \beta^2})^2 \right] \quad (4)$$



شکل ۱. مقایسه‌ی تابع توزیع انرژی الکترون؛ روش رونژ- کوتا (خط فاصله- فاصله) و کد محاسباتی GEANT4 (خط پر).



شکل ۲. تابع توزیع الکترون در سوخت (خط- نقطه)، فاصله‌ی بین غلاف و سوخت (خط‌چین) و غلاف (خط پر)، تعیین شده با استفاده از کد محاسباتی GEANT4.



شکل ۳. اثر کریبتون بر تابع توزیع انرژی الکترون در فاصله‌ی بین غلاف و سوخت هسته‌ای؛ گاز هلیوم (خط پر- مربع) و هلیوم به همراه کریبتون (دایره).

که در آن، $\ln \Lambda$ لگاریتم کولنی است که معرف سطح مقطع برخورد الکترون- الکترون و الکترون- یون [۱۲] و برابر $\ln\left(\frac{n_e^{1/2}}{T^{3/2}}\right) - 23$ است. در محاسبه‌ها از مرجع [۱۳] استفاده شد (جدول ۱).

معادله‌ی (۶) با استفاده از روش عددی رونژ- کوتا در حالت پایا حل شد.

۲.۴ استفاده از کد GEANT4 در تعیین توزیع انرژی الکترون

کد مونت کارلوی GEANT4، یک ابزار شبیه‌سازی نوشته شده به زبان برنامه‌نویسی C++ است که در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی رفتار کاتوره‌ای الکترون مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱، نتایج حاصل از حل عددی معادله فوکر- پلانک به روش رونژ- کوتا و با استفاده از کد محاسباتی GEANT4 را نمایش می‌دهد. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با استفاده از خطای استاندارد توافق رضایت‌بخشی را نشان می‌دهد.

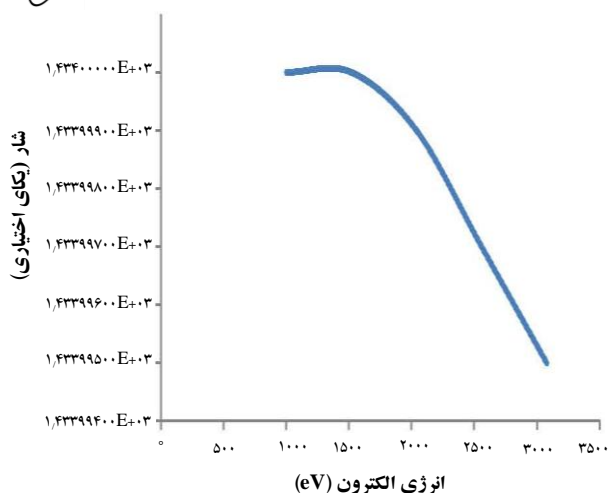
شکل ۲ توزیع انرژی الکترون در سه ناحیه سوخت، فاصله‌ی بین غلاف و سوخت هسته‌ای را که با استفاده از کد محاسباتی GEANT4 به دست آمده است، نشان می‌دهد.

برای بررسی اثر گاز کریبتون بر تابع توزیع انرژی الکترون ابتدا توزیع انرژی در گاز هلیوم در ابتدای کار رآکتور محاسبه و سپس حضور گاز کریبتون هم در نظر گرفته شد. نتایج در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. نتایج مرجع [۷] نیز در ارتباط با این موضوع است.

لازم به ذکر است که در ارتباط با موضوع مقاله، پژوهشی انجام نشده است و تنها پژوهش مشابه مربوط به محاسباتی است که توسط دسی و هاسن [۴] برای تعیین تابع توزیع انرژی الکترون در یک لوله‌ی پوشش داده شده با مواد شکافت‌پذیر انجام شده است. شکل ۴ نتایج حاصل از این پژوهش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱. کسر محصول‌های شکافت موجود در فاصله‌ی بین غلاف و سوخت در شرایط عادی [۱۳]

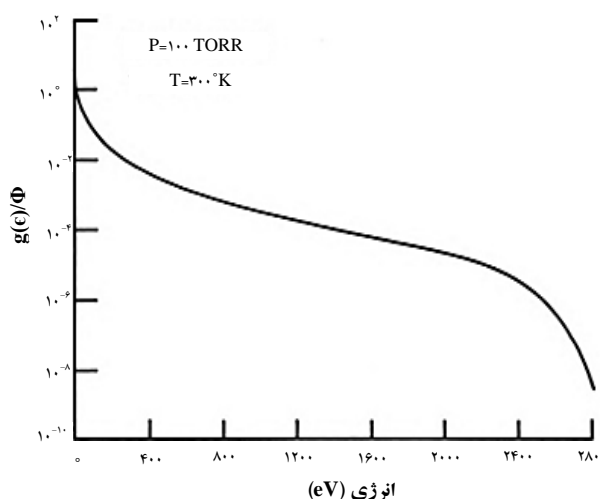
کسر	محصول
۰٫۰۸	^{131}I
۰٫۱۰	^{85}Kr
۰٫۰۵	دیگر گازهای نجیب
۰٫۰۵	سایر هالوزن‌ها
۰٫۱۲	فلزات قلیایی



شکل ۵. تابع توزیع انرژی الکترون در فاصله‌ی بین غلاف و سوخت هسته‌ای در بازه‌ی انرژی ۱keV تا ۳keV، به دست آمده از معادله‌ی فوکر-پلانک.

ماکسولی دور است، اما بسیاری از الکترون‌ها گرمایی هستند. مطابق شکل ۲ توزیع انرژی الکترون در سه منطقه‌ی سوخت، فاصله‌ی بین غلاف و سوخت هسته‌ای با به کارگیری کد محاسباتی GEANT4 به دست آمد؛ نتایج نشان‌دهنده‌ی این است که الکترون در سوخت دارای انرژی بیش تری است و در غلاف کم‌ترین انرژی را دارد. دلیل این امر آن است که بنا بر تعریف توان ایستاندگی، الکترون با طی فاصله‌های بزرگ‌تر برخورد‌های متفاوت بیش تری را با محیط موردگذار انجام می‌دهد و این موضوع سبب کاهش انرژی الکترون می‌شود.

نتیجه‌ی دیگری که از این پژوهش به دست آمد این است که گاز کریپتون اثر بسیار ناچیزی بر تابع توزیع انرژی الکترون در فاصله‌ی بین غلاف و سوخت دارد، نتایج مرجع [۷] نیز نشان‌دهنده‌ی این موضوع است؛ در این مرجع دلیل این امر عدم هماهنگی در ترازهای انرژی برانگیزش یون کریپتون و اتم هلیم ذکر شده است. هم‌چنین با توجه به این که ورود کریپتون به فاصله‌ی بین غلاف و سوخت هسته‌ای باعث افزایش چگالی آن می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که تابع توزیع انرژی در چگالی‌های متفاوت فاصله‌ی بین غلاف و سوخت هسته‌ای تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند.



شکل ۴. توزیع انرژی الکترون [۴].

از آن‌جایی که پژوهش دسی و هاسن در شرایط فشار و دمایی انجام گرفته است که کاملاً با شرایط فشار و دمای فاصله‌ی بین غلاف و سوخت هسته‌ای پژوهش حاضر متفاوت است، از شکل ۴ تنها به منظور نشان دادن روند نمودار استفاده شده است. از طرف دیگر برای این که این شکل با نمودار به دست آمده از پژوهش حاضر قابل مقایسه باشد، در شکل ۵ بازه‌ی انرژی از ۱keV تا ۳keV انتخاب شده و تابع توزیع انرژی الکترون مجدداً ترسیم شده است.

با مقایسه‌ی دو شکل ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود که روند تغییرات این دو نمودار مشابه هم است.

۵. نتیجه‌گیری

تابع توزیع انرژی الکترون در فاصله‌ی بین غلاف و سوخت هسته‌ای در رآکتور هسته‌ای VVER-1000 بوشهر، با استفاده از معادله‌ی فوکر-پلانک به دست آمد. این معادله با روش عددی رونز- کوتای مرتبه‌ی ۴ حل و برای بالا بردن دقت محاسبه برنامه‌ای به زبان C++ نوشته شد. هم‌چنین با کمک کد مونت کارلوی GEANT4 رفتار الکترون در فاصله‌ی بین غلاف و سوخت هسته‌ای شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که در طیف انرژی، اغلب الکترون‌ها دارای انرژی پایینی هستند و این موضوع به علت برهم‌کنش الکترون با ماده‌ی جاذب است که باعث از دست دادن انرژی به وسیله‌ی الکترون می‌شود. ملاحظات دقیق عددی و شبیه‌سازی نشان داد که تابع توزیع انرژی الکترون از تابع



- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Fokker-Planck Equation 2. Runge-Kutta 3. Kolmogrove Equation 4. Kramer-Moyal Equation | <ol style="list-style-type: none"> 5. Markov Process 6. Diffusion Coefficient 7. Drift coefficient 8. Bethe Stopping Power |
|---|--|

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. N. Tsoulfanidis, Measurement and Detection of Radiation, Hemispher Pub. Corp (1983). 2. H.A. Hasssan, J. Deese, The Electron Boltzmann Equation in a Plasma Generated by Fission Products, U.S. National Aeronautics and Space Administration, Washington (1974). 3. R.H. Lo, G.H. Miley, Electron Energy Distribution in Helium Plasma Created by Nuclear Radiations, IEEE T Plasma Sci, PS-2 (1974). 4. J. Deese, H.A. Hassan, Analysis of Plasma Generated by Fission Fragments, U.S. National Aeronautics and Space Administration, Washington (1976). 5. A.P. Budnik, Yu.V. Sokolov, A.S. Vakulovskiy, Mathematical Simulation of the Space-Time Evolution of Fission Fragment Plasma Tracks, Hyperfine Interactions, 88 (1994) 185-192. 6. G.L. Branglia, A Note on the Monte Carlo Simulations of Non-Equilibrium Electron Energy Distributions, Contrib, Plasma Phys, 25 (1985) 567-572. | <ol style="list-style-type: none"> 7. Kazuaki WAGATSUMA, Emission Spectroscopic Study on Gas-Gas Interactions in Glow Discharge Plasmas Using Several Binary Gas Mixtures, Analytical Sciences, 26 (2010). 8. H. Risken, The Fokker-Planck Equation, 2th Edition, Springer (1988). 9. D. Horvath, A. Vertes, Hand Book of Nuclear Chemistry, 2th Edition, Springer, (2011) 374-379. 10. K.S. Krane, Introductory Nuclear Physics, John Wiley and Sons, New York, United States (1988) 195-198. 11. D. Diver, A Plasma Formulary for Physics, Technology and Astrophysics, WILEY-VCH (2011) 79-80. 12. A.A. Fridman, L.A. Kennedy, Plasma Physics and Engineering, Taylor & Francis (2004). 13. U.S. NRC Regulatory Guide, No.1, 183 (2009) 428. |
|--|--|