

## تأثیر محصولات شکافت بر فرایند انتقال گرما توسط الکترون‌های با انرژی در حدود $0.5 \text{ MeV}$ در فاصله بین سوخت و غلاف

فرشته گلیان<sup>۱</sup>، علی پذیرنده<sup>۲</sup> و سعید محمدی<sup>۱</sup>

۱. دانشگاه پیام نور تهران، تهران

۲. گروه مهندسی هسته‌ای، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، تهران

پست الکترونیکی: golyan@phd.pnu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۲/۱۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۲/۲)

### چکیده

از جمله مسائل مهم در راکتورهای هسته‌ای، فرایند انتقال گرما از دانه‌های سوخت به خنک کننده می‌باشد. در این راستا، فاصله بین غلاف و سوخت و شرایط فیزیکی و شیمیایی آن از عوامل تأثیرگذار در بحث انتقال گرما در میله سوخت هسته‌ای می‌باشند. از اینرو، در این مقاله به بررسی توزیع انرژی الکترون‌هایی با انرژی در حدود  $0.5 \text{ MeV}$  در فاصله بین سوخت و غلاف در میله سوخت هسته‌ای راکتور VVER-1000 بوشهر پرداخته شد. همچنین نقش برخی پاره‌های شکافت مانند کریپتون، برم، زنون، روبیدیوم و سزیوم بر توزیع انرژی الکترون‌ها و نیز رسانش گرمایی توسط الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف مورد بررسی قرار گرفت. برای رسیدن به این هدف، معادله فوکر-پلانک، حاکم بر رفتار تصادفی الکترون‌ها در محیط جاذب بین سوخت و غلاف، در به دست آوردن تابع توزیع انرژی الکترون‌ها به کار گرفته شد و این معادله با استفاده از روش حل عددی رونژ-کوتا حل گردید. از طرف دیگر با به کارگیری کد مونت کارلو GEANT4، تابع توزیع انرژی الکترون‌ها در این فاصله به دست آمد. ملاحظه گردید که قطعات شکافت ذکر شده اثر تقریباً ناچیزی بر انرژی الکترون‌ها و در نتیجه بر رسانش گرمایی از طریق الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف دارند. قابل ذکر است که این نتیجه با نتایج حاصل از دیگر تحقیقات سازگار است. همچنین مشاهده شد که واهلش الکترون‌ها در این فضا منجر به کاهش رسانایی گرمایی از طریق الکترون‌ها می‌شود.

واژه‌های کلیدی: معادله فوکر-پلانک، رسانش گرمایی، تابع توزیع انرژی الکترون، پاره‌های شکافت

### ۱. مقدمه

فاصله بین سوخت و غلاف به روش‌های نظری و آزمایشگاهی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، مانند مراجع [۴، ۵، ۶، ۷]. انتقال گرما در یک محیط به شیوه‌های گوناگونی انجام می‌پذیرد که انتقال حرارت از طریق الکترون‌ها یکی از آنها می‌باشد. در اثر وارد شدن الکترون‌ها، ذرات بتا و پاره‌های شکافت

در راکتورهای هسته‌ای آب سبک، رسانش گرمایی سوخت و فاصله بین سوخت و غلاف از اهمیت ویژه‌ای در دقت پیش‌بینی واکنش گرمایی میله سوخت، اثر سوخت و رفتار مکانیکی غلاف فلزی برخوردار است [۳]. در مقالات متعدد، مقاومت گرمایی

کوتای<sup>۲</sup>، به دست آمده است. این معادله ابزار مفیدی برای تجزیه و تحلیل سیستم‌هایی با گرادیان دما و فشار می‌باشد. از طرف دیگر، با به کارگیری کد مونت کارلو GEANT<sup>۴</sup> عمل شکافت در میله سوخت هسته‌ای شبیه سازی شده و رفتار تصادفی الکترون‌ها درون این فاصله بررسی گردیده است. سپس به بررسی اثر پاره‌های شکافت وارد شده در فاصله بین سوخت و غلاف بر روی توزیع انرژی الکترون‌ها و در نتیجه بر انتقال حرارت توسط الکترون‌ها پرداخته شد.

## ۲. مقاومت گرمایی میله سوخت

به منظور پایدار بودن عملکرد راکتور، درجه حرارت و توزیع آن در میله سوخت ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به نتایج تجربی و بررسی مسئله به صورت تئوری و با کمک مدل‌های متفاوت ارائه شده [۴] بیشترین مقاومت گرمایی در میله سوخت در ناحیه سوخت و همچنین فاصله بین سوخت و غلاف مشاهده می‌شود [۶].

طی آزمایش‌های متعدد مشاهده شده است که با افزایش سوخته شدن<sup>۳</sup> و در نتیجه افزایش محصولات شکافت که طی واکنش شکافت تولید می‌شوند، دمای سوخت افزایش می‌یابد و این نشان می‌دهد که تولید محصولات شکافت و آزاد سازی گازهای شکافت و رسانش گرمایی سوخت به هم وابسته هستند. هلیوم بهترین گزینه برای پر کردن فاصله بین سوخت و غلاف می‌باشد زیرا با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که هلیوم دارای بالاترین رسانش گرمایی می‌باشد [۴]. با ورود گازهای شکافت در زمانی که فاصله بین سوخت و غلاف باز است، رسانش گرمایی پایین می‌آید و بالا رفتن دمای سوخت سبب تغییر هندسه سوخت، ذوب شدن آن و یا تغییر مدل آزاد سازی گازهای شکافت در فاصله بین سوخت و غلاف می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تحول در رسانش گرمایی این ناحیه عامل مهمی است و در این زمینه می‌توان به بررسی نقش الکترون‌ها در انتقال انرژی از سوخت به غلاف و رسانش گرمایی این فاصله پرداخت.

تولید شده با درجه یونیزاسیون بالا [۸] به فاصله بین سوخت و غلاف [۹] که در ابتدای عملکرد راکتور با گاز هلیوم پر شده است، در این محیط پلازما تشکیل می‌شود. الکترون‌ها در حین عبور از فاصله بین سوخت و غلاف، با این محیط جاذب برهم‌کنش انجام می‌دهند و بخشی و یا تمام انرژی خود را از دست می‌دهند و از اینرو شاهد توزیع انرژی آنها خواهیم بود. قابل ذکر است که پلاسمای تولید شده در فاصله بین سوخت و غلاف، سیستمی نامتعادل است و یکی از جنبه‌های مهم رفتار این پلازما در ارتباط با روند غیر تعادلی الکترون‌ها در آن است که مسئله‌ای بسیار پیچیده است.

از طرف دیگر، تلاش‌های زیادی در خصوص مطالعه پلازما و رسانش گرمایی گازهای یونیزه انجام شده است و مقالات متعددی همراه با آزمایش‌ها و مطالعات تئوری با تکنیک‌های متفاوتی در این زمینه منتشر شده است. در میان آنها، می‌توان به تحقیقاتی که درباره رسانش گرمایی کل گازهای یونیزه [۱۰] اشاره کرد. همچنین، رسانش گرمایی بخار فلزات قلیایی و آرگون نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱]. در زمینه تئوری ترابرد، می‌توان به پدیده ترابرد در یک گاز کاملاً یونیزه اشاره داشت [۱۲]. علاوه بر این در برخی از مقالات بیان شده است که گرما توسط الکترون‌ها منتقل می‌شود [۱۳] و نیز در مورد اهمیت اثر پخش الکترون تحقیق شده است [۱۰].

در این مقاله به بررسی نقش الکترون‌های با انرژی در حدود ۰.۵ MeV بر روی انتقال گرما در فاصله بین سوخت و غلاف میله سوخت هسته‌ای پرداخته شده است. در این راستا، اثر پاره‌های شکافت ذکر شده در بالا بر روی توزیع انرژی الکترون‌ها و یا به عبارت دیگر بر رسانش گرمایی توسط آنها مورد تحقیق قرار گرفته است. همچنین، تغییرات زمان واهلش الکترون‌ها با افزایش تدریجی چگالی در فاصله بین سوخت و غلاف بررسی شده است.

بر این اساس، تابع توزیع انرژی الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف میله سوخت هسته‌ای راکتور VVER-۱۰۰۰ بوشهر با حل معادله فوکر-پلانک<sup>۱</sup> به روش حل عددی رونز-

۲. Runge- Kutta

۳. Burnup

۱. Fokker-Planck

تبدیل می‌شود که یک معادله پخش است [۱۵] و در ریاضیات به نام معادله کولموگروف<sup>۱</sup> خوانده می‌شود.

می‌توان معادله فوکر-پلانک را از بسط کرامرز-موئال<sup>۲</sup> به دست آورد [۱۴]:

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

در این معادله،  $x$  بر اساس رابطه زیر از معادله لانگوین<sup>۳</sup> تبعیت می‌کند [۱۴]:

$$\dot{v} + \gamma v = \Gamma(t). \quad (3)$$

در این رابطه  $\Gamma(t)$ ،  $\gamma$  و  $v$  به ترتیب نشان دهنده نیروی لانگوین، عکس زمان واهلش و سرعت هستند. با صفر در نظر گرفتن کلیه ضرایب  $D^v$  برای  $v \geq 3$ ، بسط کرامرز-موئال به معادله فوکر-پلانک تبدیل می‌شود.  $D^1(x)$  ضریب رانش و  $D^2(x)$  ضریب پخش خوانده می‌شود.

در این مقاله از معادله فوکر-پلانک در تعیین تابع توزیع انرژی الکترون‌های با انرژی حدود ۰/۵ MeV در فاصله بین سوخت و غلاف استفاده شده است. پس از انتخاب ضرایب پخش و رانش و قرار دادن آنها در شکل کلی معادله فوکر-پلانک، معادله مورد استفاده در این مقاله برای الکترون‌های عبوری از محیط جاذب بین سوخت و غلاف عبارت است از [۱۶]:

$$\frac{\partial w(\beta c, t)}{\partial t} = \left[ -\frac{1}{mc} \left\{ \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{dE}{dx} \right) w(\beta c, t) \right\} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \left\{ \frac{\gamma kT}{m} w(\beta c, t) \right\} \right]. \quad (4)$$

در این رابطه ضریب رانش و ضریب پخش به ترتیب برابر با توان توقف بته و  $\frac{\gamma kT}{m}$  در نظر گرفته شده است و توان توقف بته از مراجع [۱۷] و [۱۸] گرفته شده است. همچنین  $\beta$  برابر نسبت سرعت ذره به سرعت نور و  $\gamma$  نیز عکس زمان واهلش می‌باشد.

در محاسبه ضریب پخش، ابتدا زمان کند شدن با توجه به مراجع [۱۹] و [۲۰] محاسبه گردیده و با معکوس کردن آن

جدول ۱. داده‌های گاز مورد استفاده در مدل URGAP تجدید نظر شده [۴].

گاز	رسانش گرمایی $\left( \lambda = a_{\lambda} T^{b_{\lambda}} \left( \frac{W}{mK} \right) \right)$	
	$b_{\lambda}$	$a_{\lambda}$
هلیوم	۰/۷۷۱۶۳	$۰/۱۷۶۳۲ \times ۱۰^{-۲}$
آرگون	۰/۷۱۹۴۸	$۰/۲۹۹۶۱ \times ۱۰^{-۳}$
کریپتون	۰/۸۰۰۷۹	$۰/۹۸۳۸ \times ۱۰^{-۴}$
زنون	۰/۸۴۲۵۶	$۰/۴۶۵۵۶ \times ۱۰^{-۴}$

### ۳. روش‌ها

در بررسی تابع توزیع انرژی الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف سوخت هسته‌ای راکتور VVER-۱۰۰۰ بوشهر از معادله فوکر-پلانک استفاده شد و توزیع انرژی الکترون‌های با انرژی در حدود ۰/۵ MeV در محیط جاذب بین سوخت و غلاف محاسبه گردید. در حل این معادله از روش عددی رونز-کوتا استفاده شد و به منظور دقیق بودن حل معادله، برنامه کامپیوتری به زبان C++ نوشته شد.

همچنین با به کارگیری کد مونت کارلو GEANT<sup>۴</sup> رفتار تصادفی این الکترون‌ها درون فاصله بین سوخت و غلاف شبیه سازی گردید و با این روش نیز تابع توزیع انرژی الکترون‌ها به دست آمد.

هر دو روش به کار گرفته شده به تفصیل در قسمت بعد توضیح داده شده است.

### ۱.۳. بررسی توزیع انرژی الکترون‌ها با استفاده از معادله فوکر-پلانک

معادله بولتزمن به منظور بررسی پدیده ترابرد در سیستم‌هایی که دارای گرادیان دما و چگالی هستند، به کار می‌رود [۱۴]:

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

که  $\nabla_v$  و  $v \cdot \nabla_r$  به ترتیب تابع توزیع در فضای فاز، جرم، نیرو، سرعت، گرادیان نسبت به دما و موقعیت هستند. با در نظر گرفتن تقریب زوایای کوچک پراکندگی در برهم‌کنش‌های کولنی، معادله بولتزمن به معادله فوکر-پلانک

۱. Kolomogrove equation

۲. Kramers-Moyal

۳. Langevin equation

در حدود  $0.5 \text{ MeV}$  نسبتی فرض شده و علاوه بر اتلافات برخوردی، اتلافات تابشی نیز در نظر گرفته شده است.

#### ۴. اثر پاره‌های شکافت بر رسانش گرمایی در فاصله بین سوخت و غلاف

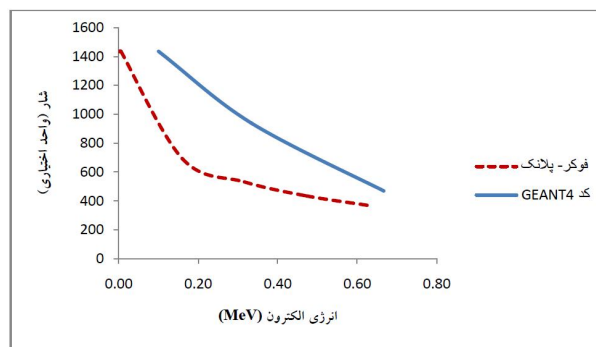
در بررسی رسانش گرمایی فاصله بین سوخت و غلاف در میله سوخت هسته‌ای از طریق الکترون‌های با انرژی در حدود  $0.5 \text{ MeV}$  رفتار تابع توزیع انرژی الکترون‌ها ضروری به نظر می‌رسد. از اینرو در این پژوهش اثر پاره‌های شکافت همچون کریپتون، برم، زنون، روبیدیوم و سزیوم بر توزیع انرژی این دسته از الکترون‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، از کد  $\text{GEANT4}$  استفاده شد و در هر مرحله اثر یکی از پاره‌های شکافت بر توزیع انرژی الکترون‌هایی که دارای انرژی در حدود  $0.5 \text{ MeV}$  هستند، به دست آمد. برای نشان دادن تأثیر محصولات شکافت بر تابع توزیع، در هر شکل، نمودار حاصل از هر پاره شکافت با تابع توزیع انرژی الکترون‌ها هنگامی که تنها هلیوم در این ناحیه حضور دارد، مقایسه گردید. نتایج حاصل در شکل‌های ۲-۷ نمایش داده شده است. همچنین، اثر کلیه پاره‌های شکافت تا انرژی  $10 \text{ MeV}$  در شکل ۸ رسم شده است.

##### ۴.۱. کریپتون

کریپتون گازی نجیب، بی اثر و از لحاظ شیمیایی در واکنش‌ها بسیار ضعیف است. این گاز دارای رسانش گرمایی کمی در حدود  $0.1 \text{ W/mK}$  می‌باشد. کریپتون به علت دارا بودن ساختار کامل الکترونی دارای انرژی یونیزاسیون بالایی است و به راحتی الکترون از دست نمی‌دهد. شکل ۲ اثر کریپتون بر تابع توزیع انرژی الکترون را نشان می‌دهد. در این شکل توزیع انرژی الکترون در گاز هلیوم (خط فاصله) و گاز هلیوم همراه با کریپتون (خط پر) آورده شده است.

##### ۴.۲. برم

برم در خانواده هالوژن‌ها قرار دارد و دارای رسانش گرمایی برابر با  $0.12 \text{ W/mK}$  می‌باشد. همچنین الکترون خواهی برم برابر



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تابع توزیع انرژی الکترون‌های در حدود  $0.5 \text{ MeV}$  در فاصله بین سوخت و غلاف در میله سوخت هسته‌ای از طریق حل معادله فوکر-پلانک (خط-فاصله) و کد  $\text{GEANT4}$  (خط پر).

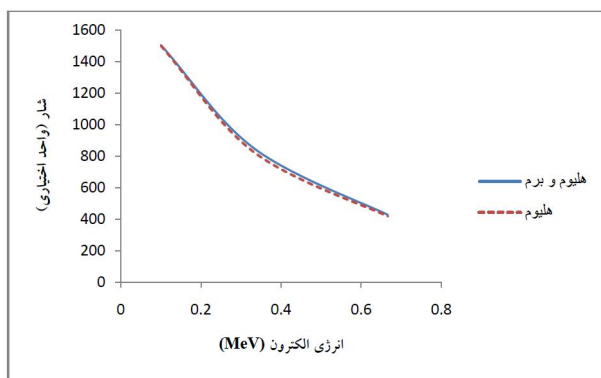
مقدار  $\gamma$  به دست آمده است. لازم به ذکر است که در محاسبات بالا برای به دست آوردن کسر پاره‌های شکافت در فاصله بین سوخت و غلاف از مرجع [۲۱] استفاده شده است. معادله (۴) با استفاده از روش عددی رونژ-کوتا حل شده و برای بالا بردن دقت محاسبات برنامه کامپیوتری به زبان  $\text{C++}$  نوشته شده است. با حل معادله، تابع توزیع انرژی الکترون‌های با انرژی حدود  $0.5 \text{ MeV}$  در این ناحیه به دست آمد.

#### ۳.۲. استفاده از کد $\text{GEANT4}$ در به دست آوردن توزیع

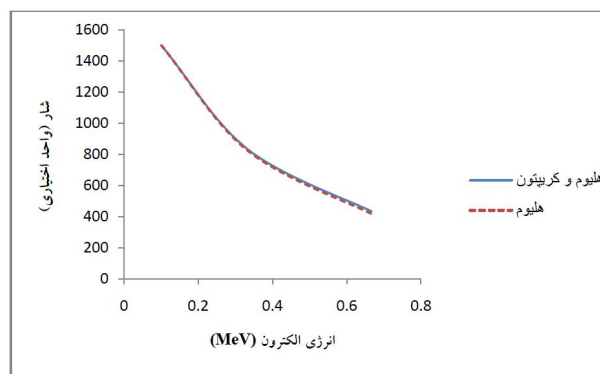
##### انرژی الکترون‌های با انرژی در حدود $0.5 \text{ MeV}$

در این مقاله از کد مونت کارلو  $\text{GEANT4}$  به منظور محاسبه توزیع انرژی الکترون‌های با انرژی در حدود  $0.5 \text{ MeV}$  استفاده شده است. این کد یک ابزار آشکارساز شبیه سازی است که با زبان  $\text{C++}$  نوشته شده و قادر است رفتار تصادفی الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف را شبیه سازی کند. در شکل ۱، نتایج حاصل از حل معادله فوکر-پلانک با استفاده از روش حل عددی رونژ-کوتا (خط-فاصله) و همچنین کد  $\text{GEANT4}$  (خط پر) رسم شده‌اند.

قابل ذکر است که اختلاف مشاهده شده به این دلیل است که در کد  $\text{GEANT4}$  اتلافات ناشی از تابش در انرژی‌های بالاتر از  $10 \text{ MeV}$  در نظر گرفته شده است، ولی در این پژوهش با توجه به جدول ذکر شده در منبع [۲۲] الکترون‌های با انرژی



شکل ۳. تأثیر برم بر توزیع انرژی الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف میله سوخت هسته‌ای با به کارگیری کد GEANT۴ در حضور گاز هلیوم (خط فاصله) و گاز هلیوم همراه با برم (خط پر).



شکل ۴. اثر کریپتون بر توزیع انرژی الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف میله سوخت هسته‌ای با استفاده از کد GEANT۴ در حضور گاز هلیوم (خط فاصله) و گاز هلیوم همراه با کریپتون (خط پر).

دارد. این اتم دارای رسانش گرمایی در حدود  $58 \text{ W/mK}$  می‌باشد که نسبت به عناصری که در بالا ذکر شده است، رسانایی گرمایی بالایی دارد. می‌توان در شکل ۵ اثر روییدیوم را بر توزیع انرژی الکترون‌ها مشاهده کرد. در این نمودار نیز تابع توزیع انرژی الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف در میله سوخت هسته‌ای در حضور گاز هلیوم (خط فاصله) و همچنین گاز هلیوم و روییدیوم (خط تیره) رسم شده است.

#### ۵.۴. سزیوم

سزیوم از خانواده فلزات قلیایی است و در تراز آخر خود دارای تک الکترون می‌باشد. این اتم دارای رسانش گرمایی برابر  $36 \text{ W/mK}$  و الکترون خواهی  $45-$  است. این اتم به علت انرژی یونیزاسیون پایین خود تمایل زیادی به از دست دادن الکترون و تشکیل یون مثبت دارد. در شکل ۶ تأثیر این اتم بر تابع توزیع انرژی الکترون نشان داده شده است و با حالتی که تنها گاز هلیوم (خط فاصله) در فاصله بین سوخت و غلاف حضور دارد، مقایسه شده است.

#### ۵. تحقیق بر روی زمان واهلش الکترون‌های با انرژی در حدود $0.5 \text{ MeV}$ در فاصله بین سوخت و غلاف میله سوخت هسته‌ای

هنگامی که ذره ای درون یک سیستم دارای رفتار تصادفی

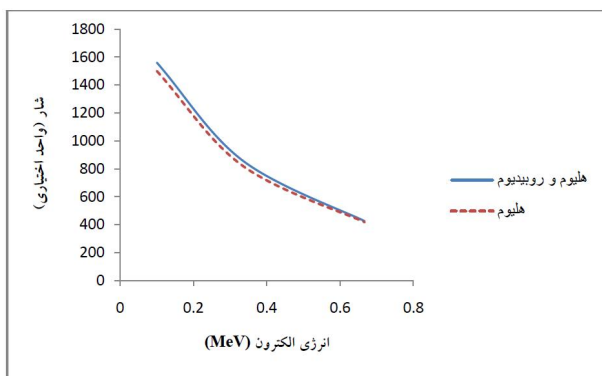
$325-$  است. این اتم با جذب یک الکترون در تراز آخر خود تشکیل یک ساختار الکترونی کامل می‌دهد. از اینرو الکترون خواهی بزرگ برم نشان دهنده این است که برم قادر به تشکیل یون منفی پایدار است. در شکل ۳ با به کارگیری کد GEANT۴، تأثیر برم بر تابع توزیع انرژی الکترون برای گاز هلیوم (خط فاصله) و هلیوم در حضور برم (خط پر) نمایش داده شده است.

#### ۳.۴. زنون

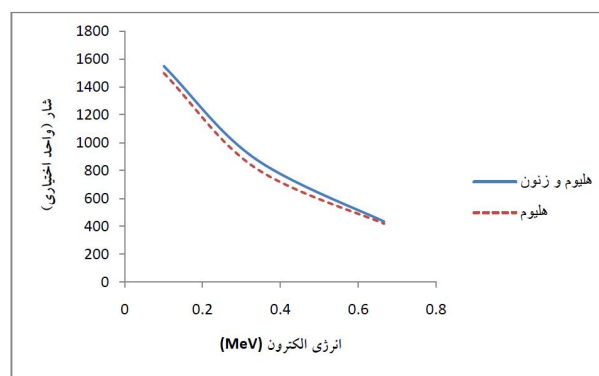
زنون نیز جزو خانواده گازهای نجیب است و دارای ساختار کامل الکترونی می‌باشد. همچنین، دارای رسانش گرمایی پایین در حدود  $0.056 \text{ W/mK}$  می‌باشد و الکترون خواهی آن برابر  $41+$  است، به همین دلیل احتمال جذب الکترون و تشکیل یون منفی توسط این اتم بسیار ضعیف است. شکل ۴ نمایانگر توزیع انرژی الکترون‌های فاصله بین سوخت و غلاف در گاز هلیوم (خط فاصله) و گاز هلیوم همراه با زنون (خط پر) است و تأثیر زنون بر توزیع انرژی الکترون‌ها را نشان می‌دهد.

#### ۴.۴. روییدیوم

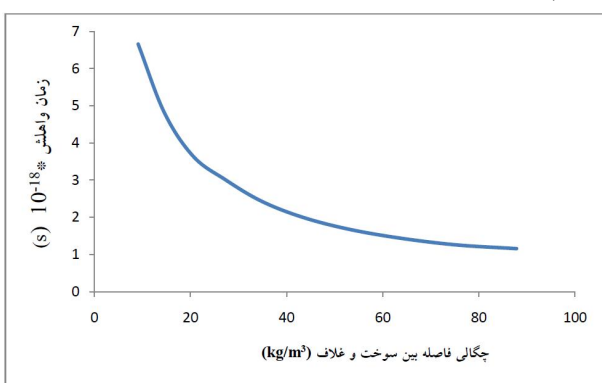
روییدیوم دارای یک الکترون با بستگی ضعیف در تراز آخر خود است. بر این اساس، تمایل زیادی در از دست دادن آن



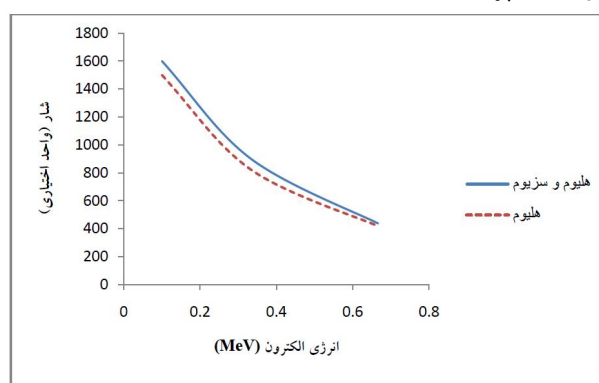
شکل ۵. اثر رادیوم بر توزیع انرژی الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف میله سوخت هسته‌ای با به کارگیری کد GEANT4 در حضور گاز هلیوم (خط فاصله) و گاز هلیوم همراه با رادیوم (خط پر).



شکل ۴. تأثیر پذیری تابع توزیع انرژی الکترون‌ها از گاز زنون در فاصله بین سوخت و غلاف میله سوخت هسته‌ای توسط کد GEANT4 در حضور گاز هلیوم (خط فاصله) و گاز هلیوم همراه با زنون (خط پر).



شکل ۷. زمان واهلش الکترون‌های با انرژی در حدود ۰/۵ MeV به عنوان تابعی از چگالی فاصله بین سوخت و غلاف.



شکل ۶. تأثیر سزیوم بر تابع توزیع انرژی الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف میله سوخت هسته‌ای توسط کد GEANT4. در حضور گاز هلیوم (خط فاصله) و گاز هلیوم همراه با سزیوم (خط پر).

بین سوخت و غلاف با روش شبیه سازی به دست آمد و نتایج حاصل از دو روش در شکل ۲ نمایش داده شد. همان گونه که در شکل مشاهده می‌گردد، با حرکت به سمت انرژی‌های بالا در طیف انرژی، شار الکترون‌ها کاهش می‌یابد. دلیل این امر، برهم‌کنش الکترون‌ها با محیط جاذب فاصله بین سوخت و غلاف و از دست دادن انرژی می‌باشد. انرژی هر الکترون در اتلافات برخوردی به نصف کاهش می‌یابد و همچنین الکترون در اتلافات تابشی تقریباً کل انرژی خود را از دست می‌دهد.

لازم به ذکر است که الکترون‌ها با حرکت خود از سوخت به خنک کننده و عبور از فاصله بین سوخت و غلاف، قادر به انتقال انرژی از سوخت به خنک کننده هستند که در واقع بحث

است، بدون توجه به حالت اولیه ذره، به حالت تعادل خواهد رسید. مقیاس زمانی برای چنین فرایندی، زمان واهلش نامیده می‌شود. در شکل ۷ زمان واهلش این الکترون‌ها به عنوان تابعی از چگالی فاصله بین سوخت و غلاف رسم شده است. شکل نشان دهنده این موضوع است که با افزایش تدریجی چگالی فاصله بین سوخت و غلاف در اثر ورود پاره‌های شکافت، زمان واهلش الکترون‌ها کاهش می‌یابد.

### ۶. بحث‌ها

تابع توزیع انرژی الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف از طریق حل عددی معادله فوکر-پلانک به روش رونز-کوتا مرتبه ۴ محاسبه گردید. از طرف دیگر، با به کار گیری کد مونت کارلو GEANT4 نیز توزیع انرژی الکترون‌ها در فاصله

می‌گردد.

شکل ۷ تغییرات زمان واهلش الکترون‌های با انرژی در حدود  $0.5 \text{ MeV}$  را بر حسب چگالی فاصله بین سوخت و غلاف نمایش می‌دهد. می‌توان بیان کرد که با ورود پاره‌های شکافت به این ناحیه، چگالی آن به تدریج افزایش می‌یابد و این موضوع سبب افزایش برخوردها و کاهش زمان واهلش و یا به عبارت دیگر از دست دادن سریع انرژی می‌گردد. در این راستا، صحت نتیجه حاصل توسط مرجع [۱۳] تایید می‌گردد.

شکل ۸ نشان دهنده توزیع انرژی الکترون‌ها تا انرژی  $10 \text{ MeV}$  در مقیاس عادی و لگاریتمی می‌باشد. در نمودار (۸a) ملاحظه می‌گردد که در مقیاس عادی تأثیر پاره‌های شکافت بر توزیع انرژی الکترون‌ها ناچیز است و در مقیاس لگاریتمی تا انرژی در حدود  $0.5 \text{ MeV}$ ، اثر پاره‌های شکافت بر توزیع انرژی بارز می‌گردد و در انرژی‌های بالاتر نیز تأثیر محسوسی دیده نمی‌شود.

در یک دید کلی، نکته قابل ذکری که باید بیان شود این است که با ورود پاره‌های شکافت، تابع توزیع انرژی الکترون تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پاره‌های شکافت تأثیری بر رسانش گرمایی از طریق الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف ندارند. در این رابطه، نتیجه حاصل از این پژوهش با نتیجه تجربی ارائه شده در کار آژانس بین‌المللی انرژی اتمی [۱] مطابقت دارد.

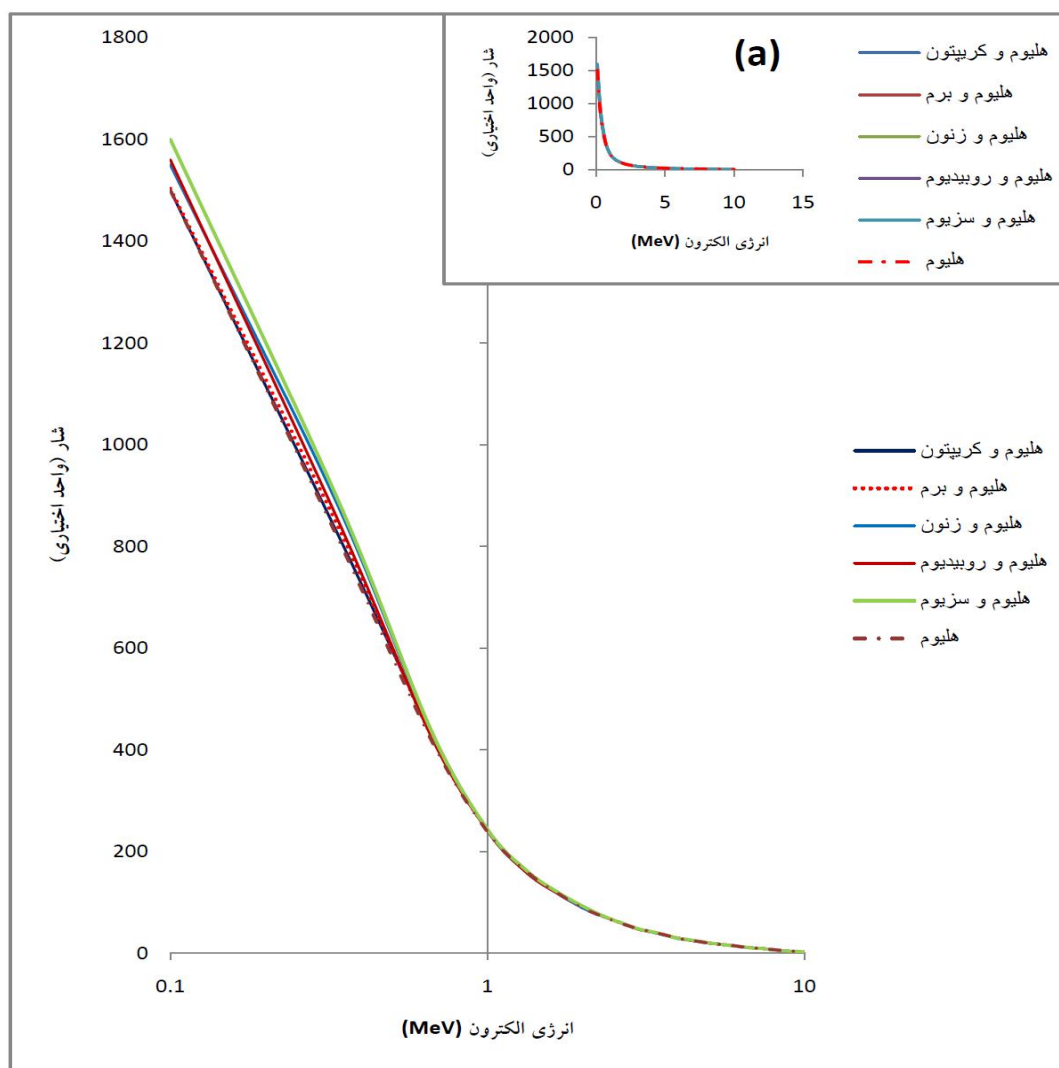
## ۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله نقش پاره‌های شکافت مانند کریپتون، برم، زنون، روبیدیوم و سزیوم بر رسانش گرمایی توسط الکترون‌های با انرژی در حدود  $0.5 \text{ MeV}$  در راکتور  $\text{VVER-1000}$  بوشهر مورد بررسی قرار گرفت. برای رسیدن به این منظور از معادله فوکر-پلانک که حاکم بر حرکت تصادفی ذرات در یک محیط جاذب است، استفاده گردید و توزیع انرژی الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف محاسبه شد. همچنین کد  $\text{GEANT4}$  نیز مورد استفاده قرار گرفت و با شبیه‌سازی عمل شکافت هسته‌ای در میله سوخت، توزیع انرژی الکترون‌ها به دست آمد. نتایج حاصل در

انتقال انرژی از طریق الکترون‌ها در میله سوخت است. با توجه به نتایج به دست آمده از شکل ۱، می‌توان بیان کرد که الکترون‌ها انرژی کمی را از سوخت به خنک‌کننده منتقل می‌کنند و در اثر واهلش، بخش زیادی از انرژی خود را به علت برخوردهای متوالی در فاصله بین سوخت و غلاف از دست می‌دهند که به این موضوع در مرجع [۲] نیز اشاره شده است.

در شکل ۲ اثر کریپتون بر توزیع انرژی الکترون‌ها نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، با ورود کریپتون به فاصله بین سوخت و غلاف، تابع توزیع انرژی تغییر محسوسی را نشان نمی‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کریپتون تأثیری بر رسانش گرمایی از طریق الکترون‌ها ندارد. شکل ۳ تأثیر برم بر تابع توزیع انرژی الکترون‌های درون فاصله بین سوخت و غلاف را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که برم نیز همانند کریپتون اثری بر تابع توزیع انرژی و در نتیجه رسانایی گرمایی از طریق الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف ندارد. شکل ۴ نمایانگر اثر زنون بر توزیع انرژی الکترون در فاصله بین سوخت و غلاف است. در شکل ۵ دیده می‌شود که روبیدیوم تأثیر بیشتری را نسبت به اتم‌هایی که تا کنون ذکر کرده‌ایم، دارد. در انتها نمودار شکل ۶ تغییرات به وجود آمده در توزیع انرژی الکترون‌های درون فاصله بین سوخت و غلاف را در حضور سزیوم نشان می‌دهد. همان‌گونه که از نمودار مشاهده می‌گردد، بیشترین تغییر در این شکل دیده می‌شود. در این قسمت نسبت اولین انرژی یونیزاسیون بر بار مؤثر هسته برای محصولات شکافت ذکر شده محاسبه شده است. مقدار این نسبت برای کریپتون، برم، زنون، روبیدیوم و سزیوم به ترتیب برابر  $143$ ،  $127$ ،  $94$ ،  $81$  و  $59$  می‌باشد. با توجه به اعداد به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که سزیوم که بیشترین اثر را بر رسانش گرمایی از طریق الکترون‌ها در فاصله بین سوخت و غلاف دارد، دارای کمترین مقدار این نسبت می‌باشد.

لازم به ذکر است که با توجه به نمودارهای ۳-۷، تأثیر پاره‌های شکافت بر روی الکترون‌هایی که انرژی کمتر از  $0.5 \text{ MeV}$  دارند، بارزتر است. دلیل این امر را می‌توان بالا بودن سطح مقطع یونیزاسیون در ناحیه انرژی‌های کم بیان کرد و این ادعا توسط مطالب ارائه شده در مراجع [۲۳] و [۲۴] تایید



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه بین اثرات ناشی از کریپتون (خط پر سیاه)، برم (خط چین قرمز)، زنون (خط پر آبی)، روبیدیوم (خط پر قرمز)، سزیوم (خط پر سبز) و هلیوم (خط نقطه) بر تابع توزیع انرژی الکترون در فاصله بین سوخت و غلاف با به کارگیری کد GEANT4. در مقیاس لگاریتمی و عادی (۸a).

بررسی نسبت اولین انرژی یونیزاسیون به بار مؤثر هسته، تأثیر پاره‌های شکافت بر توزیع انرژی الکترون‌ها قابل توجه است. نکته قابل توجه دیگر این است که با توجه به بررسی انجام شده بر روی تغییرات زمان واهلش الکترون‌ها با افزایش تدریجی چگالی فاصله بین سوخت و غلاف این نتیجه حاصل می‌شود که الکترون‌ها با برخوردهای متوالی که در فاصله بین سوخت و غلاف انجام می‌دهند، به سرعت انرژی خود را از دست می‌دهند و به الکترون‌های حرارتی تبدیل می‌شوند. همچنان که از شکل ۱ مشاهده می‌شود تأثیر پاره‌های شکافت بر توزیع

شکل ۱ آورده شده است. همچنین این نتایج با پیش‌بینی‌های مراجع [۲۵] و [۲۶] نیز سازگار است. با توجه به طیف گسترده انرژی الکترون‌ها، از شکل ۱ مشاهده می‌شود که توزیع آنها از توزیع ماکسولی دور است و اکثر الکترون‌ها بواسطه برهم‌کنش خود با محیط جاذب فاصله بین سوخت و غلاف و واهلش در محیط، به انرژی حرارتی می‌رسند. از طرف دیگر، اثر پاره‌های شکافت ذکر شده بر روی توزیع انرژی الکترون‌ها مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که کریپتون کمترین تأثیر و سزیوم بیشترین تأثیر را بر توزیع انرژی الکترون‌ها در این ناحیه دارد. با



درضمن، این موضوع با نتیجه ارائه شده در مرجع [۱] نیز هم‌خوانی دارد.

انرژی الکترون‌ها بسیار ناچیز است و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که آنها اثری بر رسانش حرارتی از طریق الکترون‌ها در دانسیته‌های متفاوت فاصله بین سوخت و غلاف ندارند.

## مراجع

- Conductivity of the Alkali Metal Vapors and Argon*”, Liquid Metals Research Laboratory, Department of Chemical Engineering Columbia University, New York, N.Y.10027(1968).
12. L Spitzer, R Jr., *Phys. Rev.*, **89** (1953) 977.
  13. L Spitzer, R Jr., *“Physics of Fully Ionized Gases”*, Wiley Interscience, New York (1962).
  14. H Risken, *“The Fokker-Planck Equation”*, ed. Herman Haken, Springer- Verlag, New York (1988)1.
  ۱۵. پروازیان و اخوت، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۵، ۴، (۱۳۸۴) ۱۹۷.
  15. A Parvazian and A Okhovat, *Iranian Journal of Physics Research*, **5**, **4**, (2005) 197.
  16. F Golian, A Pazirandeh and S Mohammadi, *Plasma. Sci. and Technol.*, **17** (2015) 441.
  17. A Vertes, *et al.*, *“Hand book of nuclear chemistry”*, ed. London (2011) 374.
  18. K S Krane, *“Introductory Nuclear Physics”*, New York, United states (1988) 195.
  19. D Diver, *“A plasma formulary for physics”*, Technology and Astrophysics, Berlin (2011) 79.
  20. L Spitzer, *“Physics of fully ionized gases”*, New York (1962) 127.
  21. *U.S.NRC Regulatory Guide No.1.183,428.*
  22. E B Podgorsak, *Radiation Physics for Medical Physicists*, (2010) 233.
  23. H Heil and B Scott, *Phys. Rev.* **145** (1966) 279.
  24. W Demtroder, *“Atoms, Molecules and Photons”*, (2010) 39.
  25. H A Hassan and J Deese, U.S. National Aeronautics and Space Administration(1974).
  26. J Deese and H A Hassan, U.S. National Aeronauticsand Space Administration (1976).
  1. W G Burns, E H P Cordfunke, *et al.*, *“Chemistry of the fuel-clad gap of a PWR rod”*, International working group on water reactor fuel performance and technology, IAEA (1986) 41.
  2. A Snytnikov, *Procedia Computer Science* **1** (2010) 607.
  3. P Garcia, C Struzik, and N Veyrier, *“Temperature Calculations and the Effect of Modelling the Fuel Mechanical Behaviour”*, Seminar Proceedings Cadarache, 3-6 March France (1998).
  4. K Lassmann and F Hohlefeld, *Nuclear Engineering and Design*, **103** (1987) 215.
  5. I Cohen, B Lustman, and J D Eichenberg, *“Measurement of Thermal Conductivity of Metal Clad Uranium Dioxide Rods During Irradiation”*, WAPD-228, Bettis Atomic Power Laboratory (1960).
  6. J A Turnbull, *“A review of the thermal behavior of nuclear fuel”*, Seminar Proceedings Cadarache, 3-6 March France (1998).
  7. H Von Ubisch, S Hall, R Srivastav, *“Thermal Conductivities of Mixture of Fission Product Gases with Helium and Argon”*, Paper F/ 143, 2nd Geneva Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, IAEA, Vienna (1957).
  8. N Tsoulfanidis, *“Measurement and detection of radiation”*, Hemispher Pub. Corp. (1983).
  9. K Maeda, K Tanaka, T Asaga and H Furuya, *Journal of Nuclear Materials*, (2005) 274.
  10. Warren F Ahtye, *“Calculation of Total Conductivity of Ionized Gases”*, Vehicle Environment Division, Ames Research Center, NASA, Moffett Field, California (1968).
  11. Chai-sung Lee and Charles F Bonilla, *“Thermal*