



توسعه و پیاده‌سازی مدل ساختار مصرف بالا در سوخت اورانیم دی‌اکساید به‌منظور آنالیز رفتار گازهای حاصل از شکافت

محمدهادی پرهمت^{۲،۱}، مهدی عباسی^{۱*}

۱. گروه شبیه‌سازی چندمقیاسی-چند فیزیکی و آنالیز محاسباتی، مؤسسه تحقیقات پیشرفته شبیه‌سازی و جداسازی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۵۹۳۱، تهران-ایران
۲. پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۸۳۶، تهران-ایران

*Email: abbasi.mahdi64@gmail.com

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۸/۲۲ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۲/۲

چکیده

از نظر اقتصادی افزایش مصرف سوخت (بالاتر از ۵۰ GWd/t) میله‌های رآکتورهای هسته‌ای و در پی آن افزایش طول سیکل کاری رآکتور، یک نیروی محرکه قوی برای گنجانیدن مدل‌های مصرف بالای سوخت در توسعه کدهای تحلیل عملکرد سوخت می‌باشد. در این تحقیق، به منظور بررسی رفتار گازهای حاصل از شکافت برای ساختار مصرف بالای سوخت دو مدل نیمه‌تجربی برای توصیف تشکیل مصرف بالای سوخت (HBS) در کد محاسباتی MSFGR-۰۲ برای تحلیل رفتار گاز شکافت در مقیاس مزو (میانی)، پیاده‌سازی شده است، که شامل فرایند چندضلعی شدن/ تبلور مجدد و تخلیه گاز شکافت درون‌دانه‌ای است. برای این منظور، با استفاده از داده‌های موجود در مراجع برای اندازه دانه (اندازه‌گیری شده با پردازش تصویر) در موقعیت‌های شعاعی که در آن تغییر ساختار اتفاق افتاده است، رابطه نیمه‌تجربی برای اندازه شعاع دانه و همچنین میزان حجم تغییرساختار یافته در سوخت برحسب مصرف سوخت ارائه شده است. در نهایت تغییرات میزان غلظت گاز حاصل از شکافت در طول دوره تابش تا رسیدن به مصرف بالای سوخت با داده‌های تجربی ارائه شده در مراجع مقایسه گردید که حاکی از قابل قبول بودن نتایج می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: مصرف بالای سوخت، تبلور مجدد، رهایش گاز حاصل از شکافت، عملکرد سوخت هسته‌ای

Development and implementation of high burnup structure model in nuclear fuels to analyze the behavior of fission gases

M.H. Porhemmat^{1,2}, M. Abbasi^{*1}

1. Department of Multiscale Simulation-Multiphysics and Computational Analysis, Advanced Research Institute of Simulation and Separation, P.O.Box:143995-5931, Tehran-Iran
2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.BOX: 14395-836, Tehran – Iran

Research Article

Received: 13.11.2023, Revised: 16.4.2024, Accepted: 21.4.2024

Abstract

From an economic perspective, increasing nuclear fuel burnup (up to 50 GWd/t) and thereby extending reactor cycles are compelling reasons to develop models that incorporate High Burnup Structure (HBS) phenomena into fuel performance codes. This research focuses on investigating the behavior of fission gases within HBS by implementing two semi-empirical models in the MSFGR-02 code. These models describe the formation of HBS, encompassing polygonization (recrystallization) and the release of intra-granular fission gas. The study utilizes grain size measurements obtained from references and applies them to radial positions where data reconstruction was incomplete. This approach yields semi-empirical relationships for grain radius size and restructured volumetric fraction as functions of fuel burnup. Comparisons between changes in fission gas concentration during irradiation until HBS formation and experimental data from references demonstrate acceptable agreement.

Keywords: High fuel burnup, Recrystallization, Fission gas release, Nuclear fuel performance



۱. مقدمه

گازهای خنثی زنون و کریپتون از محصولات شکافت سوخت UO_2 می‌باشند که تأثیر بسزایی در عملکرد میله‌های سوخت در رآکتورهای هسته‌ای ایفا می‌کنند. گاز حاصل از شکافت که عمدتاً زنون و کریپتون است، از طریق شکافت در دانه‌های سوخت هسته‌ای تولید می‌شوند. متعاقباً، جمعیتی از حباب‌های درون‌دانه‌ای تشکیل می‌شوند که اتم‌ها را با ماتریس سوخت از طریق مکانیسم‌های به دام انداختن و انحلال مجدد، همراه با انتشار خالص اتم‌های گاز به سمت مرزهای دانه مبادله می‌کنند. در مرزهای دانه، جمعیتی از حباب‌های بین‌دانه‌ای به وجود می‌آیند، که ممکن است به هم متصل شوند و رشد کنند، در نهایت یک مسیر متصل به ناحیه آزاد میله تشکیل دهند و باعث آزاد شدن گازهای حاصل از شکافت می‌شوند. این حباب‌های ناشی از گازهای حاصل از شکافت مسئول تورم گازی سوخت هستند. به علت انحلال کم در ماتریس سوخت، این گازها تمایل دارند به صورت حباب در داخل دانه و نیز مرزدانه‌ها رسوب نمایند. برای بررسی بهتر رفتار گازهای زنون در سوخت هسته‌ای، پدیده‌های فیزیکی قابل بررسی به فرایندهای درون‌دانه‌ای و مرزدانه تقسیم‌بندی می‌شوند. با تشکیل گاز زنون حاصل از شکاف هسته‌ای، این اتم‌های گازی باعث تشکیل و رشد حباب‌هایی در درون‌دانه و نیز مرزدانه شده که باید مورد بررسی قرار گیرند.

هنگامی که مصرف میله‌های سوخت اکسید اورانیم (یا اورانیم-پلوتونیم) در قلب رآکتور هسته‌ای از یک مقدار معین فراتر رود، برخی از ویژگی‌های فیزیکی سوخت مانند اندازه دانه‌بندی سوخت دچار تغییرات اساسی شده که خود باعث تغییر قابل‌توجهی در عملکرد میله سوخت خواهد شد. این تغییرات ساختاری غالباً از حاشیه‌های لبه میله که منطقه لبه^۱ نامیده می‌شود، شروع می‌شود. دلیل اصلی این پدیده، جذب موضعی نوترون‌های فوق حرارتی توسط U_{238} می‌باشد که در لبه میله سوخت با احتمال بیشتر انجام می‌گیرد.

با توجه به قله‌های تشدید در سطح مقطع جذب ایزوتوپ U_{238} ، چندین ایزوتوپ Pu مانند Pu_{239} و Pu_{241} به‌خصوص در منطقه لبه متولد می‌شوند. به دلیل انباشت این ایزوتوپ‌ها در منطقه لبه نسبت به مناطق مرکزی، ساختار فیزیکی سوخت بسته به منطقه مورد بررسی متفاوت خواهد بود. لذا در مصرف سوخت‌های بالا، وابستگی شعاعی رفتار مصرف سوخت حتماً باید در نظر گرفته شود. قابل ذکر است که در مقادیر کم و

متوسط مصرف سوخت می‌توان با تقریب نسبتاً خوبی یک توزیع یکنواخت برای سوخت هسته‌ای در نظر گرفت، لذا بررسی شعاعی ساختار منطقه لبه ضرورت ندارد. مقدار آستانه برای ایجاد ضرورت در بررسی منطقه لبه در سوخت هسته‌ای اکسید اورانیم در حدود $Gd/t_{UO_2} 60$ می‌باشد. این مقدار مصرف سوخت در منطقه لبه با مصرف متوسط $Gd/t_{UO_2} 40-45$ به دست می‌آید. فراتر از این آستانه، عرض ناحیه لبه با پیشرفت تابش افزایش می‌یابد [۱].

از مهمترین تغییراتی که در منطقه لبه و در مصرف سوخت بالا اتفاق می‌افتد، تغییر در ابعاد دانه‌بندی سوخت و تشکیل ریزساختارهای اولیه^۲ با ابعاد زیر میکرون از دانه‌های چندین میکرون می‌باشد. با ایجاد ریزساختارهای سوخت در مصرف سوخت بالا، انتقال گازهای زنون از درون دانه به مرزدانه با سرعت بیشتری انجام شده که این پدیده را تهی شدن زنون^۳ می‌نامند. همچنین ایجاد تخلخل‌های چندین میکرونی از ساختارهای ریز اولیه (زیر میکرون) یکی دیگر از تغییرات اساسی در منطقه لبه در اثر مصرف سوخت بالا است. به طور کلی این تغییرات ساختاری پدیدار شده در منطقه لبه، پدیده ساختار مصرف بالا (HBS^4) نامیده می‌شوند، که به طور خلاصه با مشخصات زیر شناسایی می‌شود:

۱. تهی شدن Xe از ماتریس سوخت

۲. درشت شدن تخلخل گازهای شکافت به ابعاد میکرومتر.

۳. تبلور مجدد در ساختار کریستالی سوخت و ریز شدن دانه‌ها به فرایند HBS اثر لبه نیز گفته می‌شود، زیرا که آغاز این فرایند از نزدیک لایه خارجی سوخت (منطقه لبه) در رآکتورهای آب سبک (LWR) مشاهده شده است. قابل ذکر است که این پدیده علاوه بر سوخت UO_2 ، در انواع سوخت‌های دیگر به ویژه سوخت‌های MOX مانند $U-Pu$ ، $U-Mo$ و نیز سوخت‌های کاربیدی در رآکتورهای زاینده سریع (FBR)^۵، مشاهده شده است.

تاکنون چندین مدل نیمه‌تجربی و مکانیکی برای توصیف فرایند HBS و تأثیر آن بر عملکرد سوخت، مورد بررسی قرار گرفته است. لاسمن^۶ و همکاران در سال ۱۹۹۲ یک مدل نیمه‌تجربی را برای تعیین رفتار گاز زنون در حال تهی شدن در نظر گرفته‌اند. در این مدل از یک تابع‌نمایی نیمه‌تجربی برحسب مصرف سوخت برای بیان کمی کاهش غلظت گاز زنون

2. Micro-Structure

3. Xenon Depletion

4. High Burnup Structure

5. Fast Breeder Reactor

6. Lassman



۲. استخراج مدل

در ناحیه لبه صفحه سوخت هسته‌ای UO_2 ، ترکیبی از دو پدیده شامل مصرف موضعی بالای سوخت ($50-60 \text{ GWD/t}_{UO_2}$) که باعث ایجاد آسیب زیاد در اثر تشعشع و تشکیل محصولات شکافت با غلظت بالا می‌شود) و نیز دمای پایین‌تر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد (که به علت محدودیت در بازیابی حرارتی در اثر آسیب ناشی از تشعشع است)، یک تغییر ریزساختاری در سوخت مشاهده می‌شود که به تشکیل دانه‌بندی جدید در سوخت منجر می‌شود. تغییر ساختار در مصرف سوخت بالا، شامل چهار پدیده مشخص است [۹-۱۱]: (۱) انباشته شدن نابجایی‌ها که یک شبکه درهم‌تنیده را تشکیل می‌دهد، (۲) چندضلعی شدن یا تبلور مجدد دانه‌های میکرومتری اولیه به دانه‌های زیرمیکرومتری عاری از نقص‌های گسترده، (۳) کاهش غلظت گازهای حاصل از شکافت درون‌دانه‌ای و (۴) تشکیل غلظت جدیدی از حباب‌های کروی بین‌دانه‌ای [۱۲]. لازم به ذکر است که رخداد این فرایندها کاملاً متوالی نبوده و ممکن است تا حدی هم‌زمان رخ دهند.

در قسمت اول این بخش، از داده‌های تجربی برای اندازه دانه در ساختار مصرف بالای سوخت که بر اساس اسکن تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM^5 به دست آمده است، استفاده شده است. برای افزایش دقت و صحت محاسبات، اندازه‌گیری شعاع و توزیع متوسط دانه‌های سوخت، علاوه بر ناحیه لبه (شامل تبلور مجدد) در نواحی مرکز سوخت (با ساختار اولیه) صورت گرفته است. نمونه سوخت مورد بررسی در این تحقیق، سوخت تابش دیده یک رآکتور تجاری PWR است [۱۳]. برای محاسبه مصرف سوخت شعاعی^۶ و نیز مصرف سوخت مؤثر^۷، از مدل TUBRNP موجود در کد محاسباتی TRANSURANUS^۲ استفاده شده است [۱۴، ۱۵]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که برای محاسبه پارامترهای سوخت در زمان تجمع آسیب‌های ناشی از مصرف سوخت بالا و نیز دمای پایین، مصرف سوخت مؤثر (bu_{eff}) استفاده می‌شود. از این‌رو، مصرف سوخت مؤثر، در مقایسه با مصرف سوخت موضعی، کمیت مناسب‌تری برای تعیین آستانه تشکیل HBS است. مصرف سوخت مؤثر

مؤثر

رابطه ۱ به دست می‌آید [۱۶، ۱۷].

درون‌دانه‌ای در کارکرد بالای سوخت استفاده شده است. این مدل در کد محاسباتی TRANSURANUS پیاده‌سازی شده است [۲، ۳]. در تحقیقی مشابه، جرن کوپست^۱ با در نظر گرفتن یک پارامتر حدی جهت محاسبه حد آستانه تشکیل HBS در مصرف بالای سوخت، یک مدل توسعه یافته‌تر از لاسمن برای پیش‌بینی رفتار گاز زنون پیشنهاد داده است که در کدهای محاسباتی مانند FRABCON/FRABTRAN پیاده‌سازی گردیده است [۴].

همچنین لمس^۲ و همکاران، با توسعه روابط نیمه‌تجربی و مکانیکی برای بررسی تخریب‌های ایجاد شده در HBS، یک مدل توسعه یافته‌تر از مدل لاسمن را ارائه داده که در کد محاسباتی DIONISIO پیاده‌سازی شده است [۵، ۶].

علاوه بر مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی فوق، مدل‌های مکانیکی دیگر نیز برای توصیف تشکیل ریزساختارها و تبلور مجدد توسعه داده شده است. رست^۳ یک مدل مکانیکی با در نظر گرفتن تکامل شبکه‌های نابجایی سلولی^۴ به عنوان هسته‌های تبلور مجدد و تعامل آنها با حباب‌های درون‌دانه‌ای پیشنهاد کرده است [۳]. همچنین وشچونوف و ستاک [۷] مدلی را برای ارزیابی نقص‌های نقطه‌ای، خطی و حجمی تحت تابش پیشنهاد کردند. پارامتر کلیدی تعیین‌کننده تشکیل HBS، چگالی پیش‌بینی شده نابجایی است که با مقدار آستانه به دست آمده از داده‌های تجربی برای اعلام تشکیل HBS مقایسه می‌شود [۸].

در این تحقیق با توجه به تجربه‌های به دست آمده در زمینه توسعه و پیاده‌سازی مدل‌های پیش‌بینی رفتار گازهای حاصل از شکافت، دو مدل برای شبیه‌سازی تبلور مجدد در ساختار سوخت در هنگام تشکیل HBS و تخلیه گاز شکافت درون دانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌های توسعه داده شده این قابلیت را دارد که هم به تنهایی مورد استفاده قرار گیرند و رفتار گاز حاصل شکافت را در مقیاس میانی (مزو) مورد ارزیابی قرار دهند، و هم این‌که می‌توانند به عنوان یک زیر روال برای پیش‌بینی رفتار گاز حاصل از شکافت، در کدهای تحلیل عملکرد سوخت فراخوانی شود. لذا هدف نهایی از تکمیل این کد استفاده از آن در کد تحلیل عملکرد سوخت FRAPCON می‌باشد. همچنین در ادامه مدل پیاده‌سازی شده برای بررسی رفتار گازهای بین‌دانه‌ای تشریح شده است.

1. Jernkvist
2. Lemes
3. Rest
4. Cellular Dislocation Networks

5. Scanning Electron Microscopy

6. Radial Burnup

7. Effective Burnup

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology

Vol. 45 (4), Serial Number 110, 2025, P 168-178



در مدل مذکور مختصات شعاعی نسبی (ρ) به صورت تغییرات شعاع دانه در ناحیه HBS (r) به شعاع دانه در ناحیه اولیه (a ; ناحیه قبل از HBS) تعریف می‌شود: $\rho = r/a$. بنابراین معادله انتشار گاز درون دانه‌ای به صورت زیر خواهد بود [۲۱].

$$\frac{\partial c_1}{\partial bu_{eff}} = \frac{D}{a^2} \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho^2 \frac{\partial}{\partial \rho} c_1 + y \dot{F}$$

$$IC \ c_1(\rho, bu_{eff,0}) = c_1^0(\rho) \quad (3)$$

$$BC \begin{cases} c_1(1, bu_{eff,0}) = 0 \\ \left[\frac{\partial c_1}{\partial \rho} \right]_{\rho=0} = 0 \end{cases}$$

که در آن c_1 غلظت گاز حاصل از شکافت درون دانه‌ای، y (wt. % fiss⁻¹) ضریب پخش مؤثر، D ($\mu\text{m}^2 \text{ GWd/tUO}_2$) بهره شکافت و F (fiss/m³s) نرخ شکافت می‌باشد.

ترکیب معادلات ۲، ۳ منجر به مدلی برای تکامل اندازه دانه و کاهش گاز حاصل از شکافت درون دانه‌ای (زنون) در HBS می‌شود. طبق این مدل، با افزایش مصرف سوخت، اندازه شعاع دانه کاهش یافته که منجر به افزایش نرخ پخش گاز زنون از درون دانه به مرز دانه می‌شود. بنابراین در ناحیه HBS، فرایند تهی شدن گاز زنون درون دانه‌ای رخ می‌دهد.

۲.۲ مدل ۲: ارائه رابطه نیمه تجربی برای میزان حجم تغییر ساختار یافته در HBS

در این مدل، برخلاف مدل اول که در آن یک رابطه برای تغییرات شعاع دانه سوخت برحسب میزان مصرف مؤثر سوخت ارائه داده شده بود، یک رابطه تجربی برای تغییرات حجم از ساختار اولیه (قبل از HBS) به ساختار HBS ارائه شده است. همچنین در این مدل برای اندازه شعاع دانه در ناحیه HBS یک مقدار حدی در نظر گرفته می‌شود. در ادامه جزئیات پیاده سازی این مدل ارائه شده است.

۱.۲.۲ استخراج داده برای میزان حجم تغییر ساختار یافته HBS
گرچک^۲ و همکاران [۱۳] یک کار تحقیقاتی تجربی کامل و دقیقی بر روی ساختارهای HBS انجام داده‌اند. در این کار یک صفحه سوخت UO_2 در رآکتور هالدن^۳ تا مصرف سوخت متوسط 76 GWd/tUO_2 تحت تابش قرار گرفته است. سپس با استفاده از میکروسکوپ‌های الکترونی پیشرفته، تغییرات حجم ریزساختارهای تشکیل شده از ناحیه لبه تا مرکز سوخت مورد

$$bu_{eff} = \int H(T_{th}) dbu$$

$$H(T_{th}) = \begin{cases} 1 & T \leq T_{th} \\ 0 & T \geq T_{th} \end{cases} \quad (1)$$

در این رابطه، bu متغیر مصرف سوخت، T دمای سوخت و T_{th} دمای آستانه برای آغاز HBS، و H تابع هویساید^۱ می‌باشد. ارائه یک مدل برای توصیف فرایند HBS نیازمند توصیف رفتار اندازه شعاع دانه از ریزساختار اولیه به ساختار تغییر یافته است. روابط توصیف کننده تغییرات اندازه شعاع دانه با زمان (یا مصرف سوخت) می‌تواند از محاسبات مکانیکی و یا برازش با داده‌های تجربی موجود به دست آید. لازم به ذکر است علاوه بر مدل تغییر اندازه شعاع دانه، می‌توان از مدل تغییرات حجم کل ناحیه مورد بررسی قبل و بعد از HBS نیز استفاده کرد. در ادامه جزئیات این دو مدل توضیح داده شده است.

۱.۲ مدل ۱: ارائه رابطه نیمه تجربی برای اندازه شعاع دانه
این مدل تشکیل HBS را با کاهش تدریجی اندازه دانه نشان می‌دهد. داده‌های تجربی برای اندازه دانه که در مرجع [۱۸، ۱۹] آمده است برای استخراج یک رابطه نیمه تجربی شعاع دانه سوخت برحسب مصرف سوخت مؤثر موضعی استفاده می‌شود. معادله دیفرانسیل زیر تغییرات شعاع دانه سوخت را برحسب تغییرات مصرف سوخت مؤثر و براساس شرایط اولیه (شعاع دانه سوخت اولیه) نشان می‌دهد [۱۶، ۱۷، ۲۰].

$$\frac{da}{dbu_{eff}} = \frac{1}{\tau} (a - a_{\infty})$$

$$IC \ a(bu_{eff}) = a_0 \quad (2)$$

که در آن a (μm) شعاع دانه کروی است، bu_{eff} مصرف سوخت مؤثر موضعی برحسب GWd/tUO_2 و $\tau = (7.0 \pm 0.8)$ مصرف سوخت مشخصه حاکم بر نرخ تشکیل HBS برحسب GWd/tUO_2 و $a_{\infty} = (0.15 \pm 0.3)$ شعاع حدی دانه که در مصرف بالای سوخت UO_2 دچار تبلور مجدد شده‌اند، می‌باشند. شرایط اولیه مورد استفاده در معادله بالا شامل: $a_0 = 5.47 \mu\text{m}$ و $bu_{eff0} = 50 \text{ GWd/tUO}_2$ و اندازه اولیه دانه $5.47 \mu\text{m}$ می‌باشد. لازم به ذکر است که در ناحیه HBS، به دلیل پایین بودن دما، رشد حرارتی دانه ناچیز بوده و در نتیجه از آن صرف نظر شده است.

2. Gerczak

3. Halden

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology

Vol. 45 (4), Serial Number 110, 2025, P 168-178

1. Heaviside Function



جدول ۱. کسری حجمی اندازه گیری شده از ناحیه تبلور مجدد [۱۳]

ناحیه پوشیده		ناحیه تبلور	
شعاع	مصرف سوخت	شده با تبلور	حجم ناحیه تبلور
نسبی	مؤثر	مجدد (تخمین زده شده)	مجدد شده
(/)	(GWd/tUO ₂)	(/)	(/)
۰٫۶۳	۶۴٫۷	۰٫۱۵	۰٫۲۲
۰٫۸۲	۷۱٫۲	۰٫۴۱	۰٫۵۴
۰٫۹۴	۸۸٫۴	۰٫۵۴	۰٫۶۹
۰٫۹۵	۹۰٫۸	۰٫۶۱	۰٫۷۶
۰٫۹۹	۱۲۹٫۴	۱٫۰۰	۱٫۰۰

۲.۲.۲ فرمولاسیون مدل برای تشکیل ساختار مصرف بالای سوخت و تهی شدن گاز شکافت

در این بخش فرمول بندی مدل در نظر گرفته شده برای تشکیل HBS و رفتار گاز شکافت درون دانه ای شرح داده می شود. توسعه HBS از طریق یک مدل نیمه تجربی توصیف می شود که کسری از سوخت تغییر ساختار یافته را به مصرف سوخت موضعی مؤثر مرتبط می کند.

از داده های استخراج شده از مراجع برای برازش عبارتی برای نرخ تشکیل HBS به عنوان تابعی از مصرف سوخت مؤثر استفاده شده است [۱۳، ۲۰]. به طور خاص، فرمول بندی کلموگروف-جانسون-مهل-آورامی^۱ (KJMA) برای مدل سازی پدیده های بازسازی نوعی و انتقال فاز استفاده شده است [۲۳].

$$a = 1 - \exp(-k.t^\gamma) \quad (4)$$

که در آن α کسر حجمی بازسازی شده، $k(s^{-\gamma})$ ثابت نرخ تبدیل، γ ثابت آورامی^۲، و t زمان است. در این کار، کلیات رابطه KJMA را حفظ شده و فقط مصرف سوخت موضعی را به جای زمان در نظر گرفته شده است. همچنین دو ثابت K و γ با روش برازش حداقل مربعات از داده های تجربی تعیین شده است. روش برازش، مقادیر $k=2.77E-07$ و $\gamma=3.35$ را به دست می دهد. به این ترتیب معادله ۴ به صورت زیر بازنویسی می شود.

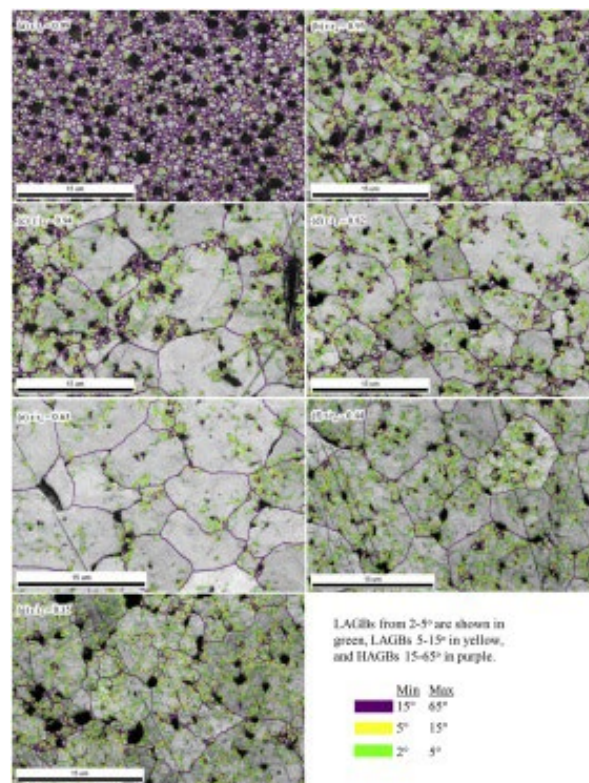
$$a = 1 - \exp(-2.77 \times 10^{-7} (bu_{eff})^{\gamma/3.5}) \quad (5)$$

باید توجه داشت که، اگرچه ضرایب به دست آمده ناشی از یک روش برازش است، معنای فیزیکی را حفظ می کنند، که نتیجه مستقیم فرمول بندی نظری KJMA است. در واقع، مقدار γ که در توان متغیر مصرف سوخت ظاهر می شود می تواند اطلاعاتی در مورد ماهیت انتقال فاز ارائه دهد.

بررسی قرار گرفته است. نتیجه پردازش تصاویر مورد بررسی توسط این گروه در شکل ۱ آورده شده است [۱۳]. با توجه به این شکل، شعاع های نسبی (p) برابر با ۰٫۶۳، ۰٫۸۲، ۰٫۹۴ و ۰٫۹۵ به دست آمده است. لازم به ذکر است که شعاع نسبی ۰٫۹۹، مربوط به زمانی است که فرایند HBS تکمیل شده است. در این حالت ریز ساختارهایی با دانه هایی با متوسط شعاع ۲۰۰ نانومتر مشاهده شده است. این مورد به طور کامل در شکل ۱ نشان داده شده است. اطلاعات حاصل از برازش تصویر فوق در جدول ۱ لیست شده است [۱۳، ۱۸، ۱۹].

در مدل ارائه شده در این تحقیق از داده های به دست آمده از جدول ۱ استفاده شده است که به طور کامل تر در مرجع [۲۰، ۲۲] آورده شده است. از آنجایی که دمای تابش نمونه کمتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد است، مصرف سوخت موضعی معادل مصرف سوخت مؤثر تعریف شده در معادله ۱، می باشد. برای تخمین مصرف سوخت به عنوان تابعی از موقعیت شعاعی از اطلاعات گزارش شده مرجع [۲۰] استفاده شده است. در مورد تابش نمونه شرایط زیر لحاظ شده است:

۱. میانگین مصرف سوخت نمونه برابر با ۷۶ GWd/tUO₂ است،
۲. مصرف سوخت در لبه نمونه ۱۹ درصد بیشتر از مرکز است تا یک بهینه سازی عددی مشخص برای تخمین مصرف سوخت در موقعیت های شعاعی نمونه انجام شود.



شکل ۱. نمایش پدیده تبلور مجدد در شعاع های نسبی نسبت به لبه سوخت [۱۳].

1. Kolmogorov-Johnson-Mehl-Avrami (KJMA)

2. Avrami



که در آن $B = \left(\frac{3\Omega}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}}$ و $\Omega(m^3)$ حجمی است که توسط یک اتم گاز شکافت در داخل حباب‌های درون‌دانه‌ای در UO_2 اشغال شده است.

در این تحقیق رویکرد شبه پایا اتخاذ شده است، بدین معنی که نرخ به دام انداختن و انحلال مجدد در حالت تعادل در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، معادله (۶) برای غلظت کل گاز درون‌دانه‌ای، $c_i(m^3) = c + m$ ، به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\begin{aligned}\frac{\partial c_i}{\partial t} &= D_{eff} \nabla^2 c_i t + y \dot{F} \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= \nu - b_n N\end{aligned}\quad (8)$$

که در آن $D_{eff} = \frac{D.b}{b+g}$ ضریب پخش مؤثر است. باید تأکید کرد که این رویکرد، یعنی حل یک معادله پخش منفرد با در نظر گرفتن ضریب پخش مؤثر (معادله ۸) به جای حل معادله ۶، رویکردی است که در حال حاضر در کدهای پیشرفته عملکرد سوخت اتخاذ شده است [۲۴، ۲۶] و در اکثر شرایط کارکرد عادی و حادثه استفاده می‌شود.

بالین حال، این مدل محدودیت‌هایی در مدل‌سازی فرایندهای گذرای سریع در دماهای نسبتاً بالا مانند حوادث ناشی از اعمال راکتیویته^۲ (RIA) دارد [۲۷]. لازم به ذکر است که کل محاسبات این تحقیق در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد که همان دمای آستانه می‌باشد، انجام شده است. تا زمانی که فرایند HBS به طور کامل شکل نگرفته است، ساختار سوخت موردنظر شامل دو فاز ریزساختار اولیه (میکرومتری) و ناحیه HBS (زیر میکرومتری) است. لذا معادله توصیف‌کننده غلظت کلی گاز، c_i^* ، این ساختار دو فازی از دو بخش اصلی تشکیل شده است.

$$c_i^* = (1-\alpha).c_i^{NR} + \alpha.c_i^{HBS}\quad (9)$$

که در این معادله، بالانویس‌های NR و HBS به ترتیب نواحی ریزساختار اصلی و HBS اشاره دارند. با افزایش مصرف سوخت، انتقال گازهای زنون از منطقه با ساختار اولیه (منطقه با دانه‌های میکرومتری) به سمت منطقه با ساختار HBS (منطقه با دانه‌های زیرمیکرومتری) افزایش می‌یابد. تغییرات غلظت گاز زنون حاصل از این انتقال با تغییرات مصرف سوخت مؤثر از معادله زیر پیروی می‌کند.

۳.۲.۲ مدل‌سازی تهی شدن گاز حاصل از شکافت در HBS

همان‌طور که انتظار می‌رود مدل به‌دست آمده سرانجام در کدهای عملکرد سوخت گنجانده می‌شود. در این تحقیق دامنه حل به صورت یک تک‌دانه^۱ در نظر گرفته می‌شود. معادله (۵) برای تعیین میزان کسر حجمی که تحت بازسازی در پدیده HBS قرار گرفته است، اتخاذ شده است. در این مدل دو فاز در نظر گرفته می‌شود که شامل ریزساختار اصلی و HBS است. این دو فاز با اندازه دانه‌های مختلف مشخص می‌شوند. ریزساختار اصلی معمولاً دارای دانه‌های با اندازه میکرومتری است، درحالی‌که شعاع دانه‌ها در HBS برابر با ۱۵۰ نانومتر است [۱۸]. در هر دو فاز، رفتار گاز درون‌دانه‌ای از طریق مدل مکانیکی توصیف می‌شود که در آن محاسبه پدیده‌هایی شامل: هسته‌زایی حباب گاز حاصل از شکافت درون‌دانه‌ای، رشد به دلیل به دام افتادن اتم گاز، تخریب ناشی از برهم‌کنش با پاره‌های شکافت، و انتشار اتم‌های گازی از درون دانه به سمت مرزهای دانه در نظر گرفته می‌شود.

این معادله مکانیکی به صورت زیر می‌باشد [۲۴، ۲۵].

$$\begin{aligned}\frac{\partial c}{\partial t} &= D \nabla^2 c - g_n c + b_n m - \nu v + y \dot{F} \\ \frac{\partial m}{\partial t} &= \nu v + g_n c - b_n m \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= \nu - b_n N\end{aligned}\quad (6)$$

که در آن $D(m^2 s^{-1})$ ضریب پخش گاز تک اتمی، $c (atom/m^3)$ غلظت گاز تک اتمی، $m (atom/m^3)$ غلظت گاز درون حباب‌ها، $N (bubble/m^3)$ چگالی تعداد حباب‌ها، $g_n (s^{-1})$ نرخ به دام انداختن، $b_n (s^{-1})$ نرخ انحلال مجدد، $\nu (m^{-3}s^{-1})$ نرخ هسته‌زایی حباب، $y (atom/fiss)$ بهره گاز حاصل از شکافت و $\dot{F} (fiss/m^3s^{-1})$ چگالی نرخ شکافت است.

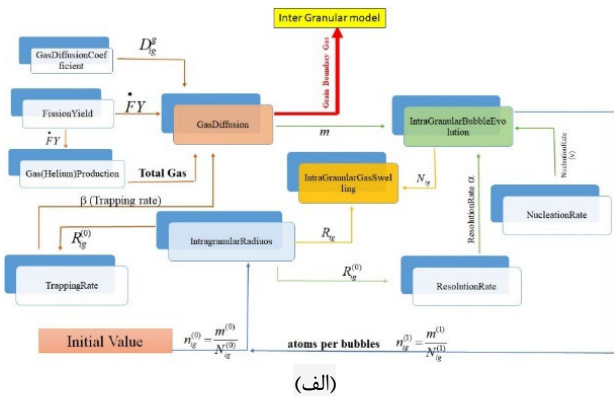
میانگین تعداد اتم‌ها در یک حباب، n ، و شعاع حباب‌ها $R(m)$ ، و تورم حاصل از آنها، $\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)_{ig}$ به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned}n &= \frac{m}{N} \\ R &= B n^{\frac{1}{3}} \\ \left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)_{ig} &= \frac{4}{3} \pi R^3 N\end{aligned}\quad (7)$$

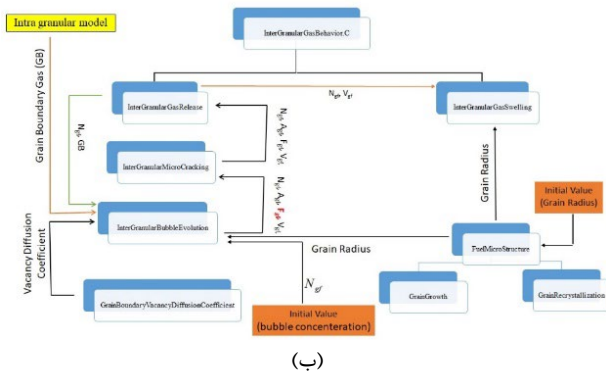


MSFGR رفتار گاز حاصل از شکافت را در مصرف سوخت پایین توصیف می کند.

برای اجرای کد مورد نظر، نیاز به وارد کردن مقادیر اولیه پارامترهای به کار رفته در مدل می باشد. این مقادیر در جدول ۲ ذکر شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲. شماتیکی از ارتباط بین زیرروال های کد MSFGR جهت مدل سازی رفتار گازهای حاصل از شکافت در سوخت های هسته ای که در ۲ دسته (الف) درون دانه ای و (ب) بین دانه ای نشان داده شده است.

جدول ۲. مقادیر اولیه برای اجرای مدل مورد نظر

مقدار اولیه	پارامتر	ردیف
۱	مقدار اولیه شعاع دانه (μm)	۱
۲	مقدار اولیه گاز تولیدی (at/m^3)	۲
۳	مقدار اولیه گاز موجود در دانه (at/m^3)	۳
۴	مقدار اولیه گاز موجود در ساختار سوخت (at/m^3)	۴
۵	مقدار اولیه گاز موجود در حباب درون دانه ای (at/m^3)	۵
۶	مقدار اولیه گاز موجود در حباب مرز دانه (at/m^3)	۶
۷	مقدار اولیه رهش گاز (at/m^3)	۷
۸	مقدار اولیه مصرف سوخت (MWd/kgUO_2)	۸
۹	مقدار اولیه مصرف مؤثر سوخت (MWd/kgUO_2)	۹
۱۰	مقدار اولیه دانسیته سوخت (kg/m^3)	۱۰

$$\left. \frac{\partial c_t^{HBS}}{\partial bu_{eff}} \right|_R = \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dbu_{eff}} (c_t^{NR} - c_t^{HBS}) + \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{\partial c_t^{NR}}{\partial bu_{eff}} \quad (10)$$

در این معادله اولین جمله سمت راست نشان دهنده انتقال مؤثر گاز بین دو منطقه به دلیل تغییر ساختار است. در استخراج معادله ۱۰، فرض شده است که فرایند تکامل غلظت گاز درون دانه ای (که از معادله ۸ محاسبه می شود) از اثرات ساختار بازسازی شده، مستقل است. علاوه بر این، فرض شده است که غلظت کل گاز در حجم دانه در طول فرایند بازسازی ثابت است. کاهش شعاع دانه ها در کنار افزایش تدریجی حجم ناحیه HBS باعث فرایند تهی شدن گاز زنون از درون دانه به سمت مرزدانه در حین تشکیل HBS می شود.

۳. رفتار گاز بین دانه ای

در این مرحله مدل مورد استفاده برای بررسی رفتار گازهای حاصل از شکافت سوخت در مرزهای دانه مورد بررسی قرار می گیرد. مدل مرزدانه ای مورد استفاده در این کد محاسباتی به عنوان مدل اصلی در برخی از کدهای عملکرد سوخت مانند BISON و TRANSURANUS نیز پیاده سازی شده است. بعد از فرایند شکافت هسته ای و تشکیل حباب های درون دانه ای، گازهای اتمی به سمت مرزهای دانه حرکت کرده و تشکیل حباب بین دانه ای می دهند. بنابراین تشکیل حباب ها روی مرزدانه به نرخ انتقال اتم های گازی که از درون دانه به مرزدانه می رسند بستگی دارد. غلظت گازهای مرزدانه (q) از رابطه زیر به دست می آید [۲۸]:

$$\frac{\partial}{\partial t} q = - \left[\frac{3}{a} \frac{\alpha}{\alpha + \beta} D \frac{\partial}{\partial r} (c_1 + m) \right]_{r=a} - R \quad (11)$$

در این معادله a شعاع متوسط دانه های سوخت، R میزان گاز رها شده از مرزدانه و c_1 غلظت گازهای تک اتمی می باشد. ارتباط بین زیرروال های کد MSFGR در شکل ۲ نشان داده شده است.

۴. نتایج

در این بخش، نتایج مدل ارائه شده برای پیش بینی رفتار گاز زنون برحسب تابعی از مصرف سوخت مؤثر با داده های تجربی موجود مقایسه شده است. برای به دست آوردن نتایج، مدل مذکور تحت عنوان کد محاسباتی MSFGR در زبان برنامه نویسی C++ توسعه یافته است. نسخه اولیه کد محاسباتی



رابطه برای شعاع دانه سوخت برحسب میزان مصرف مؤثر سوخت ارائه داده شده، یک رابطه تجربی برای میزان پوشش حجمی سوخت از پدیده HBS ارائه شده است. همچنین در مدل ۲ برای اندازه شعاع دانه در ناحیه HBS یک مقدار حدی در نظر گرفته می‌شود. این مدل یک توصیف پایدار و پیوسته از تشکیل HBS و رفتار گاز شکافت درون‌دانه‌ای وابسته به آن را ارائه می‌دهد. در این شکل نتایج مربوط به دو مدل نیز با یکدیگر مقایسه شده است. به طور کلی در مدل ۱، انتشار گاز زنون از درون‌دانه به سمت مرز دانه کمتر از مدل ۱ به دست آمده است. از آنجا که فرایند شکافت و تولید گاز زنون در هر دو مدل یکسان است، در نتیجه به ازای یک مصرف سوخت یکسان، مدل ۱ مقدار کمی گاز زنون درون‌دانه‌ای را بیشتر نشان می‌دهد. از طرف دیگر، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برای هر دو مدل مذکور، با افزایش اندازه‌های دانه از ۵ به ۷.۵ میکرومتر، انتقال گاز زنون از درون‌دانه به سمت مرز دانه کاهش یافته است. این بدان علت است که دانه‌های کروی با شعاع و حجم بزرگتر، توانایی ذخیره گاز زنون بیشتر را دارند. لازم به ذکر است که در این شکل برای محاسبه درصد وزنی گاز زنون از رابطه زیر استفاده شده است.

$$Xe(Wt\%) = \frac{\rho_{am, int}^{Xe} (atm/m^3) \times M^{Xe} (g/mol)}{N (y/mol)} \times \frac{100}{\rho_g^{UO_2} (g/m^3)} \quad (12)$$

که در این رابطه $\rho_{am, int}^{Xe}$ چگالی تعداد گاز زنون درون‌دانه‌ای (تعداد اتم بر واحد سطح)، M^{Xe} جرم مولی گاز زنون (131.293 g/mol)، N عدد آوگادرو و $\rho_g^{UO_2}$ چگالی جرمی سوخت UO_2 (10.970000 g/m^3) است.

جدول ۳. بیان پارامترهای مدل

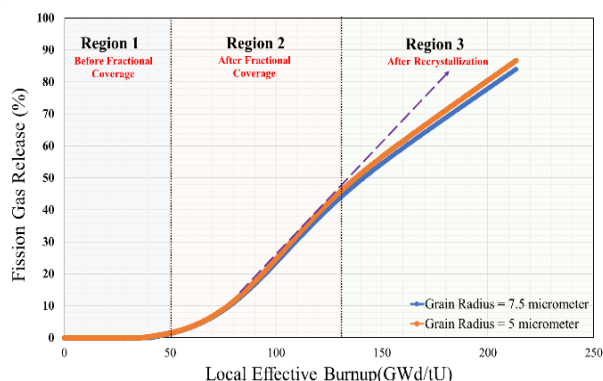
پارامتر	توضیح	مرجع
D_{NR}	$D_{NR} = D_i + D_r + D_r$	[۲۹]
	$D_i = 7.6 \times 10^{-11} \exp(-4.86 \times 10^{-19} / k_B T)$	
	$D_r = 5.64 \times 10^{-25} \exp(-1.91 \times 10^{-19} / k_B T)$	
	$D_r = 7.1 \times 10^{-20} \times \dot{F}$	
D^{HBS}	$D^{HBS} = 4.5 \times 10^{-22} \times \dot{F}$	[۳۱، ۳۰]
g_n	$g_n = 4\pi DNR(n)$	[۳۲]
b_n	$b_n = 2\pi\mu_{ff}\dot{F}(R(n) + R_{ff})^2$	[۳۳]
	$\mu_{ff} = 6.1 \times 10^{-6}$	
	$R_{ff} = 1.1 \times 10^{-9}$	
ν	$\nu = 2.25 \times 10^{-22} \times \dot{F}$	[۳۵، ۳۴]
Ω	$\Omega = 4.9 \times 10^{-29}$	
α	$\alpha = 5.47 \times 10^{-10}$	

همان‌طور که در این جدول مشخص است مقادیر اولیه اکثر پارامترهای مدل صفر می‌باشد، زیرا مدل مورد نظر شبیه‌سازی را از مصرف سوخت صفر انجام می‌دهد. همچنین پارامترهای مورد استفاده در این کد برای شبیه‌سازی رفتار سوخت تحت تابش ذکر شده در بخش ۲، در جدول ۳ آمده است. باید یادآور شد که HBS تنها در قسمتی از سوخت تشکیل می‌شود که دمای آن کمتر از دمای آستانه (حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد، که معمولاً شامل نواحی لبه سوخت در رآکتورهای LWR و همچنین رآکتورهای تحقیقاتی است.

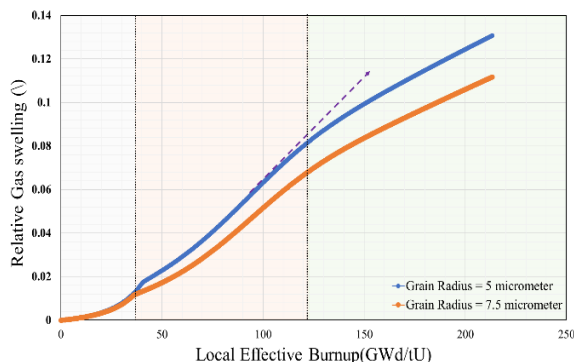
همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، ضریب پخش در ناحیه HBS از ناحیه ریزساختار اصلی متفاوت در نظر گرفته شده است تا بتوان توصیف دقیقی از غلظت گاز باقی‌مانده در شبکه سوخت ارائه داد. همچنین باید خاطر نشان کرد که میزان نرخ شکافت برابر $F(\text{fiss}/m^2s) = 1.7 \times 10^{19}$ می‌باشد.

تغییرات غلظت گاز زنون درون‌دانه‌ای تا مصرف سوخت بالا به دست آمده از مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق، در شکل ۳ رسم و با داده‌های تجربی مقایسه شده است. شعاع دانه‌های اولیه سوخت در این تحقیق، ۵ و ۷.۵ میکرومتر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، نتایج حاصل از محاسبات در این تحقیق روند کلی نتایج تجربی را نشان می‌دهد. به هر حال انحراف کمی از نتایج تجربی می‌تواند حاصل از شرایط متفاوت اندازه‌گیری داده‌های تجربی باشد که امکان فراهم کردن دقیق یک به یک آنها در اینجا امکان‌پذیر نیست. طبق شکل ارائه شده، تغییرات غلظت گاز زنون درون‌دانه‌ای حاصل از شکافت، از مصرف سوخت صفر تا مصرف سوخت تا حدود $50 \text{ GWd}/t_{UO_2}$ یعنی شروع فرایند HBS، افزایش یافته است. بعد از آن، غلظت گاز زنون درون‌دانه‌ای به شدت کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که بعد از این مصرف سوخت، فرایند باز تبلور شروع شده و دانه‌های میکرومتری به سمت دانه‌های نانومتری باز تبلور می‌شوند. لذا در این شرایط، توانایی ذخیره گاز زنون درون‌دانه‌ای کاهش یافته و با افزایش انتقال گاز زنون از درون‌دانه به سمت مرز دانه، غلظت گاز زنون درون‌دانه‌ای کاهش می‌یابد. این فرایند را فرایند تهی شدن زنون هم می‌نامند. در انتها در مصرف سوخت‌های بسیار بالا در حدود بعد از $120 \text{ GWd}/t_{UO_2}$ ، غلظت گاز درون‌دانه‌ای نسبتاً ثابت باقی می‌ماند. در این حالت میزان تولید گاز زنون و انتقال آن از درون‌دانه به سمت مرز دانه تقریباً برابر است. همان‌طور که در قسمت‌های قبلی اشاره شد، برای بررسی فرایند HBS، دو مدل بر پایه تغییر اندازه شعاع دانه (مدل ۱) و نیز تغییرات حجم ناحیه HBS (۲) در کد محاسباتی گنجانده شده بود. به عبارت دیگر، در مدل ۲ برخلاف مدل ۱ که در آن یک





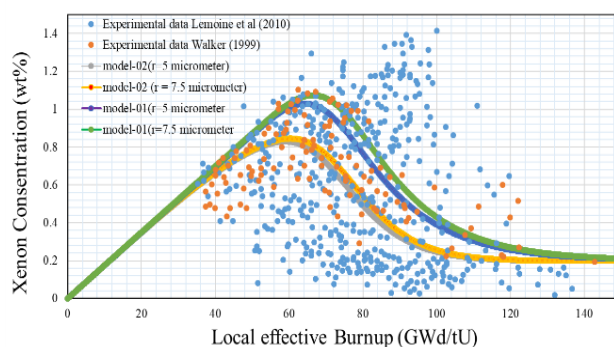
شکل ۴. تغییرات درصد رهایش گاز زنون برحسب مصرف سوخت مؤثر.



شکل ۵. تغییرات تورم نسبی برحسب مصرف سوخت مؤثر.

۵. نتیجه‌گیری

رفتار گازهای حاصل از شکافت (گاز زنون) و تأثیر آن بر خواص سوخت تحت تابش تا مصرف سوخت بالا مدل‌سازی و به کد محاسباتی بر پایه زبان ++C در مقیاس میانی (مزو) الحاق شده است. فرایند مصرف سوخت بالا شامل پدیده‌های مختلفی از جمله فرایند باز تبلور دانه‌ها و تهی شدن غلظت زنون درون‌دانه‌ای است که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته و مدل‌سازی شده است. برای بررسی پدیده مصرف سوخت بالا، از دو مدل مجزا جهت توصیف ناحیه HBS سوخت استفاده شده است. در نهایت تغییرات غلظت گاز زنون، تورم نسبی و رهایش گاز تا مصرف سوخت بالا توسط مدل مورد نظر بررسی و نتایج آن با داده‌های تجربی موجود مقایسه شده است. نتایج حاصل از مدل‌های ارائه شده در این کد محاسباتی، روند کلی نتایج تجربی را تأیید می‌کند. نتایج کد توسعه یافته، روند فرایند تهی شدن زنون را که از نتایج فرایند HBS است، به درستی نشان می‌دهد. همچنین نتایج حاصله نشان می‌دهد که در مصرف سوخت بالا، فرایند تبلور مجدد دانه‌های سوخت بر شیب تغییرات رهایش گاز و نیز تورم نسبی تأثیرگذار است. همچنین در این تحقیق اثر اندازه دانه بر رفتار سوخت هسته‌ای در مصرف سوخت بالا نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اندازه شعاع دانه، فرایند انباشت گاز درون‌دانه‌ای نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۳. مقایسه غلظت گاز درون‌دانه‌ای حاصل از مدل‌های ارائه شده در این تحقیق و داده‌های تجربی [۳۶، ۳۷].

در شکل ۴ درصد رهایش گاز زنون برحسب مصرف سوخت مؤثر نشان داده شده است. برای درک بهتر رهایش گاز، تغییرات این کمیت به ۳ ناحیه تقسیم شده است. در ناحیه اول (کمتر از $50 \text{ GWd/tU}_{\text{O}_2}$)، چون میزان غلظت گاز زنون به حد اشباع موردنظر نرسیده است، لذا فرایند رهایش گاز از مرزدانه اتفاق نیافته است. در این ناحیه تمام غلظت گاز زنون ایجاد شده به صورت گازهای تک اتمی و یا حباب‌های گازی در درون‌دانه و مرزدانه قرار می‌گیرند. بعد از رسیدن به حد اشباع (ناحیه بین $50 \text{ GWd/tU}_{\text{O}_2}$ تا $120 \text{ GWd/tU}_{\text{O}_2}$)، فرایند رهایش گاز شروع شده و با افزایش مصرف سوخت با شیب نسبتاً زیادی افزایش می‌یابد. در نهایت، در ناحیه سه یعنی جایی که فرایند تبلور مجدد و تشکیل ریز ساختارها تا حدودی کامل شده است، شیب تغییرات درصد رهایش گاز تا حدی کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که فرایند HBS بر روی شیب تغییرات رهایش گاز مؤثر است.

شکل ۵ تغییرات نسبی تورم سوخت را برحسب مصرف سوخت مؤثر نشان می‌دهد. در این شکل نیز برای درک بهتر فرایند تورم در اثر پدیده‌های مختلف، ۳ ناحیه یعنی، قبل از فرایند رهایش، بعد از فرایند رهایش و بعد از فرایند باز تبلور، در نظر گرفته شده است. قبل از فرایند رهایش، تورم نسبی با افزایش مصرف سوخت افزایش می‌یابد، که این به دلیل تشکیل حباب‌های گاز زنون حاصل از شکافت در درون و مرزدانه است. بعد از فرایند رهایش گاز (نزدیک به $50 \text{ GWd/tU}_{\text{O}_2}$)، یک شکستگی در منحنی تغییرات تورم ایجاد شده است که نشان‌دهنده شروع فرایند رهایش گاز است. در نهایت بعد از فرایند تبلور مجدد در مصرف سوخت بالا، شیب تغییرات تورم نسبی نیز تا حدودی تغییر کرده است.



مراجع

1. Soba A, Denis A, Romero L, Villarino E, Sardella F. A high burnup model developed for the DIONISIO code. *Journal of Nuclear Materials*. 2013;433(1-3):160-166.
2. Lassmann K. TRANSURANUS: a fuel rod analysis code ready for use. *Journal of Nuclear Materials*. 1992;188:295-302.
3. Rest J. A model for the influence of microstructure, precipitate pinning and fission gas behavior on irradiation-induced recrystallization of nuclear fuels. *Journal of Nuclear Materials*. 2004;326(2-3):175-184.
4. Jernkvist L.O. Modelling of fine fragmentation and fission gas release of UO₂ fuel in accident conditions. *EPJ Nuclear Sciences & Technologies*. 2019;5:11.
5. Denis A, Soba A. Simulation of pellet-cladding thermomechanical interaction and fission gas release. *Nuclear Engineering and Design*. 2003;223(2):211-229.
6. Lemes M, Soba A, Denis A. An empirical formulation to describe the evolution of the high burnup structure. *Journal of Nuclear Materials*. 2015;456:174-181.
7. Veshchunov M, Shestak V. Model for evolution of crystal defects in UO₂ under irradiation up to high burn-ups. *Journal of Nuclear Materials*. 2009;384(1):12-18.
8. Nogita K, Une K. Irradiation-induced recrystallization in high burnup UO₂ fuel. *Journal of Nuclear Materials*. 1995;226(3):302-310.
9. Cunningham M, Freshley M, Lanning D. Development and characteristics of the rim region in high burnup UO₂ fuel pellets. *Journal of Nuclear Materials*. 1992;188:19-27.
10. Baron D, Kinoshita M, Thevenin P, Largenton R. Discussion about HBS transformation in high burn-up fuels. *Nuclear Engineering and Technology*. 2009;41(2):199-214.
11. Rondinella V.V, Wiss T. The high burn-up structure in nuclear fuel. *Materials Today*. 2010;13(12):24-32.
12. Spino J, Vennix K, Coquerelle M. Detailed characterisation of the rim microstructure in PWR fuels in the burn-up range 40–67 GWd/tM. *Journal of Nuclear Materials*. 1996;231(3):179-190.
13. Gerczak T.J, Parish C.M, Edmondson P.D, Baldwin C.A, Terrani K.A. Restructuring in high burnup UO₂ studied using modern electron microscopy. *Journal of Nuclear Materials*. 2018;509:245-259.
14. Lassmann K, Walker C.T, Van de Laar J, Lindström F. Modelling the high burnup UO₂ structure in LWR fuel. *Journal of Nuclear Materials*. 1995;226(1-2):1-8.
15. Schubert A, Van Uffelen P, Van de Laar J, Walker C.T, Haeck W. Extension of the TRANSURANUS burn-up model. *Journal of Nuclear Materials*. 2008;376(1):1-10.
16. Khvostov G, Novikov V, Medvedev A, Bogatyr S. Approaches to modeling of high burn-up structure and analysis of its effects on the behaviour of light water reactor fuels in the START-3 fuel performance code. *Japan: N.p.* 2005.
17. Holt L, Schubert A, Van Uffelen P, Walker C.T, Fridman E, Sonoda T. Sensitivity study on Xe depletion in the high burn-up structure of UO₂. *Journal of Nuclear Materials*. 2014;452(1-3):166-172.
18. Ray I. Observation of a high burnup rim-type structure in an advanced plutonium–uranium carbide fuel. *Journal of Nuclear Materials*. 1997;250(2-3):242-243.
19. Spino J, Stalios A.D, Santa Cruz H, Baron D. Stereological evolution of the rim structure in PWR-fuels at prolonged irradiation: Dependencies with burn-up and temperature. *Journal of Nuclear Materials*. 2006;354(1-3):66-84.
20. Noirot J, Pontillon Y, Yagnik S, Turnbull J.A. Post-irradiation examinations and high-temperature tests on undoped large-grain UO₂ discs. *Journal of Nuclear Materials*. 2015;462:77-84.
21. Lassmann K. Numerical algorithms for intragranular diffusional fission gas release incorporated in the TRANSURANUS code. in *Proceedings of International Seminar on Fission Gas Behavior in Water Reactor Fuels*. Cadarache. France. 2000.
22. Noirot J, Lamontagne J, Nakae N, Kitagawa T, Kosaka Y, Tverberg T. Heterogeneous UO₂ fuel irradiated up to a high burn-up: Investigation of the HBS and of fission product releases. *Journal of Nuclear Materials*. 2013;442(1-3):309-319.
23. Kolmogorov A.N. On the statistical theory of the crystallization of metals. *Bull. Acad. Sci. USSR, Math. Ser.* 1937;1(3):355-359.
24. Rest J, Cooper M.W.D, Spino J, Turnbull J.A, Van Uffelen P, Walker C.T. Fission gas release from UO₂ nuclear fuel: A review. *Journal of Nuclear Materials*. 2019;513:310-345.
25. Van Uffelen P, Hales J, Li W, Rossiter G, Williamson R. A review of fuel performance modelling. *Journal of Nuclear Materials*. 2019;516:373-412.
26. Van Uffelen P, Hales J, Li W, Rossiter G, Williamson R. A review of fuel performance modelling. *Journal of Nuclear Materials*. 2018;516(INL/JOU-18-45934-Rev000).
27. Pastore G, Pizzocri D, Rabiti C, Barani T, Van Uffelen P, Luzzi L. An effective numerical algorithm for intra-granular fission gas release during non-equilibrium trapping and resolution. *Journal of Nuclear Materials*. 2018;509:687-699.



28. Pizzocri D, Pastore G, Barani T, Magni A, Luzzi L, Van Uffelen P, Pitts S.A, Alfonsi A. A model describing intra-granular fission gas behaviour in oxide fuel for advanced engineering tools. *Journal of Nuclear Materials*. 2018;502:323-330.
29. Turnbull J.A, Friskney C.A, Findlay J.R, Johnson F.A, Walter A.J. The diffusion coefficients of gaseous and volatile species during the irradiation of uranium dioxide. *Journal of Nuclear Materials*. 1982;107(2-3):168-184.
30. Bre' Mier S, Walker C. Radiation-enhanced diffusion and fission gas release from recrystallised grains in high burn-up UO_2 nuclear fuel. *Radiation Effects and Defects in Solids*. 2002;157(3):311-322.
31. Pizzocri D, Cappia F, Luzzi L, Pastore G, Rondinella V.V, Van Uffelen P. A semi-empirical model for the formation and depletion of the high burnup structure in UO_2 . *Journal of Nuclear Materials*. 2017;487:23-29.
32. Ham F.S. Theory of diffusion-limited precipitation. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1958;6(4):335-351.
33. Turnbull J. The distribution of intragranular fission gas bubbles in UO_2 during irradiation. *Journal of Nuclear Materials*. 1971;38(2):203-212.
34. Pizzocri D, Barani T, Bruschi E, Luzzi L, Van Uffelen P, Pastore G. Modelling of burst release in oxide fuel and application to the Transuranus code. 2015.
35. White R, Tucker M. A new fission-gas release model. *Journal of Nuclear Materials*. 1983;118(1):1-38.
36. Walker C.T. Assessment of the radial extent and completion of recrystallisation in high burn-up UO_2 nuclear fuel by EPMA. *Journal of Nuclear Materials*. 1999;275(1):56-62.
37. Lemoine F, Baron D, Blanpain P. Key parameters for the High Burnup Structure formation thresholds in oxide fuels. in Proc. of the LWR Fuel Performance/TopFuel/WRFPM conference. 2010.

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

پرهت، محمدهادی، عباسی، مهدی. (۱۴۰۳)، توسعه و پیاده‌سازی مدل ساختار مصرف بالا در سوخت اورانیوم دی‌اکساید به‌منظور آنالیز رفتار گازهای حاصل از شکافت. مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای، ۱۱۰(۴)، ۱۶۸-۱۷۸. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1642>. Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1642.html

