



## بررسی رفتار گازهای حاصل از شکافت در مقیاس مزو: کاربرد در شبیه‌سازی چندمقیاسی سوخت هسته‌ای

مهدی عباسی<sup>۱</sup>، محمدهادی پرهمت<sup>۲</sup>، یاور تقی‌پور آذر<sup>۳</sup>، جواد کریمی ثابت<sup>۴\*</sup>

۱. گروه شبیه‌سازی چندمقیاسی - چند فیزیکی و آنالیز محاسباتی، مؤسسه تحقیقات پیشرفته شبیه‌سازی و جداسازی، صندوق پستی: ۵۹۳۱-۱۴۳۹۹۵، تهران - ایران
۲. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران - ایران
۳. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران
۴. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران - ایران

\*Email: jvkarimi@aeoi.org.ir

### مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۵/۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۸/۱۵

### چکیده

رفتار گازهای حاصل از شکافت مانند زینان و کریپتون، تأثیر بسزایی در عملکرد سوخت‌های هسته‌ای و میزان عمر مفید آن‌ها و در نتیجه طول سیکل کاری راکتور دارد. دو پدیده مهم رهائش گازهای حاصل از شکافت و نیز تورم ناشی از آن‌ها، امروزه به عنوان چالش اصلی در بررسی کارایی سوخت‌های هسته‌ای می‌باشند. در این تحقیق و به منظور مدل‌سازی رفتار چندمقیاسی سوخت هسته‌ای، یک کد محاسباتی عملکرد سوخت در مقیاس مزو برای تجزیه و تحلیل رهائش گازهای حاصل از شکافت (FGR) و تورم ناشی از آن‌ها در سوخت در شرایط پایا توسعه داده شده است. نتایج کد با داده‌های تجربی حاصل از مصرف پایین سوخت تا  $5/6$  MWd/tUO<sub>2</sub> مقایسه شده و توافق خوبی حاصل شده است. در واقع این کد پل ارتباطی بین داده‌های حاصل از محاسبات مقیاس اتمی و مقیاس ماکروسکوپی در کدهای عملکرد سوخت هسته‌ای می‌باشد. این کد علاوه بر این که می‌تواند به عنوان یک کد مستقل مورد استفاده قرار گیرد، قابلیت فراخوانی به عنوان یک زیرروال در سایر کدهای عملکرد سوخت هسته‌ای را نیز دارا می‌باشد. قابل توجه است که، توسعه مدل مورد نظر برای مصرف بالای سوخت و نیز شرایط گذرا در حال انجام است.

**کلیدواژه‌ها:** شبیه‌سازی چند مقیاسی، سوخت UO<sub>2</sub>، رهائش گاز شکافت، تورم گاز شکافت، حالت پایا

## Investigation of the fission gases behavior in meso scale: application in multiscale simulation of nuclear fuel

M. Abbasi<sup>1</sup>, M.H. Porhemmat<sup>1,2</sup>, Y. Taghipour Azar<sup>1,3</sup>, J. Karimi<sup>1,4\*</sup>

1. Department of Multiscale Simulation-Multiphysics and Computational Analysis, Advanced Research Institute of Simulation and Separation, P.O.Box:5931-143995, Tehran-Iran
2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran
3. Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box:11365-3486, Tehran-Iran
4. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box:11365-8486, Tehran-Iran

### Research Article

Received 29.7.2021, Accepted 6.11.2021

### Abstract

The behavior of fission gases such as xenon and krypton have a significant effect on the performance of nuclear fuels, their active life, and the length of the reactor operating cycle. Two important phenomena, including the release of fission gases from the fuel rod matrix and the resulting swelling, are currently the main challenges points in studying the performance of nuclear fuels. In this regard; and in order to multiscale modelling of nuclear fuel a meso-scale fuel performance code has been developed to analyze Fission Gas Release (FGR) and swelling under steady state conditions. The obtained results are compared with experimental data for low burn up to a maximum of 6.5 MWd / tUO<sub>2</sub>, where good agreement is achieved. In fact, this code is a bridge between data from atomic-scale calculations and macroscopic scales in nuclear fuel performance codes. The developed code, has the capability to be utilized as a standalone code, or to be called as a subroutine in other nuclear fuel performance codes. It is noteworthy that the development of the code for high burnup as well as transient conditions is underway.

**Keywords:** Mutiscale simulation, UO<sub>2</sub> fuel, Fission gas release, Fission gas swelling, Steady state



## ۱. مقدمه

سوخت‌های هسته‌ای تحت تابش، دینامیک ساختاری پیچیده‌ای دارند که این موضوع چالشی بزرگ در زمینه‌ی شبیه‌سازی آن‌ها به شمار می‌آید. در قلب یک رآکتور هسته‌ای، محیطی که در معرض تابش شار بالای نوترون و گاما قرار دارد، میکروساختار اولیه‌ی سوخت هسته‌ای (سرامیک‌ها و آلیاژهای اکتینیدی) به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد، به طوری که منجر به تغییرات قابل توجه‌ای در خواص ترمومکانیکی و شیمیایی سوخت می‌شود. بنابراین درک تغییرات میکروساختار می‌تواند در تحلیل کارایی کلی سوخت نقش مهمی داشته باشد. مطالعات بسیاری در سطح دنیا برای دستیابی به خواص سرامیک‌ها پایه‌ی اکتینیدی صورت گرفته که عمدتاً شامل برازش داده‌های حاصل از نتایج پرهزینه تجربی برای شرایط کاری متفاوت رآکتور می‌باشد.

از آنجایی که در سوخت هسته‌ای، تحولات ناشی از پرتو دیدن سوخت از مقیاس‌های الکترونی آغاز شده، و بر مقیاس‌های بزرگ‌تر تأثیرگذار هستند، شبیه‌سازی باید به صورت چند مقیاسی انجام شود. شبیه‌سازی چندمقیاسی شامل ارایه‌ی مدل‌هایی برای سوخت هسته‌ای از مقیاس اتمی (محاسبات تابعیت چگالی، دینامیک مولکولی) به سمت مقیاس مزو (محاسبات نظریه سینتیک مونت کارلو، میدان فاز، نظریه سرعت) و از آن طریق به سمت مقیاس ماکروسکوپی (محاسبات مهندسی) است. این گستره از لحاظ ابعاد، از چندین آنگستروم (مقیاس اتمی) شروع شده و با گذر از مقیاس میکرو (مزو) در نهایت به مقیاس چندین سانتی‌متر (مقیاس ماکرو) می‌رسد. به لحاظ زمانی، این محدوده از حد پیکوثانیه تا چند ماه و یا چند سال گسترده می‌شود.

بدین ترتیب می‌توان بیان کرد که رویکرد شبیه‌سازی چند مقیاسی به جای به‌کارگیری داده‌های پرهزینه تجربی، با به‌کارگیری دانش بنیادی از خواص مواد، ابزاری قدرتمند جهت تحلیل پدیده‌هایی پیچیده که سوخت تحت تابش با آن درگیر است، ایجاد می‌کند.

در حال حاضر برای این منظور کدهای عملکرد سوخت بسیاری با دیدگاه چندمقیاسی توسط گروه‌ها و کشورهای مختلف با توجه به نوع رآکتور مورد استفاده در حال توسعه می‌باشد. این کدها معمولاً پدیده‌های ترموهیدرولیکی و ترمومکانیکی که مرتبط با دما، فشار و تنش وارده بر قرص سوخت و نیز غلاف تحت تابش می‌باشد، را مورد بررسی قرار می‌دهند [۱-۳]. در بین پدیده‌های درگیر با سوخت هسته‌ای تحت تابش، پدیده رهائش گازهای حاصل از شکافت به همراه تورم ناشی از آن را می‌توان به عنوان یک عامل بسیار مهم و

تأثیرگذار بر عملکرد و طول عمر سوخت در نظر گرفت. به همین دلیل، شبیه‌سازی رفتار گازهای ناشی از شکافت سوخت یک جنبه حیاتی برای کدهای عملکرد سوخت محسوب می‌شود. به جهت مدل کردن فرایند رهائش و تورم گازی در میله‌های سوخت، معمولاً دو دیدگاه در کدهای عملکرد سوخت استفاده می‌شود [۴-۶]:

۱. مدل همبسته- تجربی<sup>۱</sup>؛ این نوع مدل معمولاً از طریق برازش مستقیم یک رابطه با داده‌های ماکروسکوپی (داده‌های تجربی) از قبیل دما، فشار، مصرف سوخت و غیره حاصل می‌شود.  
۲. معادلات فیزیک- پایه<sup>۲</sup>؛ در این دیدگاه تلاش می‌شود که پدیده قابل وقوع در سوخت با استفاده از رابطه‌های استخراج شده از فیزیک و مکانیسم میکروسکوپی حاکم بر آن پدیده (مانند انواع نقص‌های شبکه، نفوذ گاز در شبکه‌ی بلور سوخت، دانه‌بندی و باز تبلور سوخت و غیره) توضیح داده شود.

برای تبیین و مدل‌سازی در دیدگاه همبسته- تجربی معمولاً به پایگاه داده‌های تجربی نیاز است، در صورتی که در دیدگاه فیزیک- پایه داده‌های حاصل از محاسبات مقیاس‌های اتمی می‌تواند جایگزین داده‌های تجربی شود. مدل‌های فیزیک- پایه نسبت به مدل‌های همبسته تجربی برای استفاده در کدهای عملکرد سوخت دارای مزیت‌ها و نقاط ضعفی می‌باشند که در هر مورد باید با توجه به نوع عملکرد و کاربرد مورد نیاز، در نظر گرفته شود. به طور کلی می‌توان گفت که مدل‌های همبسته- تجربی نسبت به مدل‌های فیزیک- پایه، دارای معادلاتی با پیچیدگی کم‌تر، الگوریتم‌های حل ساده‌تر و نیاز به زمان محاسبات کم‌تر می‌باشد. این مدل‌ها در کل دارای تطابق بسیار بالایی با داده‌های تجربی (در محدوده‌ای که داده تجربی برای آن فراهم شده است) می‌باشند. اما از طرف دیگر این مدل‌ها محدود به یک نوع سوخت معین و شرایط کاری مشخص هستند. هم‌چنین مهم‌ترین و بزرگ‌ترین مانع در به‌کارگیری این مدل‌ها، نیاز به تهیه داده‌های پرهزینه تجربی برای پیاده‌سازی و صحت‌سنجی آن‌ها می‌باشد. در مقابل مدل‌های فیزیک- پایه غالباً مدل‌هایی هستند که پیاده‌سازی آن‌ها نیاز به الگوریتم‌های حل پیچیده‌تری دارد. از مزیت‌های این مدل‌ها، آن است که تا حدودی مستقل از نوع ماده و شرایط کاری بوده، می‌توانند با اندکی اصلاح برای سوخت‌های مختلف با خواص مشابه و نزدیک مورد استفاده قرار گیرند. هم‌چنین این مدل‌ها معمولاً برای نواحی که داده‌های تجربی موجود نیست، به میزان بسیار بالایی کاربرد دارند. یکی دیگر از مهم‌ترین کاربردهای مدل‌های مبتنی بر فیزیک- پایه این است که می‌توان آن‌ها را برای ایجاد اتصال

1. Correlation Base

2. Physics Base



## ۲. بررسی مدل مورد نظر برای بررسی فرایند رهایش گاز

### ۱.۲ مقدمه

کد مورد استفاده در این تحقیق که برای بررسی مکانیسم‌های حاکم بر پدیده رهایش گاز حاصل از شکافت و استفاده آن‌ها در کدهای مهندسی صورت گرفته است، بر مبنای دو هدف اصلی پیاده‌سازی شده است:

۱. این کد امکان بررسی پدیده رهایش گازهای حاصل از شکافت به همراه تورم ناشی از حباب‌ها را با ایجاد ارتباط بین مقیاس‌های پایین (مقیاس اتمی) و مقیاس‌های بالا (مزو و ماکرو) امکان‌پذیر کرده است. لذا با توجه به توضیحات داده شده، استفاده از مدل‌های فیزیک- پایه در این کد به مدل‌های همبسته- تجربی دارای اولویت بیش‌تری می‌باشد.
  ۲. از آن‌جا که در بحث عملکرد رآکتورهای هسته‌ای، با یک سری از پدیده‌های به هم وابسته مواجه هستیم، کد توسعه یافته به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند هم به طور مستقل فرایندهای مورد نظر را مدل‌سازی کرده، و هم به عنوان بخشی از یک کد مادر عملکرد سوخت، به سایر کدهای محاسباتی به عنوان یک زیرروال اضافه شود. این نکته بسیار حایز اهمیت است زیرا در این صورت می‌توان خروجی کد مذکور را که اساساً میزان تورم و رهایش گاز در میله سوخت می‌باشد، به عنوان ورودی، در کدهای عملکرد سوخت که وابسته به این کمیت‌ها می‌باشند، وارد کرد.
- برای شبیه‌سازی عملکرد سوخت در رآکتورهای هسته‌ای، باید این نکته را مورد توجه قرار داد که ما با یک سری پدیده‌های مرتبط با یک‌دیگر در رآکتور مواجه هستیم. به عبارت دیگر شبیه‌سازی صحیح یک پدیده بدون در نظر گرفتن و تأثیر سایر پدیده‌های حاکم بر سوخت، امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین از لحظه برخورد نوترون به سوخت مورد نظر تا تشکیل محصولات شکافت و نیز نحوه تکامل میکروساختارها در سوخت، تمام پدیده‌ها باید مورد بررسی قرار بگیرند. به این ترتیب کد مورد نظر شامل زیرروال‌های مختلفی است که هر یک از آن‌ها وظیفه بررسی و پردازش یکی از این پدیده‌های فیزیکی را به‌عهده دارند.

مهم‌ترین و اصلی‌ترین پدیده‌های مورد بررسی در کد مورد نظر شامل:

۱. میزان تشکیل گازهای حاصل از شکافت
۲. بررسی تشکیل حباب‌های درون‌دانه‌ای که خود شامل فرایندهای زیر است:
  - الف) فرایند هسته‌زایی و تشکیل حباب‌ها
  - ب) فرایند به دام انداختن اتم‌های گازی و رشد حباب‌های درون‌دانه‌ای

بین داده‌های به‌دست آمده از مقیاس‌های مختلف محاسبات (اتمی تا ماکرو) مورد استفاده قرار داد. به همین دلیل در نسل جدید از کدهای عملکرد سوخت تلاش شده است که از مدل‌های فیزیک- پایه به جای مدل‌های همبسته- تجربی استفاده شود. تاکنون کدهای بسیاری با بهره‌گیری از این مدل‌ها توسعه یافته‌اند. برای مثال، مدل رهایش گاز [۷] SIFGRS مورد استفاده در کد [۸، ۹] BISON، مدل [۱۰] FISPRO۲ مورد استفاده در [۱۱] TRANSURANUS، مدل [۱۲] CARACAS برای [۱۳] ALCYONE، مدل [۱۴] GRSW-A برای FALCON و مدل MFPR برای [۱۵] SFPR و [۱۶] BERKUT را می‌توان نام برد.

طی چند دهه گذشته، به عنوان یک نقشه راه برای رسیدن به طراحی کامل رآکتورهای هسته‌ای با استفاده از شبیه‌سازی چندمقیاسی، دیدگاهی شکل گرفته است که با ترکیب مدل‌های فیزیکی مختلف در یک برنامه واحد، هم‌زمان چندین پدیده فیزیکی را شبیه‌سازی می‌کنند. اساسی‌ترین جنبه مدل‌سازی و شبیه‌سازی رآکتورهای هسته‌ای پیش‌بینی رفتار نوترون‌های آزاد است که توسط معادله ترابرد بولتزمن توصیف می‌شود. با این وجود، مهم است که برای انجام یک شبیه‌سازی دقیق فیزیکی از یک رآکتور، بسیاری از پدیده‌های فیزیکی دیگر مانند مصرف سوخت، رفتار شیمیایی سوخت، رفتار حرارتی سیال، هدایت حرارتی جامد و مکانیک ساختاری و غیره مورد بررسی قرار گیرد [۱۷-۱۹]. بنابراین مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک رآکتور هسته‌ای به تجزیه و تحلیل چند فیزیکی نیاز دارد. روش سنتی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی رآکتور هسته‌ای، توسعه برنامه‌هایی برای مدل‌سازی هر یک از حوزه‌های فیزیکی مربوطه به طور جداگانه می‌باشد. این امر به طور کلی نیاز به استفاده از نوعی محافظه‌کاری در محاسبات دارد تا محدودیت‌های موجود در درستی مدل و رفتار تقریبی ناشی از بازخوردها را به حساب آورد. در حال حاضر، کار در چندین مؤسسه برای کوپل کردن معادله ترابرد نوترون، مصرف سوخت و عملکرد سوخت (به عنوان مثال ترمومکانیک سوخت و پدیده‌های مختلف مرتبط) در حال انجام است. از جمله می‌توان به کوپل کدهای Rattlesnake و BISON از طریق [۹] MAMMDTH و نرم‌افزار VERA<sup>۱</sup> است که توسط کنسرسیوم DOE برای شبیه‌سازی پیشرفته رآکتورهای آب سبک، توسعه داده شده است [۲۰].

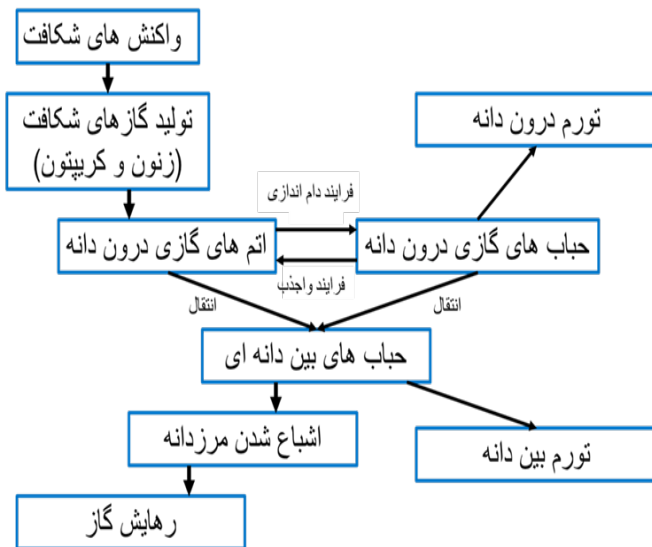
### 1. Virtual Environment for Reactor Applications

مجله علوم و فنون هسته‌ای

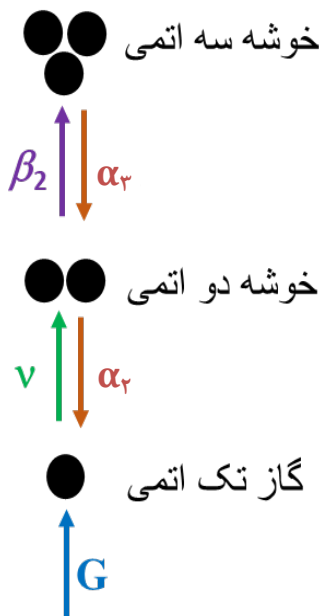
جلد ۱۰۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۲۸-۴۰



۱. فرایند گیراندازی اتم‌های منفرد گازی حاصل از شکافت در جهت تشکیل خوشه‌های (حباب‌های) گازی.
  ۲. فرایند هسته‌زایی در جهت رشد خوشه‌های گازی
  ۳. فرایند انحلال مجدد اتم‌ها از خوشه‌های گازی و بازگشت به درون ماتریس سوخت،
  ۴. در نهایت نفوذ اتم‌های گازی پخشی از درون‌دانه به سمت مرزدانه می‌باشد.
- فرایندهای گیراندازی، هسته‌زایی و انحلال مجدد در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیکی از پدیده‌های مورد بررسی توسط مدل مورد نظر.



شکل ۲. تشکیل خوشه‌های (حباب‌های) گازی درون‌دانه‌ای در فرایند هسته‌زایی ( $v$ )، دام‌اندازی ( $\beta$ ) و انحلال مجدد ( $\alpha$ ).

- ج) فرایند انحلال مجدد اتم‌های گازی از حباب‌های درون‌دانه‌ای به درون ماتریس سوخت
  - د) انتقال حباب‌های گازی و اتم‌های منفرد به سمت مرزهای دانه
  - ه) تورم ناشی تشکیل حباب‌های درون‌دانه‌ای
۳. بررسی تشکیل حباب‌های بین‌دانه‌ای که خود شامل فرایندهای زیر است:
    - الف) تغییرات غلظت حباب‌های بین‌دانه‌ای
    - ب) تغییرات شعاع و حجم حباب‌های بین‌دانه‌ای
    - ج) تغییرات تورم ناشی از فرایند تشکیل حباب‌های بین‌دانه‌ای
    - د) اشباع حباب‌های گازی در مرزدانه و فرایند رهایش گاز
  ۴. بررسی تغییرات، رشد و تبلور مجدد دانه‌بندی‌های سوخت که هم بر انتقال گازهای درون‌دانه به مرزدانه تأثیرگذار است و هم بر فرایند رهایش گاز.
- در این بخش مدل‌های فیزیک- پایه مورد استفاده در کد برای تحلیل رهایش گاز به طور مختصر توضیح داده می‌شود. لازم به ذکر است که جزئیات این مدل‌ها به تفصیل در مقالات توضیح داده شده است [۲۱، ۲۲]. لازم به ذکر است که معادلات فوق گازهای دو اتمی حاصل از شکافت  $I_2$  را شامل نمی‌شود. همچنین شماتیکی از پدیده‌های مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است.

## ۲.۲ مدل رفتار گازهای شکافت درون‌دانه‌ای

مدل‌سازی رفتار گازهای شکافت در درون‌دانه، اولین و یک از اصلی‌ترین مدل‌های مورد نیاز برای تحلیل تورم و رهایش گازهای شکافت از میله سوخت در کدهای عملکرد سوخت می‌باشد. دو نتیجه مهم و اصلی مدل درون‌دانه‌ای، انتقال گازهای پخشی از درون‌دانه به سمت مرزدانه و نیز تورم ناشی از حباب‌ها درون‌دانه‌ای می‌باشد. تورم ناشی از حباب‌های درون‌دانه‌ای، به چگالی تعداد و نیز اندازه متوسط حباب‌های درون‌دانه‌ای بستگی دارد. تشکیل و توزیع اندازه‌ی حباب‌های درون‌دانه‌ای در حین فرایند مصرف سوخت را می‌توان با استفاده از دیدگاه دینامیک خوشه‌ای انجام داد. با این وجود، روش‌های مدل‌سازی دقیق بر مبنای دینامیک خوشه‌ای از نظر محاسباتی هزینه بالایی دارند و معمولاً مدل‌های با پیچیدگی کم‌تر، برای کاربرد در کدهای مهندسی تحلیل عملکرد سوخت استفاده می‌شوند. بنابراین، مدل مورد استفاده در این تحقیق مشابه فرمول‌بندی دینامیک خوشه‌ای می‌باشد، با این تفاوت که در جهت پیاده‌سازی مدل فوق، تنها توزیع متوسط اندازه خوشه‌ها در نظر گرفته شده است. این مدل بر اساس پدیده‌هایی مانند:



مطابق بسط تیلور می‌توان در روابط فوق تقریب‌های  $\alpha_n \approx \alpha(\bar{n})$  و نیز  $\beta_n \approx \beta(\bar{n})$  می‌تواند اعمال شود. برای ضریب انحلال مجدد  $(\alpha(\bar{n}))$ ، که از رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید بسط تیلور به صورت زیر می‌باشد:

$$\alpha_n = \alpha_{\bar{n}} + \left[ \frac{d\alpha_n}{dn} \right]_{\bar{n}} (n - \bar{n}) + o(n) \approx \alpha_{\bar{n}} \left( 1 + \frac{\gamma}{\beta} \frac{B_{\bar{n}}^{-\gamma, \tau} - B_{\bar{n}}^{-1, \tau}}{B_{\bar{n}}^{-1, \tau} + R_{ff}} \right) = \alpha_{\bar{n}} \phi_{n, \bar{n}} \approx \alpha_{\bar{n}} \quad (6)$$

که در این رابطه تعاریف  $R_n = B_n^{1/\tau}$ ;  $B = (\gamma\Omega / \epsilon\pi)^{1/\tau}$  استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین  $R_n$  شعاع حباب‌های درون‌دانه‌ای و  $\Omega$  حجم اتم‌گازی در حباب است [۲۳]. همچنین رابطه مشابهی برای ضریب گیراندازی گازی تعریف به صورت زیر می‌شود:

$$\beta_n = \beta_{\bar{n}} + \left[ \frac{d\beta_n}{dn} \right]_{\bar{n}} (n - \bar{n}) + o(n) \approx \beta_{\bar{n}} \left( \frac{\gamma}{\beta} + \frac{1}{\beta} \frac{n}{\bar{n}} \right) = \beta_{\bar{n}} \psi_{n, \bar{n}} \approx \beta_{\bar{n}} \quad (7)$$

در نهایت برای حالت‌هایی که در آن توزیع مقادیر میانگین نزدیک به پیک توزیع باشد، دو ضریب  $\phi_{n, \bar{n}}$  و  $\psi_{n, \bar{n}}$  با تقریب بسیار خوبی یک خواهند بود. با استفاده از تقریب‌های فوق و بسط تیلور دستگاه معادلات ۵ به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial t} = \nu - \alpha_{\bar{n}} N \\ \frac{\partial c_n}{\partial t} = D \nabla^2 c_n - \beta_{\bar{n}} N + \alpha_{\bar{n}} m + G - \gamma \nu \\ \frac{\partial m}{\partial t} = \gamma \nu + \beta_{\bar{n}} N - \alpha_{\bar{n}} m \end{cases} \quad (8)$$

یک رویکرد به اصطلاح شبه‌ثابت در این تحقیق در نظر گرفته شده است، و آن این‌که، گیراندازی اتم‌های گاز و انحلال مجدد در تعادل در نظر گرفته می‌شوند. دستگاه معادلات دیفرانسیلی ۸ که بر اساس ترم‌های تولید و نابودی می‌باشد، در نهایت به صورت دو معادله دیفرانسیلی زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial}{\partial t} (c_n + m) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} D \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (c_n + m) + y \dot{F} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} N_{ig} = \nu - \alpha N_{ig} \quad (10)$$

با فرض این‌که خوشه‌های گازی (حباب‌ها) متشکل از دو یا چند اتم گاز هستند، غلظت کل حباب‌ها  $N_{ig}$  و میانگین توزیع اندازه‌ی آن‌ها  $\bar{n}_{ig}$  و نیز تعداد اتم‌های گازی درون خوشه‌های گازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$N_{ig} = \sum_{n=\gamma}^{\infty} c_n \quad (1)$$

$$\bar{n}_{ig} = \frac{\sum_{n=\gamma}^{\infty} n c_n}{N} \quad (2)$$

$$m = \bar{n} N = \sum_{n=\gamma}^{\infty} n c_n \quad (3)$$

در این روابط  $c_n$  بیانگر غلظت اتم‌های تکی گاز موجود در ماتریس سوخت ( $n=1$ ) و نیز غلظت خوشه‌های چند اتمی ( $n \geq 2$ ) می‌باشد. در معادلات دینامیک خوشه‌ای در نظر گرفته شده به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{cases} \frac{\partial c_1}{\partial t} = D \nabla^2 c_1 + G - \gamma \nu - \sum_{n=\gamma}^{\infty} \beta_n c_n + \sum_{n=\gamma}^{\infty} \alpha_n c_n \\ \frac{\partial c_n}{\partial t} = D_n \nabla^2 c_n + \nu - (\beta_n + \alpha_n) c_n + \alpha_n c_{n-1} \\ \vdots \\ \frac{\partial c_n}{\partial t} = D_n \nabla^2 c_n + \beta_{n-1} c_{n-1} - (\beta_n + \alpha_n) c_n + \alpha_{n+1} c_{n+1} \end{cases} \quad (4)$$

در این روابط  $(\alpha_n (s^{-1}))$  احتمال انحلال مجدد اتم‌گازی از یک خوشه حاوی  $n$  اتم در واحد زمان به ماتریس سوخت است که به ماتریس سوخت وارد می‌شود.  $\beta_n (s^{-1})$  احتمال (در ثانیه) که یک اتم توسط یک خوشه حاوی  $n$  اتم گیراندازی شود، ضریب نفوذ اتم‌های تکی و نیز خوشه‌های چند اتمی،  $\nu_n (at m^{-\tau} s^{-1})$ ، نرخ هسته‌زایی گازهای شکافت برای تشکیل خوشه‌های چندتایی، و در نهایت  $G (at m^{-\tau} s^{-1})$  نرخ تولید اتم‌های گازی حاصل از شکافت سوخت هسته‌ای به صورت حاصل ضرب نرخ شکافت ( $\dot{F}$ ) در بهره شکافت گاز ( $y$ )، حساب می‌شود.

با قرار دادن معادلات ۱ تا ۳ در دسته معادله ۴، دستگاه معادلات دیفرانسیلی زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial t} = \nu - \sum_{n=\gamma}^{\infty} \alpha_n c_n \\ \frac{\partial m}{\partial t} = \gamma \nu + \sum_{n=\gamma}^{\infty} \beta_n c_n - \sum_{n=\gamma}^{\infty} n \alpha_n c_n \\ \frac{\partial c_n}{\partial t} = D \nabla^2 c_n + y \dot{F} - \gamma \nu - \sum_{n=\gamma}^{\infty} \beta_n c_n + \sum_{n=\gamma}^{\infty} n \alpha_n c_n \end{cases} \quad (5)$$



برای انتقال گازهای شکافت از درون دانه به مرز دانه، ضریب نفوذ  $D$  برای سوخت مورد نظر نیاز است، این ضرایب نفوذ از روابط ۱۵ به دست می‌آیند [۲۷]:

$$\begin{cases} D(T, F) = D_1 + D_r + D_f \\ D_1 = 7.6 \times 10^{-11} \exp(-4.86 \times 10^{-19} / k_B T) \\ D_r = 4.82 \times 10^{-25} \sqrt{F} \exp(-1.91 \times 10^{-19} / k_B T) \\ D_f = 2.7 \times 10^{-27} F \end{cases} \quad (15)$$

که در این معادله  $\dot{F}$  (fiss  $m^{-2} s^{-1}$ ) نرخ شکافت،  $T(K)$  دما و  $k_B$  (JK<sup>-1</sup>) ثابت بولتزمن است. در مدل فوق فرض می‌شود که حباب‌های درون دانه‌های کروی هستند، در این صورت  $R_{ig}$  (شعاع حباب) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_{ig} = \left( \frac{3}{4} \pi V_{ig} \right)^{1/3} \quad (16)$$

در این رابطه  $V_{ig}$  حجم حباب درون دانه‌ای است. حجم حباب‌های گازی نیز حاصل جمع دو عبارت به صورت زیر است که در آن عبارت اول سهم اتم‌های گازی شکافت و عبارت دوم سهم نقص‌های شبکه در حجم کل حباب می‌باشد.

$$V_{ig} = \Omega n_{ig} + \omega n_v \quad (17)$$

در این رابطه نیز  $\Omega$  و  $\omega$  به ترتیب حجم واندروالس اتم گازی (در این تحقیق حجم اتم‌های زنون و کریبتون) و نقص‌های درون شبکه بلور می‌باشند. با یک تقریب می‌توان از عبارت دوم برای حباب‌های درون شبکه صرف نظر کرد. هم‌چنین  $n_{ig}$  به صورت نسبت تعداد اتم‌های موجود در حباب به تعداد کل حباب‌ها تعریف می‌شود:

$$n_{ig} = \frac{m}{N_{ig}} \quad (18)$$

در این صورت با جایگزینی معادله ۱۸ در معادله ۱۶ داریم:

$$R_{ig} = \left( \frac{3\Omega m}{4\pi N_{ig}} \right)^{1/3} \quad (19)$$

در نهایت با ترکیب کردن معادلات ۱۹ و ۱۶ تورم ناشی از تشکیل حباب‌های درون دانه‌ای به صورت رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\left( \frac{\Delta V}{V} \right)_{ig} = \frac{4}{3} \pi N_{ig} R_{ig}^3 \quad (20)$$

که در معادله ۹،  $D$  ضریب نفوذ گاز تک اتمی،  $c_1$  غلظت گاز در ماتریس سوخت،  $m$  غلظت گاز در حباب‌های درون دانه‌ای و مجموع  $(m + c_1)$  نیز غلظت کل گاز درون دانه‌ای می‌باشد. هم‌چنین  $D_{eff}$  به عنوان ضریب نفوذ مؤثر به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$D_{eff} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} D \quad (11)$$

در معادله ۱۰،  $N_{ig}$  غلظت حباب‌های درون دانه‌ای می‌باشد. از حل معادله دیفرانسیلی ۹، تغییرات غلظت گازهای شکافت از معادله ۱۰، تغییرات غلظت حباب‌ها در درون دانه به دست می‌آیند. برای حل این معادلات دیفرانسیلی، الگوریتم‌های حل متفاوتی وجود دارد. براساس معادله ۱۰، نرخ تولید خوشه‌های گازی (حباب‌ها) درون دانه‌ای متناسب با ضریب هسته‌زایی و نرخ از بین رفتن حباب‌ها با ضریب انحلال مجدد متناسب است. از طرف دیگر، تغییرات گازهای موجود در ماتریس سوخت نیز به ضریب نفوذ مؤثر (میزان انتقال گازهای اتمی به سمت مرز دانه) و نیز نرخ تولید در اثر فرایند شکافت هسته‌ای بستگی دارد. برای نرخ انحلال مجدد در معادلات فوق، تعریف‌های متفاوتی تاکنون ارائه شده است، که پرکاربردترین آن‌ها برای سوخت غیرفلزی  $UO_2$  به صورت زیر تعریف شده است [۲۴]:

$$\begin{cases} \alpha(R_{ig}, \dot{F}) = 2\pi\mu_{eff} (R_{ig} + R_{ff})^2 \dot{F} \\ \mu_{eff} = 6.7 \times 10^{-6} \text{ (m)}, \\ R_{ff} = 1.7 \times 10^{-9} \text{ (m)}, \end{cases} \quad (12)$$

در این معادله  $\mu_{eff}$  و  $R_{ff}$  نیز به ترتیب طول متوسط و شعاع متوسط مسیر تکه‌های شکافت می‌باشند.  $R_{ig}$  نیز شعاع حباب درون دانه‌ای است. هم‌چنین پرکاربردترین روابط برای ضرایب گیراندازی و هسته‌زایی به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۵]:

$$\begin{cases} \beta(D, R_{ig}, N_{ig}) = 4\pi D (R_{ig} + R_{sg}) N_{ig} \\ R_{sg} = 5 \times 10^{-10} \text{ (m)} \end{cases} \quad (13)$$

$R_{sg}$  شعاع یک اتم گازی در شبکه می‌باشد [۲۶].

$$\begin{cases} v(\dot{F}) = 2\eta \dot{F} \\ \eta = 25 \text{ (bub ff}^{-1}) \end{cases} \quad (14)$$

در این معادله  $\eta$  کسر حباب‌های تولید شده به ازای هر پاره شکافت می‌باشد. همان‌طور که در معادله ۹ مشخص است،





در نتیجه تصویر این حباب‌ها بر روی وجه‌های دانه ( $A_{gf}$ ) کروی می‌باشد. هم‌چنین در فرایند رشد حباب‌ها علاوه بر در نظر گرفتن سهم اتم‌های گازی، سهم نقص‌های شبکه نیز در تشکیل حباب‌های مرزدانه در نظر گرفته می‌شود.

۴. حباب‌های بین‌دانه‌ای علاوه بر فرایند رشد به دلیل گیراندازی اتم‌های گازی رسیده از درون دانه، امکان اتصال حباب‌های کوچک‌تر در مرزدانه و تشکیل حباب‌هایی با شعاع بزرگ‌تر را نیز دارند. به این ترتیب با اتصال حباب‌های بین‌دانه‌ای، اندازه متوسط این حباب‌ها افزایش پیدا کرده در حالی که غلظت آن‌ها کاهش می‌یابد.

تورم ناشی از تشکیل حباب‌های مرزدانه از معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{gf} = \frac{3}{a} \frac{4\pi}{3} N_{gf} R_{gf}^3 \quad (22)$$

$R_{gf}$  شعاع،  $N_{gf}$  غلظت حباب‌ها در وجه‌های دانه و در نهایت  $a$  اندازه متوسط دانه‌های سوخت می‌باشد. شعاع حباب‌های مرزدانه از معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{gf} = \left(\frac{3V_{gf}}{4\pi\phi(\theta)}\right)^{1/3} \quad (23)$$

$V_{gf}$  حجم حباب‌های مرزدانه می‌باشد. هم‌چنین  $\phi(\theta)$  نیز فاکتور هندسی مربوط به حباب‌های عدسی نسبت به حباب‌های کروی شکل است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi(\theta) = 1 - 1.5 \cos(\theta) + 0.5 \cos^3(\theta) \quad (24)$$

$\theta$  زاویه دوجهی حباب‌های مرزدانه می‌باشد. حجم حباب‌های مرزدانه نیز از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$V_{gf} = \Omega n_{gf} + \omega n_v \quad (25)$$

که  $\Omega$  و  $\omega$  به ترتیب حجم واندرالس اتم گازی (در این‌جا زنون و کریپتون) و نقص‌های درون شبکه بلور می‌باشد.  $n_{gf}$  نسبت گازهای اتمی نسبت به کل حباب‌های روی وجه‌دانه‌ها می‌باشد که از معادله زیر به دست می‌آید:

$$n_{gf} = \frac{q}{N_{gf}} \frac{a}{3} \quad (26)$$

هم‌چنین  $n_v$  به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۸]:

$$\frac{dn_{gf}}{dt} = \left(\frac{1}{n_{gf}}\right) \left(-\frac{3q}{N_{gf} \times a} \times \frac{2\pi D_{gb}^v \delta_{gb}}{\Omega S} + \frac{2\pi D_{gb}^v \delta_{gb}}{k_b T S} \left(\frac{2\gamma}{R_{gf}} - \sigma_h\right)\right) \quad (27)$$

معادلات توصیف شده در این بخش، رفتار گازهای بی‌اثری مانند کریپتون و زنون را که حاصل از شکافت هسته‌ای می‌باشند، برای محیط درون‌دانه‌های سوخت مدل‌سازی می‌کند. با حل این معادلات چگالی تعداد حباب‌ها ( $N_{ig} (\text{bub } m^{-3})$ )، غلظت گازهای درون حباب ( $m (\text{at } m^{-3})$ )، غلظت حباب‌های درون ماتریس سوخت ( $c (\text{at } m^{-3})$ )، شعاع حباب‌ها ( $R_{ig} (m)$ )، و از همه مهم‌تر درصد تورم ناشی از تشکیل حباب‌های درون‌دانه‌ای ( $(\Delta V/V)_{ig} (\%)$ ) به دست می‌آید. برای حل این مجموعه معادلات، الگوریتم‌های متعددی پیاده‌سازی شده است. در این تحقیق برای تحلیل عملکرد گازهای بی‌اثر از یک الگوریتم. حل که ترکیبی از روش‌های حل عددی و تحلیلی است، و با دقت بالایی، زمان محاسبات را تا حد قابل قبول کاهش می‌دهد، استفاده شده است.

### ۳.۲ رفتار گاز بین‌دانه‌ای

در این مرحله مدل مورد استفاده برای بررسی رفتار گازهای حاصل از شکافت سوخت در مرزهای دانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل مورد استفاده در این کد به عنوان مدل اصلی در برخی از کدهای عملکرد سوخت مانند BISON و TRANSURANUS نیز پیاده‌سازی شده است. بعد از فرایند شکافت هسته‌ای و تشکیل حباب‌های درون‌دانه‌ای، گازهای اتمی به سمت مرزهای دانه حرکت کرده و تشکیل حباب بین‌دانه‌ای می‌دهند. بنابراین تشکیل حباب‌ها روی مرزدانه به نرخ شار اتم‌های گازی که از درون دانه به مرزدانه می‌رسند، بستگی دارد که از معادله‌ی زیر به دست می‌آید [۲۲]:

$$\frac{\partial}{\partial t} q = - \left[ \frac{3}{a} \frac{\alpha}{\alpha + \beta} D \frac{\partial}{\partial r} (c_1 + m) \right]_{r=a} - R \quad (21)$$

در این معادله  $\alpha$  اندازه (شعاع) متوسط دانه‌های سوخت،  $R$  میزان گاز رها شده از مرزدانه و  $q$  نرخ اتم‌های پخشی رسیده به مرزدانه از درون دانه می‌باشد. برای حل معادله‌ی فوق چندین فرض در نظر گرفته می‌شود:

۱. کل غلظت گازهای رسیده از درون دانه به مرزدانه، در تشکیل حباب‌های گازی بین‌دانه‌ای شرکت می‌کنند. یا به عبارت دیگر، اتم‌های گازی که به مرزدانه می‌رسند مستقیماً در فرایند هسته‌زایی شرکت می‌کنند.
۲. نرخ گیراندازی اتم‌های گازی در مرز دانه بسیار بالاتر از نرخ انحلال مجدد آن‌ها بوده و در نتیجه از انحلال مجدد و بازگشت اتم‌های گازی به ماتریس سوخت (یا درون‌دانه) صرف‌نظر می‌شود.
۳. فرض می‌شود که حباب‌های درون‌دانه‌ای عدسی شکل بوده،



یکی دیگر از مهم‌ترین پدیده‌های مؤثر در فرایند رهایش گاز، میکروتورک‌های ایجاد شده در مرزدانه‌ها به ویژه در شرایط گذرا می‌باشد. در شرایط غیرپایا (حالت گذرا) به علت ایجاد تنش، ترک‌هایی در سوخت ایجاد شده که مسیریابی برای رهایش گاز ایجاد می‌کند. این میکروتورک‌ها در نهایت می‌تواند بر روی  $F_{gf}$  تأثیر بگذارد، لذا تغییرات این میکروتورک‌ها برای بررسی فرایند رهایش گاز در حالت گذرا بسیار مهم است. این فرایند در کار بعدی که در آن فرایندهای گذرا بررسی خواهند شد، به تفصیل توضیح داده می‌شود.

### ۱.۳.۲ تغییرات ریزساختارها (رشد دانه و باز تبلور دانه‌ها)

فرایند رشد دانه‌ها در سوخت یکی از مهم‌ترین پدیده‌هایی است که مستقیماً بر فرایند رهایش گاز تأثیر می‌گذارد. فرایند رشد بلورها در دو مورد بر فرایند رهایش گاز تأثیر دارد: (۱) تغییرات اندازه دانه‌ی سوخت باعث تغییر در فرایند نفوذ گاز از درون به مرزدانه می‌شود (۲) تغییر اندازه دانه‌ها مستقیماً بر تورم ناشی از تشکیل حباب‌های گازی در مرزدانه‌ها تأثیر می‌گذارد. لذا بررسی این پدیده در جهت مطالعه فرایند رهایش گاز یک امر حیاتی است. مدل استفاده در کد عملکرد سوخت در این مقاله، یک مدل نیمه-تجربی است که به شکل زیر تعریف می‌شود [۲۹]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{da}{dt} = \frac{1}{4} M \left( \frac{1}{a} - \frac{g(bu)}{a_m} \right) \\ M = 1.46 \times 10^{-4} \exp(-32114.5/T) \\ a_m = 2.23 \times 10^{-7} \exp(-7620/T) \\ g(bu) = 1 + 0.02 \times bu \end{array} \right. \quad (33)$$

که در این معادله  $M$  ضریب جابه‌جایی مرزهای دانه،  $a$  اندازه متوسط دانه‌ها،  $a_m$  حد آستانه اندازه دانه‌ها در دمای  $T$  است و  $g(bu)$  یک تابع نیمه‌تجربی براساس مصرف سوخت می‌باشد. معادله فوق برای نرخ مصرف‌های پایین سوخت و در عملکرد عادی راکتور کارایی دارد. اما در نرخ مصرف‌های بالای سوخت (دمای پایین) علاوه بر رشد طبیعی دانه‌های سوخت، یک فرایند باز تبلور دانه نیز اتفاق می‌افتد که عملاً اندازه دانه‌ها را تغییر می‌دهد. این فرایند نیز در آینده‌ای نزدیک در مدل‌های مربوط به ساختارهای مصرف بالای سوخت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. لازم به ذکر است که رابطه‌ی بین برناب و زمان به شکل زیر است:

$$\frac{d(bu)}{dt} = \frac{\dot{F} \times E_F}{\rho} (1.6 \times 10^{-6} M \times 24h / d \times 3600s / h) \quad (34)$$

در این معادله  $k_b$  ثابت بولتزمن،  $T$  دما،  $\gamma$  انرژی ویژه سطح،  $\sigma_{H_2}$  تنش هیدرواستاتیکی،  $q$  شار اتم‌های رسیده از درون دانه به مرز دانه،  $D_{gb}^v$  ضریب نفوذ نقص‌ها در مرزدانه،  $\delta_{gb}$  ضخامت لایه نفوذ در مرزدانه،  $S$  یک ضریب وابسته به پوشش سطحی مرزدانه می‌باشد که از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$S = -0.25 \left[ (3 - F_{gf}) \times (1 - F_{gf}) + 2 \times \log(F_{gf}) \right] \quad (28)$$

تغییرات اندازه و تعداد حباب‌ها در وجه‌دانه‌ها، دو فاکتور تأثیرگذار در فرایند رهایش گاز از سطح سوخت می‌باشد.  $D_{gb}^v$  ضریب نفوذ نقایص به درون حباب‌های بین‌دانه‌ای می‌باشد [۲۷]:

$$D_{gb}^v = 6.9 \times 10^{-4} \exp(-3.88 \times 10^4 / T) \quad (29)$$

در این صورت کمیتی به نام سطح پوشش نسبی وجه‌های دانه ( $F_{gf}$ ) تعریف می‌شود که به صورت حاصل ضرب سطح تصویر حباب ( $A_{gf}$ ) روی مرزدانه‌ها در غلظت حباب‌های ( $N_{gf}$ ) بین‌دانه‌ای تعریف می‌شود:

$$F_{gf} = N_{gf} A_{gf} \quad (30)$$

هم‌چنین برای کمیت  $F_{gf}$  یک حد آستانه به نام حد اشباع پوشش نسبی وجه‌های دانه  $F_{gf,sat}$  تعریف می‌شود که بعد از رسیدن به این مقدار، فرایند رهایش گاز از سطح سوخت آغاز می‌شود. این مقدار حدی به پدیده‌های مختلفی از جمله تغییرات اندازه و غلظت حباب‌های وجه‌دانه بستگی دارد. در نهایت غلظت اتم‌هایی که در فرایند رهایش از مرزدانه خارج می‌شوند از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R = G - q - (c_1 + m) \quad (31)$$

که  $(c_1 + m)$  غلظت گاز درون‌دانه‌ای،  $q$  غلظت گاز در مرزدانه و  $G$  غلظت کل گازهای تولید شده حاصل از شکافت می‌باشد که از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{dG}{dt} = y \times \dot{F} \quad (32)$$

با استفاده از روابط ارائه شده در این قسمت رفتار تشکیل حباب‌های گازی روی وجه‌های دانه (شامل غلظت حباب‌ها، سطح پوشش نسبی وجه‌های دانه، تورم ناشی از این حباب‌های مرزدانه) به همراه فرایند رهایش گاز از مرزدانه‌ها محاسبه می‌شود.

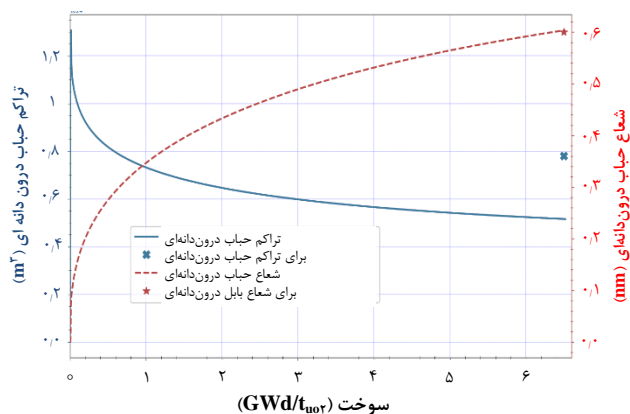




حجم می‌رسد. این افزایش اولیه تعداد حباب‌ها حاصل از فرایند هسته‌زایی می‌باشد که نرخ آن با استفاده از معادله ۱ کنترل می‌شود. با افزایش مصرف سوخت، غلظت حباب‌های درون‌دانه‌ای به دلیل فرایند انحلال مجدد که از معادله ۱۲ پیروی می‌کند، کاسته می‌شود. این فرایند انحلال مجدد به پدیده‌ای مختلفی از جمله گرادیان دما اطراف حباب، برخورد محصولات شکافت، نوترون و اشعه‌های پرنرژی به حباب، بستگی دارد که مهم‌ترین آن‌ها برخورد محصولات شکافت پرنرژی است. تغییرات غلظت حباب‌های درون‌دانه‌ای از معادله ۹ و ۱۰ پیروی می‌کنند، بنابراین با افزایش مصرف سوخت و با در نظر گرفتن حال حدی  $dN/dt \rightarrow 0$  معادله ۱۰ به سمت  $N_{ig} \rightarrow v/\alpha \approx \eta / [\Sigma \mu_{ff} (R_{ig} + R_{ff})^2]$  میل می‌کند. در سمت راست این رابطه تنها  $R_{ig}$  یعنی شعاع حباب‌های درون‌دانه‌ای به عنوان یک متغیر وابسته به زمان (مصرف سوخت) وجود دارد. با گذشت زمان و افزایش مصرف سوخت و نیز فرایند گیراندازی گازهای شکافت (با نرخ مطابقت معادله ۷)، اندازه و شعاع حباب‌های درون‌دانه‌ای نیز افزایش می‌یابد. به این ترتیب با افزایش شعاع حباب‌های درون‌دانه‌ای مطابق معادله ۲۰، غلظت این حباب‌ها نیز کاهش می‌یابد.

جدول ۱. برخی پارامترهای مورد استفاده در مدل رهایش گاز در مقیاس مزو

دانشیه ی سوخت	$1.0970 \text{ kg/m}^3$
میزان مصرف سوخت	$6.5 \text{ GWd tU}^{-1}$
دمای سوخت	$1300 \text{ K}$
نرخ شکافت	$1 \times 10^{19} \text{ fission m}^{-3}\text{s}^{-1}$
اندازه شعاع اولیه دانه	$5.0 \text{ }\mu\text{m}$
اندازه شعاع نهایی دانه	$6.22 \text{ }\mu\text{m}$
ثابت شکافت زنون ( $Y_{Xe}$ )	$0.27$
ثابت شکافت کریپتون ( $Y_{Kr}$ )	$0.3$
حد اشباع پوشش نسبی وجه‌های دانه $F_{gf,sat}$	$0.5$
حجم واندروالس اتم گازی ( $\Omega$ )	$4.4581 \times 10^{-29} \text{ m}^3$



شکل ۳. تغییرات چگالی تعداد و شعاع حباب‌های درون‌دانه با مصرف سوخت. داده‌های تجربی مشخص شده در شکل فوق، برای مصرف سوخت  $6.5 \text{ MWd/tU}_{02}$  می‌باشد.

که در این رابطه  $\dot{F}$  نرخ شکافت برحسب  $\text{fission/m}^3\text{s}$ ،  $E_F$  انرژی شکافت،  $(312 \times 10^{-13} \text{ J/fission})$ ،  $\rho$  ( $1.0970 \text{ Kg/m}^3$ ) چگالی سوخت می‌باشد.

### ۳. ورودی کد مورد نظر

کد ارایه شده امکان بررسی سوخت از لحظه صفر (مصرف سوخت صفر) را دارا می‌باشد. برای اجرا و حل معادلات توضیح داده شده در بخش قبل، نیاز به داده‌های اولیه می‌باشد. داده‌های مورد نیاز را می‌توان به کلی به سه دسته اصلی تقسیم کرد. (۱) داده‌های مربوط به کارکرد راکتور در حالت ایستا، (۲) داده‌های اولیه مربوط به خواص سوخت مورد استفاده در راکتور (۳) مقادیر کمی مورد استفاده در مدل‌های درون‌دانه و بین‌دانه‌ای. مهم‌ترین پارامترهای مورد نیاز برای کارکرد راکتور، نرخ شکافت، دمای راکتور در مصرف سوخت مورد نظر و نیز زمان کارکرد راکتور است. از مهم‌ترین پارامترهای اولیه مربوط به سوخت، چگالی اولیه سوخت و اندازه متوسط دانه‌های سوخت قبل از تحت تابش قرار گرفتن، می‌باشد. اما از مهم‌ترین پارامترهای مورد نیاز برای حل معادلات فوق می‌توان به ضرایب انحلال مجدد، گیراندازی گازها، هسته‌زایی، ضرایب نفوذ، حجم واندروالس گاز، حجم واندروالس نقص‌ها، ضخامت لایه نفوذ، و انرژی ویژه سطح اشاره کرد.

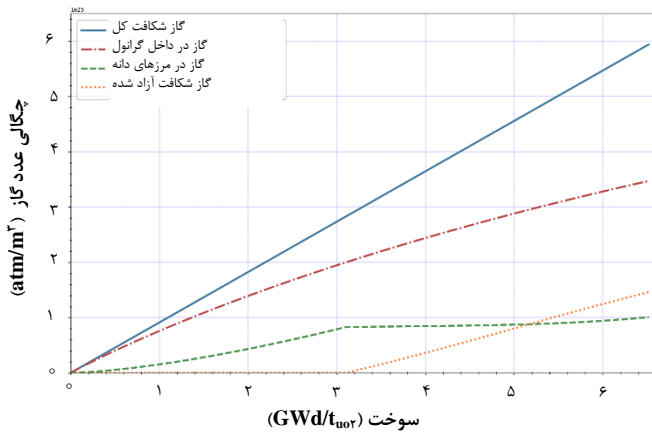
### ۴. نتایج حاصله از کد مورد نظر

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، کد توسعه داده شده، توانایی تحلیل رفتارهای گاز شکافت شامل تورم و رهایش گاز از سطح سوخت برای شرایط ایستا و گذرا را دارا می‌باشد. برای بررسی نتایج حاصل از کد توسعه داده شده، در این قسمت شبیه‌سازی یکی از نمونه‌های تحقیقاتی سوخت در شرایط پایا [۲۶] را برای اعتبارسنجی نتایج خود کد مورد نظر انتخاب کردیم. در نمونه مورد نظر، داده‌های مورد نیاز از جمله غلظت و اندازه شعاع حباب درون‌دانه‌ای با استفاده از میکروسکوپ الکترونی تجزیه و تحلیل شده است. برای شرایط پایا، کد برای یک نمونه تحت تابش تا  $5.500$  ساعت با نرخ شکافت ثابت  $1 \times 10^{19} \text{ fission m}^{-3}\text{s}^{-1}$  (که معادل  $2 \times 10^{26} \text{ fission m}^{-3}$  و  $6.5 \text{ GWd tU}_{02}$  است) و در دمای ثابت  $1300 \text{ K}$  و بدون تنش هیدرواستاتیکی تنظیم شده است.

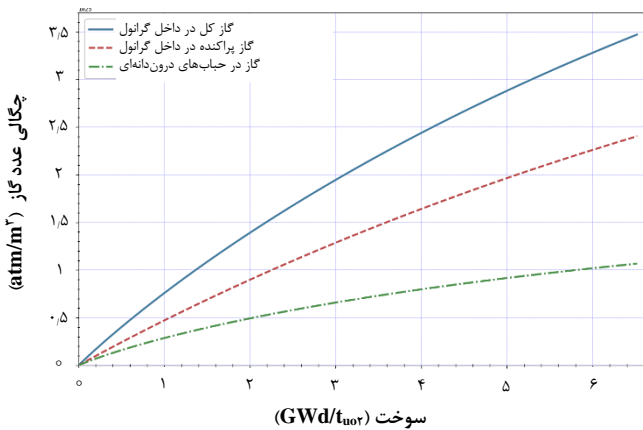
در شکل ۳، روند تغییرات چگالی تعداد و نیز شعاع حباب‌های درون‌دانه‌ای با مصرف سوخت رسم شده و با نتیجه تجربی به دست آمده از کار بکر و همکارانش [۲۶] در مصرف سوخت  $6.5 \text{ MWd/tU}_{02}$  مقایسه شده است که از تطابق خوبی برخوردار است. همان‌گونه که در شکل فوق مشخص است، در ابتدای تابش، غلظت حباب‌های درون‌دانه‌ای به صورت حدی افزایش می‌یابد و به مقدار ماکزیمم  $1.3 \times 10^{24}$  حباب بر واحد



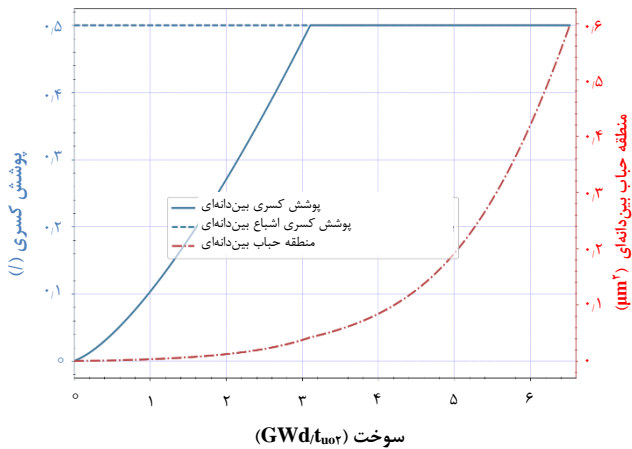
کاهش غلظت حباب‌های بین‌دانه‌ای با افزایش شعاع و تصویر این حباب‌ها بر روی مرزدانه جبران شده و در نهایت با افزایش کمیت می‌شود.



شکل ۴. تغییرات گازهای حاصل از شکافت (Xe, Kr)، گازهای درون‌دانه، بین‌دانه و نیز گازهای رها شده از مرزدانه با تغییرات مصرف سوخت.



شکل ۵. تغییرات گازهای حاصل از شکافت درون‌دانه شامل گازهای موجود در حباب‌ها ماتریس سوخت و نیز مجموع گازهای درون‌دانه‌ای.



شکل ۶. تغییرات سطح پوششی نسبی و تصویر حباب‌های گازی روی مرزدانه با تغییرات مصرف سوخت.

اما در شکل ۴ تغییرات غلظت اتم‌های گازی شامل تغییرات غلظت کل گازهای شکافت تولید شده در سوخت، سهم غلظت گازهای درون‌دانه‌ای (شامل گازهای درون ماتریس سوخت و نیز گازهای موجود در حباب‌های درون‌دانه‌ای) و سهم غلظت گازهای مرزدانه حاصل از شار اتم‌های درون‌دانه‌ای به سمت مرزدانه، و میزان رهایش گاز حاصل از شکافت برحسب میزان مصرف سوخت نشان داده شده است. مطابق این شکل تولید گازهای شکافت به صورت خطی با افزایش مصرف سوخت، افزایش می‌یابد که از معادله‌های ۹ و ۲۱ به دست می‌آید. افزایش غلظت گازهای درون‌دانه‌ای در مصرف پایین سوخت و تا  $0.5 \text{ GWd/tUO}_2$  خطی و سپس با افزایش انتقال گازهای درون‌دانه‌ای به مرزدانه از حالت خطی خارج می‌شود. غلظت کل گازهای بین‌دانه‌ای نیز تا مصرف سوخت حدود  $3.1 \text{ GWd/tUO}_2$  به طور تقریباً خطی افزایش می‌یابد اما بعد از این مقدار تقریباً ثابت می‌شود. مصرف سوخت با مقدار  $3.1 \text{ GWd/tUO}_2$  نقطه‌ای است که در آن فرایند رهایش گاز از مرزدانه اتفاق می‌افتد و این پدیده غلظت حباب‌های مرزدانه را حدودی ثابت باقی نگه می‌دارد.

شکل ۵ نیز تغییرات سهم گازهای درون ماتریس سوخت و گازهای موجود در حباب‌های درون‌دانه‌ای را به طور مجزا نشان می‌دهد که هر دوی این موارد با افزایش مصرف سوخت، افزایش می‌یابند. افزایش تعداد گازهای حباب‌های درون‌دانه‌ای باعث افزایش شعاع این حباب‌ها خواهد شد.

برای آغاز رهایش گاز ابتدا باید غلظت حباب‌های بین‌دانه‌ای به یک حد اشباع برسد. مقدار حد اشباع در این جا  $F_{gf} = N_{gf} A_{gf} = F_{gf, sat} = 0.5$  تغییرات. مصرف سوخت نیز در شکل ۶ آورده شده است که نشان می‌دهد این کمیت با افزایش مصرف سوخت افزایش یافته و در مصرف سوخت  $3.1 \text{ GWd/tUO}_2$  دقیقاً در نقطه‌ای که رهایش گاز اتفاق می‌افتد (شکل ۶). به مقدار آستانه  $F_{gf, sat} = 0.5$  رسیده و از آن به بعد ثابت باقی‌مانده است.

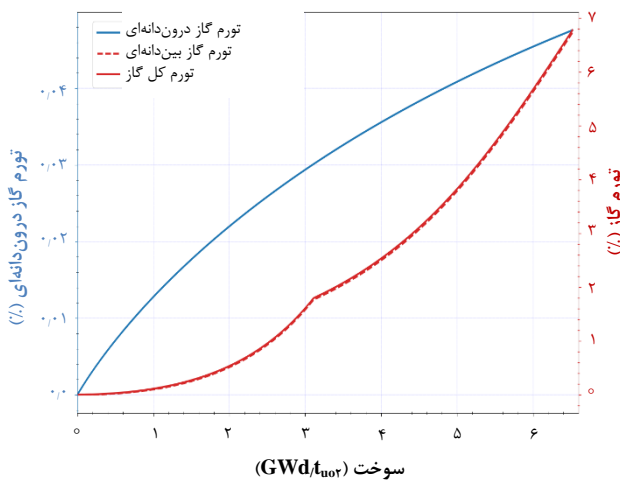
در شکل ۷ تغییرات تعداد اتم‌های رسیده از درون دانه به مرزدانه و نیز نقص‌های مرزدانه به ازای تعداد حباب‌ها، نشان داده شده است که برای هر دو مورد افزایش خواهد بود. اما تغییرات غلظت حباب‌های بین‌دانه‌ای که در شکل ۸ آورده شده است نشان می‌دهد که حتی با افزایش تعداد گازهای مرزدانه، غلظت حباب‌های بین‌دانه‌ای با افزایش مصرف سوخت کاهش می‌یابد. این کاهش به دو دلیل اتفاق می‌افتد، ابتدا به دلیل فرایند اتصال حباب‌های تشکیل شده در در مرزدانه که باعث افزایش شعاع و نیز تصویر سطح حباب‌ها بر روی مرزدانه خواهد شد، و دوم به دلیل فرایند رهایش گاز از سوخت می‌باشد.



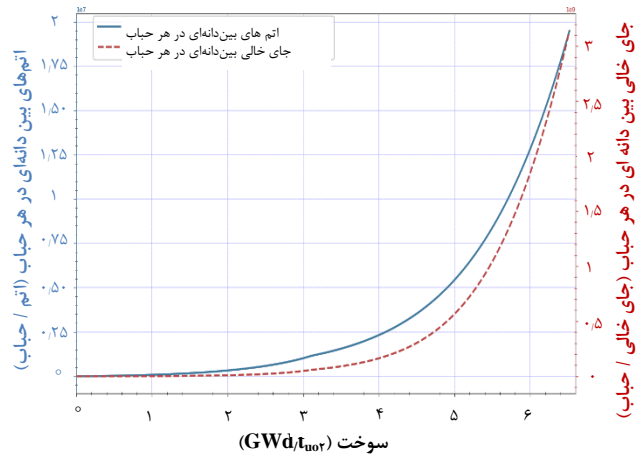
صرف‌نظر کردن می‌باشد. همچنین در این نمودار یک شکستگی و تغییر رفتار تورم کل سوخت در مصرف سوخت  $3.1 \text{ GWD/t}_{\text{UO}_2}$  مشاهده می‌شود که به دلیل آغاز فرایند رهایش گاز از مرزدانه می‌باشد.

هم‌چنین برای بررسی اثر دما بر روی نتایج به‌دست آمده از کد مورد نظر، در جدول ۲ تغییرات شعاع، چگالی تعداد و نیز تورم ناشی از حباب‌های درون‌دانه در دماهای مختلف از ۱۲۷۳ تا ۲۰۷۳ درجه کلون محاسبه شده است. این نتایج هم‌چنین با کار حاصل از کار تجربی [۱۱] مقایسه شده است.

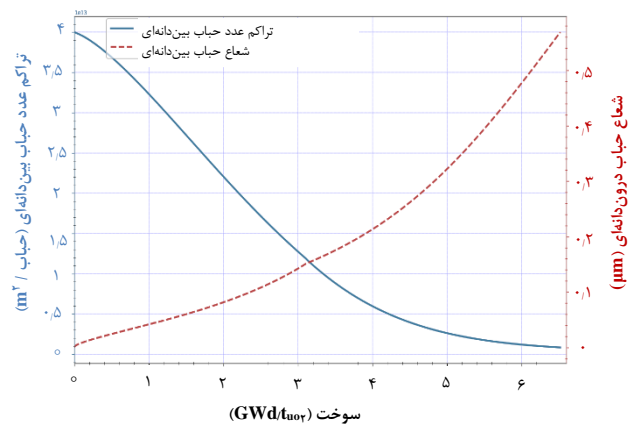
در جدول ۳ تغییرات چند پارامتر مهم با تغییر اندازه‌ی شعاع دانه آورده شده است. طبق این جدول، با افزایش شعاع دانه‌ی سوخت از ۴ میکرون تا ۶ میکرون، چگالی تعداد گازهای درون‌دانه‌ی افزایش یافته است که این نشان می‌دهد با افزایش حجم دانه، ظرفیت آن برای نگهداشتن گازهای حاصل از شکافت درون‌دانه نیز افزایش می‌یابد. این موضوع باعث کاهش نرخ گازهای رسیده به مرزدانه و در نتیجه کاهش درصد رهایش گاز به سمت مرزدانه باعث کاهش چگالی تعداد حباب‌های بین‌دانه‌ای شده که در نهایت باعث کاهش درصد تورم نسبی می‌شود. بنابراین افزایش شعاع دانه‌ی سوخت در نهایت باعث کاهش فرایند رهایش گاز و نیز تورم می‌شود. لازم به ذکر است تحقیقات امروزی نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌هایی مانند کروم و مگنز باعث افزایش شعاع دانه‌بندی سوخت اورانیم دی‌اکساید شده و در نهایت باعث افزایش بازدهی سوخت در رآکتورهای قدرت می‌شود.



شکل ۹. تغییرات تورم ناشی از حباب‌های درون‌دانه‌ای، حباب‌های بین‌دانه‌ای و نیز تورم کل دانه با مصرف سوخت.



شکل ۷. تغییرات تعداد اتم‌ها و نیز تعداد نقص مرزدانه به ازای حباب‌های تشکیل شده به تغییرات مصرف سوخت.



شکل ۸. تغییرات غلظت و شعاع حباب‌های بین‌دانه‌ای با تغییرات مصرف سوخت.

فرایند تورم سوخت ناشی از تشکیل حباب‌های گازی نیز حاصل جمع تورم گازی ناشی از حباب‌های درون‌دانه‌ای و حباب‌های بین‌دانه‌ای می‌باشد که در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق این شکل، تورم ناشی از حباب‌های گازی با افزایش مصرف سوخت نیز افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش شعاع و حجم حباب‌های درون و بین‌دانه‌ای است. اما به طور کلی سهم اصلی در تورم کل ناشی از گازهای شکافت مربوط به سهم حباب‌های مرزدانه‌ای می‌باشد و سهم حباب‌های درون‌دانه‌ای بسیار کم‌تر است. دلیل این امر این است که اساساً حباب‌های مرزدانه تا چندین میکرون رشد کرده در حالی که حباب‌های درون‌دانه تنها در حدود چند آنگستروم رشد می‌کنند. شعاع کوچک حباب‌های درون‌دانه‌ای نسبت به حباب‌های بین‌دانه‌ای به علت فرایند انحلال مجدد می‌باشد که درون‌دانه به علت وجود پاره‌های شکافت پرنرژی چندین برابر مرزدانه اتفاق می‌افتد به‌طوری‌که فرایند انحلال مجدد در مرزدانه بسیار کند و قابل



**جدول ۲.** مقایسه تغییرات اندازه (شعاع)، چگالی تعداد و نیز تورن ناشی از حباب‌های درون‌دانه در دماهای مختلف با داده‌ای تجربی به‌دست آمده از مرجع [۱۱]

T(K)	$(\Delta V/V)_{ig}$	EXP	خطای نسبی (%)	$R_{ig}$ (nm)	EXP	خطای نسبی (%)	$N_{ig} \times 10^{23}$ (bub m <sup>-3</sup> )	EXP	خطای نسبی (%)
۱۲۷۳	۰٫۰۳	۰٫۰۶	۵۰٫۰	۰٫۵۲	۰٫۵۵	۵٫۵	۵٫۸	۸٫۷	۳۳٫۳
۱۳۷۳	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۲۸٫۶	۰٫۶۱	۰٫۶	-۱٫۷	۵٫۲	۷٫۸	۳۳٫۳
۱۴۷۳	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۱۲٫۵	۰٫۷	۰٫۶۵	-۷٫۷	۴٫۶	۷	۳۴٫۳
۱۵۷۳	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۰٫۰	۰٫۸۳	۰٫۷	-۱۸٫۶	۴	۶٫۴	۳۷٫۵
۱۶۷۳	۰٫۱۳	۰٫۱۲	-۸٫۳	۰٫۹۷	۰٫۸	-۲۱٫۳	۳٫۴	۵٫۷	۴۰٫۴
۱۷۷۳	۰٫۱۶	۰٫۱۵	-۶٫۷	۱٫۱	۰٫۸۸	-۲۵٫۰	۳٫۱	۵٫۳	۴۱٫۵
۱۸۷۳	۰٫۱۸	۰٫۱۸	۰٫۰	۱٫۱۶	۰٫۹۸	-۱۸٫۴	۲٫۹	۴٫۸	۳۹٫۶
۱۹۷۳	۰٫۲	۰٫۲۴	۱۶٫۷	۱٫۲۱	۱٫۱	-۱۰٫۰	۲٫۷	۴٫۴	۳۸٫۶
۲۰۷۳	۰٫۲۱	۰٫۳۱	۳۲٫۳	۱٫۲۴	۱٫۲۵	۰٫۸	۲٫۶	۳٫۸	۳۱٫۶

**جدول ۳.** وابستگی برخی از پارامترهای مدل مورد نظر از جمله میزان تجمع گاز درون‌دانه‌ای، چگالی تعداد حباب‌های بین‌دانه‌ای، درصد تورن کل و درصد رهایش گاز به اندازه‌ی شعاع دانه‌بندی سوخت

شعاع دانه‌بندی سوخت	چگالی تعداد گاز درون‌دانه‌ای	چگالی تعداد حباب بین دانه‌ای	درصد تورن نسبی کل	درصد رهایش گاز
$r(\mu\text{m})$	$m+c$ (atm/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{25}$	$N_{gb}$ (bubble/m <sup>3</sup> ) $\times 10^{11}$	$(\Delta V/V)_{total}$	
۴٫۰	۳٫۰۷۴	۹٫۱۴	۷٫۶۷	۲۸٫۴۹
۴٫۵	۳٫۲۸	۸٫۷۲	۷٫۱۲	۲۶٫۴۴
۵٫۰	۳٫۴۷	۸٫۳۸	۶٫۷۳	۲۴٫۵۹
۵٫۵	۳٫۶۴	۸٫۱۰	۶٫۳۱	۲۲٫۹۳
۶٫۰	۳٫۷۹	۷٫۸۶	۵٫۹۲	۲۱٫۴۴

**۵. نتیجه‌گیری**

آزمایی قرار گرفته است که در نهایت توافق خوبی حاصل شده است. هم‌چنین لازم به ذکر است گسترش کد مورد نظر برای فرسایش‌های بالای سوخت و نیز شرایط کار رآکتور در حالت گذرا در دست انجام است که به‌زودی ارائه خواهد شد. در نهایت سعی خواهد شد کد مورد نظر به عنوان یک زیرروال در کد عملکرد سوخت هسته‌ای FRPCon فراخوانی شود.

**مراجع**

1. P. Van Uffelen, et al, *Analysis of reactor fuel rod behavior*, **Handbook of Nuclear Engineering** (2010).
2. D. Olander, A. Motta, *Light Water Reactor Materials*, **American Nuclear Society Scientific Publications**, vol. 1, (2017).
3. P. Van Uffelen, et al, *A review of fuel performance modelling*, **Journal of Nuclear Materials**, 516 (2018).
4. K. Lassmann, *Transuranus: a fuel rod analysis code ready for use*, **Journal of Nuclear Materials**, 188, 295-302 (1992).
5. M. Cunningham, et al, *Fraptran: a computer code for the transient analysis of oxide fuel rods*, **Nuregicr-6739**, 1 (2001).

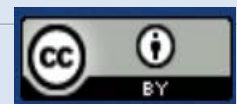
برای بررسی شبیه‌سازی چند مقیاسی سوخت هسته‌ای و در جهت ایجاد یک پل ارتباطی بین داده‌های میکروسکوپی از محاسبات مقیاس پایین (مقیاس اتمی) و محاسبات ماکروسکوپی، یک کد در جهت بررسی فرایند تورم و رهایش گاز حاصل از شکافت سوخت‌های هسته‌ای در مقیاس مزو توسعه داده شده است. این کد صفر بعدی بوده و با در نظر گرفتن ابعاد دانه سوخت قادر است به عنوان یک کد مستقل و یا به عنوان یک زیرروال در کدهای مدرن عملکرد سوخت هسته‌ای در مقیاس ماکرو مانند کد FRPCon فراخوانی شود. این کد که در آن از معادلات فیزیک- پایه به جای معادلات همبسته- تجربی استفاده شده است تا حد زیادی به نوع سوخت بستگی نداشته و در صورت کویل شدن با کدهای مقیاس اتمی جهت محاسبه‌ی پارامترهای مورد نیاز، می‌تواند برای سوخت‌هایی با خواص نزدیک به هم مانند  $UO_2$ ، UN،  $U_3Si_2$ ،  $U_3O_8$  و غیره مورد استفاده قرار بگیرد. این کد در جهت بررسی فرایند رهایش گازهای حاصل از شکافت (Xe و Kr) و تورم ناشی از ایجاد حباب‌های درون‌دانه‌ای و بین‌دانه‌ای در مصرف پایین سوخت مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج کد مورد نظر با نتایج تجربی موجود برای شرایط کار رآکتور در حالت ایستا مورد راستایی



6. H.S. Aybar, P. Ortego, *A review of nuclear fuel performance codes*, *Progress in Nuclear Energy*, **46**, 127-41 (2005).
7. G. Pastore, et al, *Uncertainty and sensitivity analysis of fission gas behavior in engineering-scale fuel modeling*, *Journal of Nuclear Materials*, **456**, 398-408 (2015).
8. J. Hales, et al., *BISON theory manual the equations behind nuclear fuel analysis*, *Idaho National Lab. (INL)*, Idaho Falls, ID (United States) (2016).
9. D.R. Gaston, et al., *Physics-based multiscale coupling for full core nuclear reactor simulation*, *Annals of Nuclear Energy*, **84**, 45-54 (2015).
10. P. Van Uffelen, et al, *Multiscale modelling for the fission gas behaviour in the Transuranus code*, *Nuclear Engineering and Technology*, **43**, 477-88 (2011).
11. K. Lassmann, C. Walker, J. Van de Laar, *Extension of the Transuranus burnup model to heavy water reactor conditions*, *Journal of Nuclear Materials*, **255**, 222-233 (1998).
12. G. Jomard, et al, Caracas, *An industrial model for the description of fission gas behavior in LWR-UO<sub>2</sub> fuel*, (2014).
13. B. Baurens, et al, *3D thermo-chemical-mechanical simulation of power ramps with Alcyone fuel code*, *Journal of Nuclear Materials*, **452**, 578-94 (2014).
14. G. Khvostov, *Models for numerical simulation of burst FGR in fuel rods under the conditions of RIA*, *Nuclear Engineering and Design*, **328**, 36-57 (2018).
15. M. Veshchunov, et al, *A new mechanistic code SFPR for modeling of single fuel rod performance under various regimes of LWR operation*, *Nuclear Engineering and Design*, **241**, 2822-30 (2011).
16. M. Veshchunov, et al., *Development of the advanced mechanistic fuel performance and safety code using the multi-scale approach*, *Nuclear Engineering and Design*, **295**, 116-126 (2015).
17. H.G. Joo, et al, *Methods and performance of a three-dimensional whole-core transport code DeCART*, (2004).
18. J. Cho, et al, *DeCART v1. 2 User's Manual*, (2007).
19. B.S. Collins, et al., *MPACT VERA Input User s Manual*, Version 2.2. 0, *Oak Ridge National Laboratory (ORNL)* (2016).
20. J.A. Turner, et al., *The virtual environment for reactor applications (VERA): design and architecture*, *Journal of Computational Physics*, **326**, 544-568 (2016).
21. G. Pastore, et al, *An effective numerical algorithm for intra-granular fission gas release during non-equilibrium trapping and resolution*, *Journal of Nuclear Materials*, **509**, 687-99 (2018).
22. D. Pizzocri, et al., *A model describing intra-granular fission gas behaviour in oxide fuel for advanced engineering tools*, *Journal of Nuclear Materials*, **502**, 323-330 (2018).
23. D.R. Olander, *Fundamental aspects of nuclear reactor fuel elements: solutions to problems*, *California Univ., Berkeley (USA). Dept. of Nuclear Engineering* (1976).
24. J. Turnbull, *The distribution of intragranular fission gas bubbles in UO<sub>2</sub> during irradiation*, *Journal of Nuclear Materials*, **38**, 203-212 (1971).
25. F.S. Ham, *Theory of diffusion-limited precipitation*, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **6**, 335-351 (1958).
26. C. Baker, *The fission gas bubble distribution in uranium dioxide from high temperature irradiated SGHWR fuel pins*, *Journal of Nuclear Materials*, **66**, 283-291 (1977).
27. D. Andersson, et al., *Atomistic modeling of intrinsic and radiation-enhanced fission gas (Xe) diffusion in UO<sub>2±x</sub>: Implications for nuclear fuel performance modeling*, *Journal of Nuclear Materials*, **451**, 225-242 (2014).
28. M. Speight, *Vacancy potential and void growth on grain boundaries*, (1975).
29. R. Singh, *Isothermal grain-growth kinetics in sintered UO<sub>2</sub> pellets*, *Journal of Nuclear Materials*, **64**, 174-178 (1977).

**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

مهدی عباسی، محمدهادی پرهمت، یاور تقی‌پور آذر، جواد کریمی ثابت (۱۴۰۱)، بررسی رفتار گازهای حاصل از شکافت در مقیاس مزو: کاربرد در شبیه‌سازی چندمقیاسی سوخت هسته‌ای، ۱۰۲، ۴۰-۲۸

DOI: 10.24200/nst.2022.1464

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1496.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1496.html)

