

## توصیف عملکرد میله‌ی سوخت رآکتورهای VVER-1000 در شرایط بهره برداری و بالاترین میزان مصرف سوخت

سعید طالبی\*

گروه انرژی، دانشکده‌ی مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۶/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۲/۱۷

**چکیده:** هدف این مقاله، توسعه‌ی یک مدل فیزیکی معتبر و در نتیجه یک روش عددی به منظور توصیف پدیده‌هایی است که درون میله‌ی سوخت رآکتور VVER-1000 در طول مدت‌زمان کارکرد آن به‌ویژه در شرایط میزان مصرف بالای سوخت رخ می‌دهد. عملکرد میله‌های سوخت به عامل‌های زیادی بستگی دارد؛ هر کدام از این عامل‌ها به‌صورت پیچیده‌ای بر عملکرد رآکتور در طی مدت بهره‌برداری تأثیر می‌گذارد. پیش‌بینی دقیق رفتار سوخت امری است ضروری و برای طراحان سوخت بسیار کارساز خواهد بود. به طور کلی رفتار سوخت متأثر از عامل‌های متنوع شیمیایی، مکانیکی و ترمونوترونیک است. برای ارزیابی دقیق عملکرد درست سوخت داخل رآکتور، باید عامل‌های پیش‌گفته و پدیده‌های حاکم بر آن‌ها به درستی مدل‌سازی شوند. در این مقاله، مدل‌های فیزیکی و رابطه‌های تجربی مورد استفاده به نحوی انتخاب شده‌اند که پارامترهای اصلی عملکردی حاصل از شبیه‌سازی میله‌ی سوخت، مطابقت خوبی با نتیجه‌های آزمایش‌های پس از پرتودهی و خروجی کد تحلیل عملکرد سوخت فراپکون-۳/۳ داشته باشند.

**کلیدواژه‌ها:** عملکرد میله‌ی سوخت، مدل فیزیکی، شبیه‌سازی، رآکتور VVER-1000، فراپکون

### **Describing VVER-1000 reactors fuel rod performance in the normal operation and high burn-up conditions**

S. Talebi\*

Engineering Group, Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology, P.O.Box: 15875-4413, Tehran - Iran

**Abstract:** The main purpose of the work is to develop a valid physical model and an accurate numerical technique to describe the occurred phenomenon of the VVER-1000 fuel rod, during its lifetime, especially for high burn up conditions. There are many factors involved in the fuel rod performance, which each of them, intricately affect its behavior during normal operation. The accurate prediction of the fuel behavior is obligatory and will be utilizable for the fuel designers. In general, fuel rod behavior is affected by the various chemical, mechanical, and thermo neutronic phenomena. For a detailed assessment of the fuel behavior inside the reactor core, the mentioned factors and the dominant aspects must be modeled accurately. The physical models and correlations used in this paper, are chosen in such a way that all the simulation results be in a good agreement with the available post-irradiation examination data (PIE) and outputs of the FRAPCON-3.3 fuel rod performance code.

**Keywords:** Fuel behavior, Physical model, Simulation, VVER-1000, Frapcon

\*Email: sa.talebi@aut.ac.ir

## ۱. مقدمه

در طراحی میله‌ی سوخت، هدف اصلی، اطمینان از رعایت ضابطه‌های ایمنی، طراحی و بهره‌برداری؛ تحت شرایط عادی و اضطراری کارکرد رآکتور است [۱]. از این رو برای تحلیل ساختاری میله‌ی سوخت نیاز به شبیه‌سازی عملکرد سوخت به‌منظور دست یافتن به پیش‌بینی توزیع دما و توصیف پدیده‌های پیچیده‌ی فیزیکی به وقوع پیوسته در میله‌ی سوخت پرتو دیده است تا پیش‌بینی نقص در عملکرد سوخت امکان‌پذیر شود.

با شروع به کار رآکتور، میله‌ی سوخت تحت تأثیر پدیده‌های فیزیکی و ساختاری صدمه‌های زیادی خواهد دید و افزایش میزان مصرف سوخت نیز باعث سرعت گرفتن این روند خواهد شد. از آنجایی که ترتیب دادن آزمایش‌هایی به‌منظور بررسی اثرهای پرتو بر میله‌ی سوخت هزینه‌ی گزافی دربر خواهد داشت، در اختیار داشتن یک روش تحلیلی به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد میله‌ی سوخت برای پیش‌بینی رفتارها و صدمه‌های احتمالی وارده بر سوخت و مواد ساختاری بسیار مهم خواهد بود. تنها کدهای کامپیوتری شبیه‌ساز معتبر قادر به ارایه‌ی توصیف دقیق از رفتار میله‌ی سوخت در حالت پایدار هستند. تاکنون کدهای متنوعی به منظور ارزیابی عملکرد پارامترهای طراحی میله‌ی سوخت توسعه داده شده‌اند. از این دست کدها می‌توان به کدهای فراپکون [۲]، ترانس اورانوس [۳] و استارت-۳ [۴] اشاره کرد.

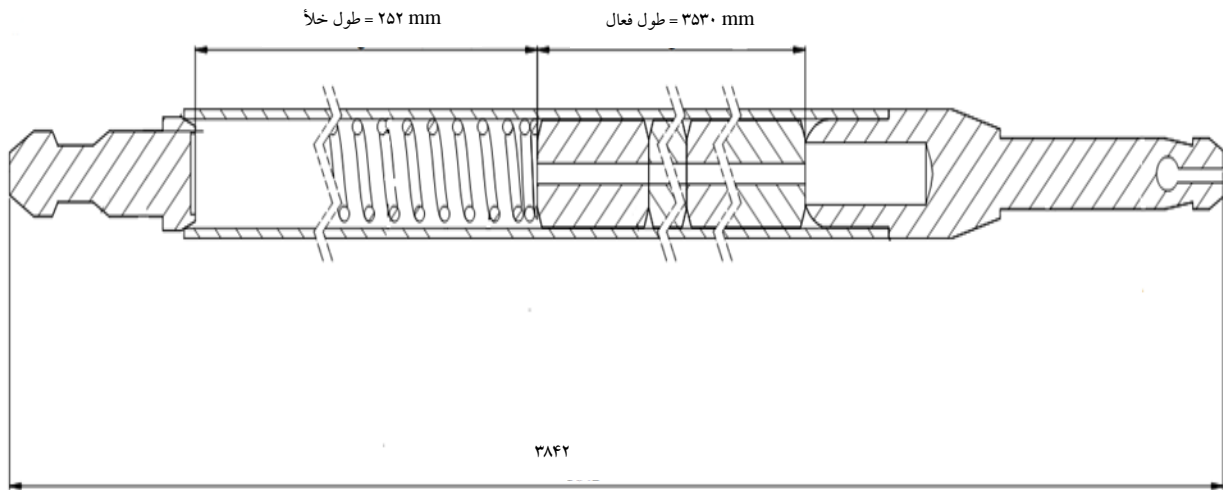
ضریب هدایت حرارتی در قرص سوخت ( $k_{fuel}$ ) و انتقال حرارت در فاصله‌ی بین قرص سوخت و غلاف ( $h_{gap}$ ) فرایند انتقال حرارت درون میله‌ی سوخت را کنترل می‌کنند و هر کاهشی در مقدارهای  $k_{fuel}$  و  $h_{gap}$  حداکثر دمای مرکز سوخت را در طی کارکرد رآکتور تغییر خواهد داد [۵]. تاکنون مطالعه‌های زیادی بر روی تأثیر این پارامترهای کنترلی بر رفتار میله‌ی سوخت انجام شده است. ترانی تأثیر هدایت حرارتی قرص سوخت بر پاسخ میله‌ی سوخت در حادثه‌ی از دست دادن خنک‌کننده را بررسی کرده است. هم‌چنین از دهه‌های گذشته تا به امروز پژوهش‌گران بسیاری برای ارایه‌ی یک مدل جامع به‌منظور مدل‌سازی ضریب انتقال حرارت در شکاف بین سوخت و غلاف متمرکز شده‌اند [۶-۸]. اکثر مدل‌های فیزیکی استفاده شده در کدهای معتبر هسته‌ای برای توصیف مجموعه فرایندهای حاکم بر ضریب انتقال فاصله‌ی بین سوخت و غلاف بر مبنای مدل‌های کلاسیک براگتون-مک دونالد [۶]، رس-استوت [۸]

و کسمن [۹] بنا شده‌اند و تنها تفاوت آن‌ها در تصحیح‌هایی است که براساس داده‌های تجربی به دست آمده از درون رآکتور، بر روی مدل‌های فوق انجام پذیرفته است. در مدل پیشنهادی رس-استوت اثر جابه‌جایی قطعه‌های قرص سوخت ترک‌خورده به سمت جداره‌ی داخلی غلاف بر ضریب انتقال حرارت فاصله‌ی سوخت-غلاف نادیده گرفته شده است. از سوی دیگر در مدل براگتون-مک دونالد از انتقال تابشی حرارت صرف‌نظر شده است. در مدل کسمن انتقال تماسی حرارت تنها زمانی که قرص و غلاف در تماس سخت با یک‌دیگر بوده باشند (فشار تماسی زیاد)، محاسبه می‌شود و از انتقال حرارت در حالت تماس نرم (فشار تماسی فاصله‌ی سوخت-غلاف برابر فشار گاز محبوس درون میله‌ی سوخت) صرف‌نظر شده است.

به طور خلاصه؛ شار نوترونی و چگالی قدرت، یک سیستم بسیار پیچیده از برهم‌کنش‌ها و پدیده‌های رقابتی را در میله‌ی سوخت پدید آورده‌اند که باعث تجدید ساختار شبکه‌ی بلوری قرص سوخت، رها شدن محصول‌های گازی حاصل از فرایند شکافت از قرص سوخت و افزایش فشار داخلی میله‌ی سوخت خواهد شد.

مقاله‌ی حاضر، یک مدل فیزیکی و هم‌چنین یک روش عددی برای پیش‌بینی عملکرد میله‌ی سوخت رآکتور VVER-۱۰۰۰ (شکل ۱) تحت شرایط کارکرد عادی و میزان مصرف بالای سوخت ارایه می‌دهد. با ارایه‌ی مدل‌های مناسب مورد استفاده در کدهای معتبر هسته‌ای نظیر ترانس اورانوس، استارت-۳، ریلپ-۵، فراکون-۳ برای پدیده‌های درگیر در انتقال حرارت سوخت، و هم‌چنین با ارایه‌ی یک روش عددی بهینه، توزیع دما در سوخت که پارامتر مهمی از منظر ایمنی است، توانسته است در طول کارکرد رآکتور (و به ویژه در بالاترین میزان مصرف سوخت) به دست آید. مقایسه‌ی نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل پیشنهادی با کد تحلیلی عملکرد میله‌ی سوخت فراپکون-۳/۳ [۱۰] و گزارش نهایی تحلیل ایمنی نیروگاه بوشهر<sup>۱</sup> [۱۱] (FSAR) نشان‌دهنده‌ی دقت بالای مدل پیشنهادی در پیش‌بینی پاسخ حرارتی میله‌ی سوخت VVER-۱۰۰۰ در طول مدت کارکرد در قلب رآکتور است.

این مقاله در راستای اهداف تحقیق و توسعه سازمان انرژی اتمی ایران در زمینه چرخه سوخت هسته‌ای می‌باشد.



شکل ۱. نمایی از میله‌ی سوخت VVER-۱۰۰۰.

مقاله از رهیافت عددی تفاضل محدود به منظور حل معادله‌های دیفرانسیل انتقال حرارت استفاده شده است. در شکل ۲ طرح‌واره‌ای از سطح مقطع عرضی میله‌ی سوخت رآکتورهای VVER و مش‌بندی مورد استفاده در حل عددی نشان داده شده است. شرایط مرزی برای حل معادله‌های حاکم بر توزیع دما در سوخت و غلاف این است

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_{fp,in}} = 0 \quad (۳)$$

$$-k_{fuel} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_{fp,out}} = h_{gap} [T_{fp,out} - T_{c,in}] \quad (۴)$$

$$-k_{clad} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_{c,in}} = h_{gap} [T_{fp,out} - T_{c,in}] \quad (۵)$$

$$-k_{clad} \left. \frac{\partial T_c}{\partial r} \right|_{r=R_{c,out}} = h_{fluid} \cdot [T_{c,out} - T_{fluid}] \quad (۶)$$

در رابطه‌های بالا  $R_{fp,in}$ ،  $R_{fp,out}$  و  $R_{c,in}$  به ترتیب شعاع‌های داخلی، خارجی قرص سوخت و غلاف است.  $h_{fluid}$  و  $h_{gap}$  به ترتیب ضریب انتقال حرارت فاصله‌ی سوخت-غلاف و سیال خنک‌کننده (برحسب  $W/m^2K$ ) است.

## ۲. مدل‌های فیزیکی

معادله‌های بنیادی حاکم بر رفتار میله‌ی سوخت پیچیده بوده و بدیهی است که راه‌حل تحلیلی برای آن‌ها ناممکن نیست و استفاده از رهیافت عددی اجتناب‌ناپذیر است. هم‌چنین برای داشتن یک تحلیل جامع از عملکرد میله‌ی سوخت برخی ساده‌سازی‌ها ضروری است که در زیر به آن‌ها اشاره شده است.

- در نظر گرفتن ساختار یکپارچه و مقارن برای میله‌ی سوخت؛
- نادیده انگاشتن انتقال حرارت در راستای محوری؛
- صرف نظر کردن از انتقال حرارت در راستای سمتی.

بنابراین توزیع دما در دو ناحیه‌ی قرص سوخت و غلاف در شرایط کارکرد عادی رآکتور از حل عددی معادله‌ی کلی انتقال حرارت در دستگاه مختصات استوانه‌ای و تنها در راستای شعاعی با استفاده از رابطه‌های زیر به دست خواهد آمد:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( K_{fuel}(T) \cdot r \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + q''' = 0 \quad (۱) \text{ سوخت}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( K_{clad}(T) \cdot r \frac{\partial T_c}{\partial x} \right) = 0 \quad (۲) \text{ غلاف}$$

در رابطه‌های بالا  $q'''$  منبع انرژی ناشی از فرایند شکافت در یکای حجم،  $k_{fuel}$  و  $K_{clad}$  به ترتیب ضریب هدایت گرمایی قرص سوخت و غلاف (برحسب  $W m^{-1}K^{-1}$ ) است. در این

## ۲.۲ رسانندگی گرمایی قرص سوخت

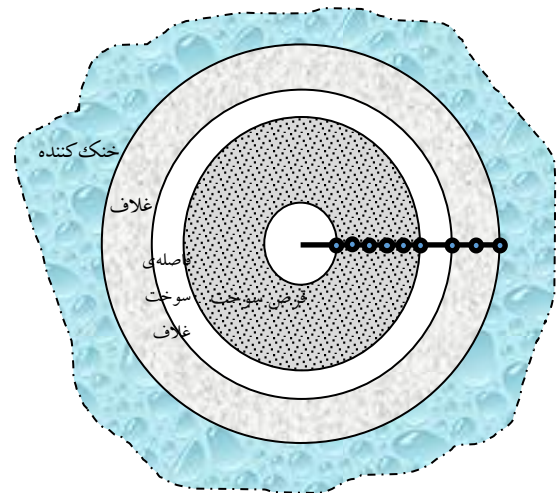
رسانندگی گرمایی قرص سوخت  $UO_2$  متأثر از تغییرات دما، میزان تخلخل قرص سوخت در هنگام فرایند ساخت، تجدید ساختار سوخت در طی پرتو دیدن، ترک‌های ایجاد شده در سطح قرص سوخت و تغییر ساختار شیمیایی سوخت است. در این مقاله از مدل پیشنهاد شده‌ی اهی‌را- ایتاگاکي [۱۴] که در آخرین نسخه‌ی کد تحلیل عملکردی سوخت فراپکون- ۴/۰ به دلیل در نظر گرفتن اثرهای پدیده‌های متنوع در محاسبه‌ی ضریب انتقال گرمایی قرص سوخت  $UO_2$  به کار گرفته می‌شود، استفاده شده است.

$$k_{fuel} = \left( \frac{1}{1 + 396 \exp\left(-\frac{6281}{T}\right)} \times \left( 0.0452 + 0.000246 \times T + 0.00117 \times Bu + (1 - 0.9(-0.4 \times Bu)) \times (0.038 \times Bu)^{0.75} \right) \right)^{-1} + \frac{3.5 \times 10^4}{T} \exp\left(-\frac{16661}{T}\right) \quad (7)$$

که در آن  $T$  دمای مطلق قرص سوخت و  $Bu$  میزان مصرف متوسط سوخت (برحسب  $MWd \text{ kg}^{-1}$ ) است. رابطه‌ی زیر به منظور تصحیح ضریب هدایت گرمایی برای بررسی تأثیر تخلخل پیشنهاد می‌شود [۱۶]:

$$k_{fuel-positivity} = 1.0785 \times k_{fuel} \times \left( \frac{d}{1.0 + 0.5 \times (1 - d)} \right) \quad (8)$$

که در آن  $d$  نسبت چگالی قرص سوخت دارای تخلخل به چگالی اسمی  $UO_2$  است. مقدارهای  $k_{fuel}$  در FSAR نیروگاه بوشهر، تنها تابعی از دما گزارش شده و از اثر مصرف سوخت که مهم‌ترین عامل در تغییر ضریب گرماسانندگی قرص سوخت به دلیل صدمه‌های وارده به ساختار بلوری توسط پرتوهای مخرب است، صرف نظر شده است. در شکل ۵ مقدارهای  $k_{fuel}$  پیش‌بینی شده توسط اهی‌را- ایتاگاکي و مقدارهای گزارش شده در FSAR در بازه‌ی دمایی عملکردی سوخت رآکتورهای آب سبک نشان داده شده است.

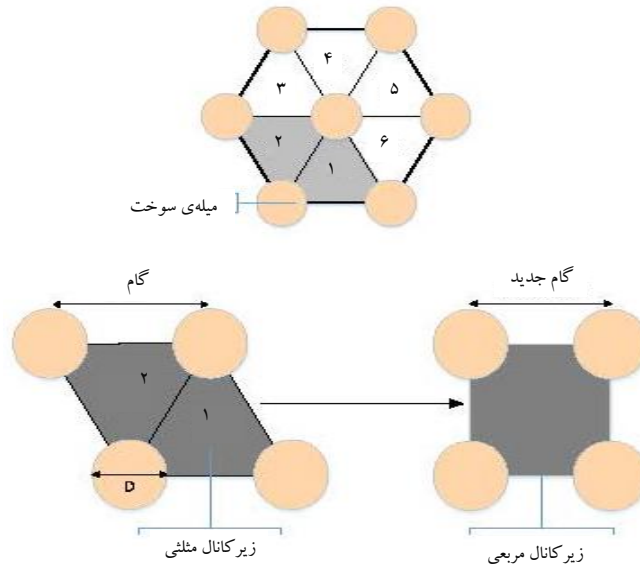


شکل ۲. مشبندی میله سوخت VVER در رهیافت حل عددی تفاضلی محدود.

## ۱.۲ دمای خنک کننده

یکی از تفاوت‌های رآکتورهای VVER و PWR در هندسه‌ی کانال‌های عبور سیال خنک کننده در مجتمع‌های سوخت است. رآکتورهای PWR دارای کانال‌هایی با آرایش مربعی هستند، در حالی که در رآکتورهای نوع VVER این آرایش مثلثی است. در آخرین نسخه‌ی کد تحلیل سوخت فراپکون نیز تنها عملکرد میله سوخت نیروگاه‌های LWR و HWR با مجتمع‌های سوخت با آرایش مربعی در نظر گرفته شده است [۱۲]. مطابق شکل ۳ با برابر قرار دادن قطر هیدرولیک معادل ( $D_e$ ) یک کانال مربعی مجتمع سوخت PWR با دو کانال مثلثی مجتمع سوخت VVER می‌توان از بعضی از نتایج کد فراپکون- ۳/۳ به منظور صحت‌سنجی مدل توسعه داده شده در این مقاله استفاده کرد. با استفاده از این رهیافت، فاصله‌ی بین مرکز تا مرکز دو میله سوخت (گام جدید) که یک پارامتر ورودی کد فراپکون است، محاسبه می‌شود.

چگالی متوسط قدرت خطی رآکتور بوشهر  $16.7 \text{ kW m}^{-1}$  و توزیع ضریب پیشینه‌ی قدرت<sup>۱</sup> برای مجتمع سوخت‌های مختلف، متفاوت است [۱۱]. در شکل ۴ تاریخچه‌ی قدرت بهره‌برداری فرضی در یک دوره کاری سه‌ساله نشان داده شده است. افت دما در لایه‌ی نازک سیال خنک کننده با فرض برداشت حرارت اجباری از رابطه‌ی دیتوس- بولتر [۱۳] محاسبه خواهد شد.



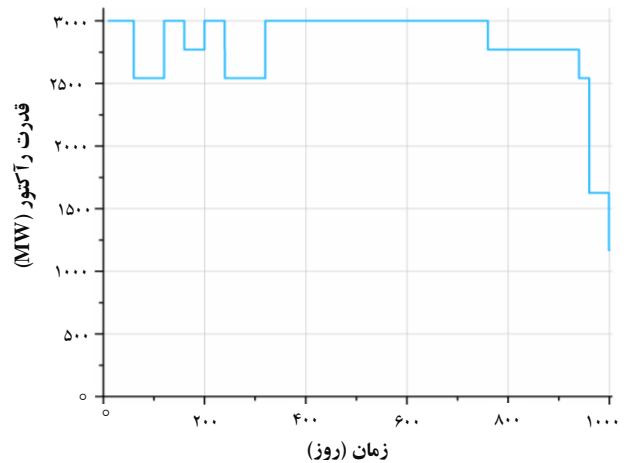
شکل ۳. روش پیشنهادی محاسبه‌ی قطر هیدرولیک معادل، به منظور مدل کردن سوخت‌های VVER با کد فراپکون.

### ۳.۲ انتقال گرما در گاف<sup>۱</sup>

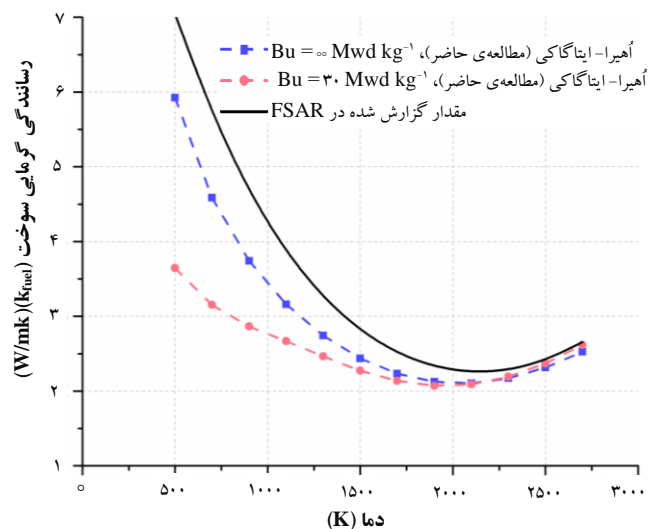
از مهم‌ترین نایقینی‌هایی که در تعیین توزیع دمای سوخت و توصیف سایر فرایندهای کلیدی به وقوع پیوسته در سوخت وجود دارد، تخمین  $h_{gap}$  است. این ضریب به متغیرهای وابسته به زمان نظیر پهنای گاف ( $d_g$ )، فشار و ترکیب گاز محبوس درون میله سوخت، کیفیت سطح قرص سوخت و غلاف در طی بهره‌برداری از رآکتور و تفاوت بین قرص سوخت دارای حفره مرکزی، متداول در رآکتورهای VVER و قرص‌های بدون حفره بستگی دارد [۱۶]. پیچیده‌ترین مدل‌های پیشنهادی نیز قادر به از بین بردن نایقینی‌ها در تعیین رسانندگی بین سوخت و غلاف نخواهند بود، بنابراین بهتر است در این خصوص از مدل‌های فیزیکی که در کدهای تحلیل عملکردی سوخت استفاده می‌شود، بهره‌گرفت. در این مقاله براساس مطالعه‌های انجام یافته  $h_{gap}$  به صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$h_{gap} = h_{rad} + F \cdot h_{solid} + (1-F) \cdot h_{gas} \quad (9)$$

که در آن  $h_{rad}$  ضریب انتقال تابشی گرما،  $h_{solid}$  رسانایی در نقطه‌ی تماس قرص سوخت با غلاف و  $h_{gas}$  رسانایی گاز محبوس درون میله سوخت ( $W m^{-2} K^{-1}$ ) است. هم‌چنین  $F$  کسری از محیط قرص سوخت است که بعد از تشکیل ترک در تماس با غلاف قرار می‌گیرد.



شکل ۴. تاریخچه‌ی قدرت فرضی برای یک دوره‌ی کاری تقریباً سه‌ساله.



شکل ۵. ضریب گرماسانندگی قرص سوخت  $UO_2$ .

1. Gap

$$h_{solid} = \frac{0.4166 \cdot k_m \cdot \left(\frac{P_{contact}}{H_{clad}}\right) \times 1.5}{R \cdot \exp\left(0.738 - 0.528 \ln\left(3.937 \times 10^{-7} \cdot R\right)\right)} \quad \left(\frac{P_{contact}}{H_{clad}}\right) < 4 \times 10^{-6}$$

$$h_{solid} = \frac{0.0125 \cdot k_m}{R \cdot \exp\left(0.738 - 0.528 \ln\left(3.937 \times 10^{-7} \cdot R\right)\right)} \quad \left(\frac{P_{contact}}{H_{clad}}\right) > 4 \times 10^{-6}$$

$$h_{solid} = \frac{0.4166 \cdot k_m \cdot \left(\frac{P_{contact}}{H_{clad}}\right)^{0.5}}{R \cdot \exp\left(0.738 - 0.528 \ln\left(3.937 \times 10^{-7} \cdot R\right)\right)} \quad \left(\frac{P_{contact}}{H_{clad}}\right) \leq 4 \times 10^{-6} \quad (12)$$

در رابطه‌های بالا فشار تماسی و  $H_{clad}$  ضریب سختی میرا (MPa)، رسانندگی گرمایی میانگین نقطه‌ی تماس قرص سوخت و غلاف ( $W m^{-1} K^{-1}$ ) و کیفیت سطح تماس قرص سوخت ( $R_{fuel}$ ) و غلاف ( $R_{clad}$ ) (m) است؛ رابطه‌های حاکم بر این پارامترها در زیر داده شده است [۱۹]:

$$H_{clad} = 10^{-6} \exp\left[2.6034 \times 10^1 - 2.6394 \times 10^{-7} \times \left(T + 4.350 \times 10^{-5} \times T^2 - 2.5621 \times 10^{-4} \times T^3\right)\right]$$

$$k_m = \frac{r k_{fuel} K_{clad}}{k_{fuel} + K_{clad}}$$

$$R = \sqrt{R_{fuel}^2 + R_{Clad}^2} \quad (13)$$

#### بررسی تأثیر فشار تماسی ( $P_{contact}$ )

فشار تماسی مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در تعیین  $h_{solid}$  است. دما و میزان مصرف سوخت با تأثیر بر تغییرات ضریب هدایت حرارتی قرص سوخت و غلاف و  $H_{clad}$  به صورت غیرمستقیم بر  $h_{solid}$  تأثیر خواهند گذاشت. در شکل ۶ رابطه‌ی بین  $h_{solid}$  و فشار تماسی نشان داده شده است.

#### تعیین کسر تماس سطح ترک‌دار قرص سوخت با غلاف (F)

بر اثر تشکیل ترک در قرص سوخت و جابه‌جایی قطعه‌های سوخت در راستای شعاعی، در حدود ۳۰٪ از سطح قرص در تماس با غلاف قرار می‌گیرد؛ با ازدیاد مصرف سوخت و با

#### ۱.۳.۲ ضریب انتقال گرما $h_{rad}$

انتقال گرما از طریق تابش در کارکرد عادی رآکتور کم‌ترین سهم از انتقال گرما را دارد. در اکثر کدهای هسته‌ای رابطه‌ی زیر به منظور محاسبه‌ی  $h_{rad}$  پیشنهاد شده است [۱۷]:

$$h_{rad} = \sigma \times \frac{1}{\left[e_f + \left(\frac{R_{fpout}}{R_{cin}}\right)\left(\frac{1}{e_c} - 1\right)\right]} \times \left[T_{fpout}^r + T_{cin}^r\right] \left[T_{fpout}^r + T_{cin}^r\right] \quad (10)$$

که در آن  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن،  $e_f$  و  $e_c$  به ترتیب ضریب انتشار سوخت  $UO_2$  و غلاف با آلیاژ (۱٪) Zr-Nb مورد استفاده در رآکتورهای VVER هستند که چنین محاسبه می‌شوند [۱۵، ۱۸، ۱۹]

$$e_f = 0.836 + 4.321 \times 10^{-6} (T - 3120)$$

$$e_c = 0.184 \quad (11)$$

#### ۲.۳.۲ ضریب انتقال گرما $h_{solid}$

بر اثر تشکیل ترک در قرص سوخت، تکه‌هایی از سوخت به سمت جدار داخلی غلاف منحرف شده و با سطح آن تماس پیدا خواهند کرد. با افزایش میزان مصرف سوخت مقدار فشاری که از طرف تکه‌پاره‌های سوخت به دیواره‌ی غلاف وارد می‌شود رفته‌رفته افزایش می‌یابد [۲۰]؛ بنابراین یک مدل فیزیکی دقیق که توانایی توصیف پدیده‌های به وقوع پیوسته در تماس قرص با غلاف را داشته باشد در تعیین ضریب انتقال گرما در گاف تأثیر به‌سزایی خواهد داشت. به منظور مدل کردن  $h_{solid}$ ، تصحیح‌هایی بر روی رهیافت اصلی گارنیر-بیگی [۲۱] که در کد فرآپکون مورد استفاده قرار می‌گیرد، انجام شده است؛ که بیش‌ترین تطابق را با نتیجه‌های آزمایش‌های رس-استوت دارد.

**۳.۳.۲ ضریب انتقال گرما  $h_{gas}$**

به منظور مدل سازی انتقال گرما از راه رسانش در گازهای محبوس در درون میله‌ی سوخت از رهیافت‌های پیشنهادی در کدهای ریپ-۱۵ [۲۳]، ترانس اورانوس<sup>۲</sup> [۹] و فرایکون-۳۴۰ استفاده شد. در مدل انتقال گرما در کد ریپ-۱۵ اثر تماس قرص با غلاف در نظر گرفته نشده است ولی فرضی مبنی بر عدم تقارن محوری قرص‌های سوخت و غلاف به دلیل جابه‌جایی تکه‌پاره‌های قرص سوخت وجود دارد که باعث می‌شود رسانندگی گاز در امتداد میله‌ی سوخت تغییر کند. این فرض باعث افزایش دقت و واقع‌بینانه‌تر شدن تحلیل گرمایی خواهد شد. رسانندگی گاز در کد ریپ-۱۵ چنین تعیین می‌شود [۲۳]

$$h_{gas} = \frac{k_g}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{d_n + r_{fp} \cdot (R_{fuel} + R_{clad}) + (g_{fuel} + g_{clad})} \quad (15)$$

که در آن  $n$  تعداد تکه‌های جدا شده از قرص سوخت،  $N$  تعداد کل تکه‌های قرص سوخت ( $N=8$ )،  $k_g$  رسانندگی مخلوط گازهای درون میله‌ی سوخت ( $W m^{-1}K^{-1}$ )،  $d_n$  ضخامت مؤثر فاصله‌ی سوخت-غلاف ( $m$ ) و  $g_{fuel}$ ،  $g_{clad}$  به ترتیب طول امتداد یافته و یا جهش گرمایی گاز در سطح غلاف و قرص سوخت ( $m$ ) است. کد ریپ-۱۵ ضخامت مؤثر گاف را به صورت زیر پیشنهاد داده است [۲۳]:

$$d_n = d_g + \left[ -1 + \left( \frac{r_{fp} n - 1}{N} \right) \right] \cdot d_{g_0} \quad (16)$$

که در آن  $d_{g_0}$  ضخامت فاصله‌ی سوخت-غلاف در زمان ساخت میله‌ی سوخت است و از پارامترهای طراحی به شمار می‌رود و  $d_g$  ضخامت مؤثر هندسی فاصله‌ی سوخت-غلاف ناشی از جابه‌جایی قطعه‌های جدا شده‌ی قرص سوخت است که از رهیافت پیشنهادی توسط کد ترانس اورانوس [۹] برای محاسبه‌ی آن استفاده می‌شود. فاصله‌ی جهش گرمایی گاز محبوس درون میله‌ی سوخت توسط رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود [۱۲]:

$$g_1 + g_r = \frac{0.2468 k_g T_g^{1/2}}{P_{gas} \cdot \sum_{i=1}^r x_i \cdot a_i \cdot M_i^{-1/2}} \quad (17)$$

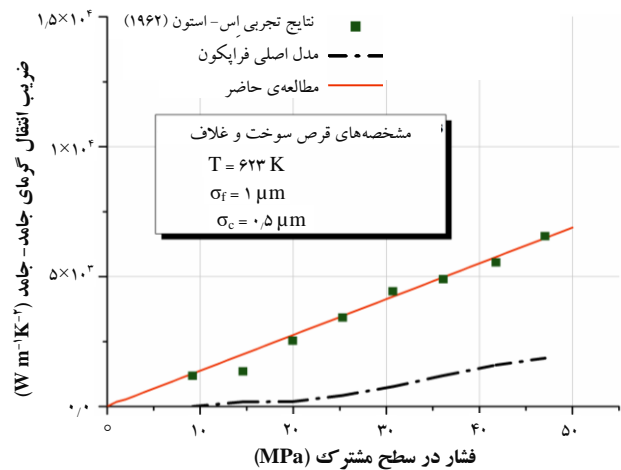
1. Relap-5
2. Transuranus
3. Frapcon-4.0

گذشت زمان، این مقدار افزایش خواهد یافت. براکتون-مک دونالد رابطه‌ای برای  $F$  به شکل زیر پیشنهاد داده‌اند [۲۲]:

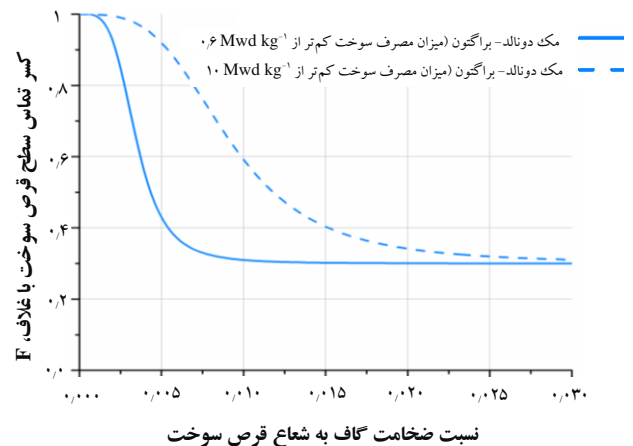
$$F = \frac{1}{r_{fp} \cdot F' \times \left( \frac{dg \cdot 100}{R_{fp, out}} \right)^{r_{fp} \cdot F'} + 1,429} + 0,3$$

$$F' = 1 - \frac{1}{\left( \frac{Bu \cdot 10^{-r} - 600}{1000} \right)^F + 1} \quad (14)$$

شکل ۷ کسر تماس سطح قرص سوخت با غلاف را به صورت تابعی از نسبت ضخامت مؤثر گاف به شعاع خارجی قرص سوخت در میزان مصرف‌های مختلف سوخت نشان می‌دهد.



شکل ۶. مقدار  $h_{solid}$  بر حسب فشار تماسی.



شکل ۷. کسر سطح تماس قرص سوخت با غلاف به عنوان تابعی از نسبت ضخامت مؤثر گاف به شعاع خارجی قرص سوخت.

در رابطه‌های بالا  $k_i$  رسانندگی گرمایی گاز  $i$  به صورت جداگانه است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$k_i = A_i \cdot T_g^{B_i} \quad (22)$$

ثابت‌های A و B برای سه گاز مورد استفاده‌ی این مقاله در جدول ۱ درج شده‌اند [۲۵].

#### ۴.۲ مقدار محصول‌های شکافت گازی راه‌یافته به گاف

بخشی از محصول‌های شکافت، گازی شکل هستند، به طوری که به ازای هر فرایند شکافت ۰٫۳۱ اتم گازی جدید به وجود می‌آید. بخش عمده‌ی محصول‌های گازی، زنون و مقدار کمی کریپتون و مقدار ناچیزی از سایر گازها است. کسری از اتم‌های گازی در شبکه‌ی بلوری سوخت باقی‌مانده و مابقی بر اثر پدیده‌ی پخش به بیرون از سوخت نفوذ نموده و موجب تغییر فشار و ترکیب گازها در گاف می‌شود. از طرف دیگر همان‌طور که در بخش پیشین بررسی شد، ضریب  $h_{gas}$  به ترکیب و فشار داخلی میله‌ی سوخت بستگی دارد. با محاسبه‌ی چگالی قدرت متوسط ( $\bar{q}'''$ ) از تاریخچه‌ی قدرت بهره‌برداری، مقدار محصول‌های شکافت گازی تولید شده در هر قسمت محوری از سوخت از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$GP(z) = 0,6242 \cdot 10^{12} \times \bar{q}'''(z) \times \left(\frac{1}{A_v}\right) \times V_{fuel} \times \Delta t [PR_{Xe} + PR_{Kr}] \quad (23)$$

که در آن  $GP(z)$  مقدار کل محصول‌های شکافت گازی تولید شده در ارتفاع  $z$  از میله‌ی سوخت (برحسب  $\text{mole s}^{-1}$ )،  $A_v$  عدد آووگادرو،  $V_{fuel}$  حجم قرص سوخت،  $\Delta t$  گام زمانی (برحسب روز) و  $PR_{Xe}$ ،  $PR_{Kr}$  به ترتیب بهره‌ی شکافت گاز کریپتون و زنون است.

که در آن  $T_g$  دمای مطلق متوسط گاز درون گاف،  $P_{gas}$  فشار گاز محبوس در درون میله‌ی سوخت (Pa)،  $a_i$  و  $x_i$  به ترتیب ضریب وزنی، کسر و وزن مولی گاز  $i$  است. ضریب وزنی برای گازهای هلیم، زنون و کریپتون از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۲۴] و مقدار سایر پارامترهای معرفی شده در ادامه‌ی همین بخش تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} a_{He} &= 0,425 - 2,3 \times 10^{-7} T_g \\ a_{Xe} &= 0,740 - 2,5 \times 10^{-7} T_g \\ a_i &= a_{He} + \frac{(M_i - M_{He})}{(M_{Xe} - M_{He})} (a_{Xe} - a_{He}) \end{aligned} \quad (18)$$

#### تعیین مقدار جابه‌جایی سوخت و ضخامت مؤثر گاف dg

بر اثر انحراف تکه‌پاره‌های سوخت به سمت جداری داخلی غلاف عرض گاف کاهش می‌یابد. مقدار جابه‌جایی در راستای شعاعی،  $R_{fp,out}^{rel}$ ، چنین داده می‌شود [۳]

$$R_{fp,out}^{rel} = \varepsilon_{\theta}^{rel} \cdot R_{fp,out} \quad (19)$$

که در آن  $\varepsilon_{\theta}^{rel}$  کرنش محیطی ناشی از جابه‌جایی سوخت بر اثر تشکیل ترک است که چنین به دست می‌آید [۳]

$$\varepsilon_{\theta}^{rel} = 0,0065 + 0,0085 [1 - \exp(-Bu / 188,67)] \quad (20)$$

محاسبه‌ی رسانندگی گرمایی مخلوط گازهای محبوس درون گاف از رابطه‌های زیر برای محاسبه‌ی رسانندگی گرمایی مخلوط گازهای محبوس در گاف استفاده شد [۱۲]:

$$\begin{aligned} k_g &= \sum_{i=1}^r \frac{x_i \cdot k_i}{[x_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^r x_j \cdot \Phi_{ij}]} \\ \Phi_{ij} &= 0,3765 \cdot \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)^{-\frac{1}{r}} \cdot \left(1 + \left(\frac{k_i}{k_j}\right)^{\frac{1}{r}} \cdot \left(\frac{M_i}{M_j}\right)^{\frac{1}{r}}\right) \end{aligned} \quad (21)$$



نشت می‌کند. با اضافه کردن این کسر به مقدار گازهای تازه تولید شده در گام زمانی  $\Delta t$ ، کل گازهای راه‌یافته به گاف در این گام زمانی محاسبه خواهد شد.

با تعیین کسر گازهایی که در هر گام زمانی به گاف راه پیدا می‌کند و با در اختیار داشتن بهره‌ی تولید زنون و کریپتون می‌توان به ترتیب مقدار و ترکیب (کسر مولی) گازهای محبوس در درون میله‌ی سوخت را پیش‌بینی کرد.

#### ۱.۴.۲ ضریب پخش اتم‌گازی منفرد (D)

به منظور محاسبه‌ی ضریب پخش، از رهیافت فورسبرگ- مسیح [۱۲، ۲۷] استفاده شد. در این مدل، ضریب پخش  $D$  تابعی از دمای قرص سوخت و میزان مصرف متوسط سوخت است.

$$D = \max \left[ Bu\_Factor \times 1.2 \times 2.14 \times 10^{-12} \times \exp(-22884 \times 1.15 / T), 1.09 \times 10^{-12} \exp(-6614 / T) \right]$$

$$Bu\_Factor = 1.0 \cdot \frac{Bu-1}{F} \quad (26)$$

#### ۵.۲ محاسبه‌ی فشار گاز محبوس در درون میله‌ی سوخت

مقدار فشار گاز درون میله‌ی سوخت به دما، مقدار گاز و نیز فضاهای خالی موجود در درون میله‌ی سوخت بستگی دارد. گازهای محبوس، گاز کامل فرض می‌شوند، در این صورت با توجه به رابطه‌ی زیر فشار گاز درون میله‌ی سوخت محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{M \cdot R}{\frac{V_p}{T_p} + \frac{V_{gap}}{T_{gap}} + \frac{V_{ch}}{T_{ch}}} \quad (27)$$

که در آن،  $M$  وزن مولی تمامی گازهای زنون، کریپتون و هلیوم،  $R$  ثابت جهانی گازها،  $V_p$  و  $T_p$  به ترتیب حجم پلنوم (محفظه‌ی جمع‌آوری گاز در بالای میله‌ی سوخت است و به‌عنوان یک ورودی در نظر گرفته می‌شود) و دمای متوسط گاز متناظر با آن،  $V_{gap}$  و  $T_{gap}$  حجم و دمای متناظر با فشار گاف و  $V_{ch}$  و  $T_{ch}$  حجم و دمای متوسط گاز کانال مرکزی سوخت هستند.

#### جدول ۱. ضریب‌های ثابت بی‌بعد رابطه‌ی ۲۲

گاز	ضریب‌های ثابت	
	B	A
هلیوم	۰٫۷۱۴۶	$2,531 \times 10^{-10}$
زنون	۰٫۷۳۳۴	$9,825 \times 10^{-10}$
کریپتون	۰٫۷۰۰۶	$1,966 \times 10^{-10}$

فرایند پخش تک اتمی به منظور توصیف ره‌اشدن محصول‌های شکافت گازی در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. بر طبق دست‌آورد نوتلی [۲۶] در هر گام زمانی با دو نوع گاز مواجه می‌شویم، گازهای تولید شده در همان گام زمانی و گازهای پیشین انباشته شده در ساختار سوخت؛ آهنگ نشت این دو نوع گاز با یک‌دیگر متفاوت است.

$$\pi^r D \cdot \Delta t / a^r < 1$$

$$f = \epsilon (D \cdot \Delta t / a^r \pi)^{1/r} - 1, \epsilon D \cdot \Delta t / a^r$$

$$\pi^r D \cdot \Delta t / a^r \geq 1$$

$$f = 1 - \frac{a^r}{1.5 D \cdot \Delta t} + \frac{\epsilon a^r}{\pi^r D \cdot \Delta t} \exp\left(\frac{-\pi^r D \cdot \Delta t}{a^r}\right) \quad (24)$$

در روابط بالا،  $f$  کسر گازهای تازه تولید شده در گام زمانی حاضر است که به بیرون نشت نموده است،  $D$  ضریب پخش اتم‌گازی منفرد ( $m^2 s^{-1}$ )،  $a$  شعاع دانه‌بندی قرص سوخت ( $m$ ) و  $\Delta t$  گام زمانی (ثانیه) است. برای تعیین آهنگ نشت گازهای انباشته شده از رابطه‌ی زیر در زمان  $t_1 = t_0 + \Delta t$  ( $t_0$  کل زمانی است که در آن گاز قدیمی تا ابتدای گام زمانی حاضر، انباشته شده است) استفاده شد:

$$\pi^r D t_1 / a^r < 1,$$

$$f_1 = \epsilon (D t_1 / \pi a^r)^{1/r} - \epsilon D t_1,$$

$$\pi^r D t_1 / a^r \geq 1,$$

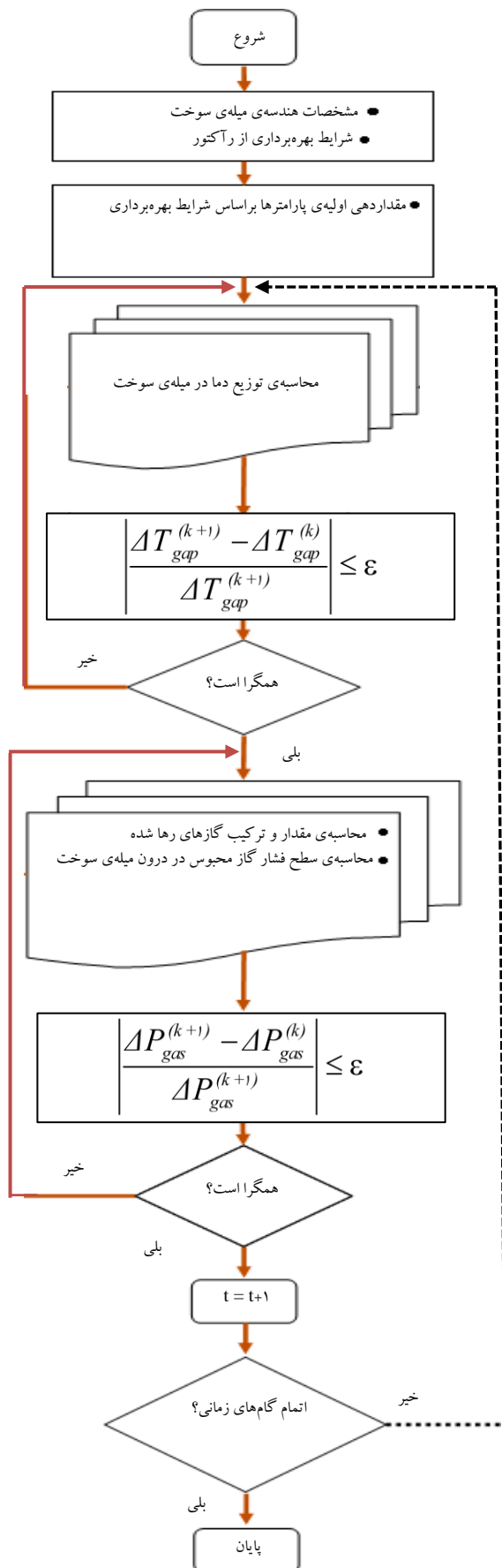
$$f_1 = 1 - \frac{\epsilon}{\pi^r} \exp\left(\frac{-\pi^r D t_1}{a^r}\right) \quad (25)$$

آن‌گاه کسر  $f_1$  برای  $t_1 = t_0$  از آن کم می‌شود. کسر باقی‌مانده نشان‌دهنده‌ی کسری از گاز قدیمی است که در گام زمانی  $\Delta t$

## ۳. روندنمای حل مسأله

روندنمای حل عددی مورد استفاده در شکل ۸ نشان داده شده است. هندسه، داده‌ها و تاریخچه‌ی قدرت بهره‌برداری میله سوخت؛ هم‌چنین شرایط مرزی مثل دمای ورودی خنک‌کننده به قلب، شار گرمی خنک‌کننده و ضریب‌های قدرت محوری میله سوخت به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شوند. پارامترهای نظیر چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه‌ی آب که به فشار و دمای خنک‌کننده وابسته‌اند از جدول‌های ترموهیدرولیکی و سایر پارامترهایی هم که به خواص ماده وابسته هستند مثل ضریب گرماسازندگی غلاف از متپرو-۲۱۱ استخراج می‌شوند.

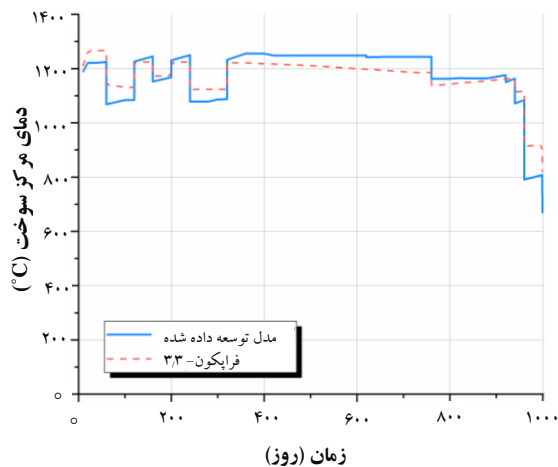
در گام اول، شرایط اولیه میله سوخت با یک مقدار اولیه، به طور مثال؛ دمای ورودی خنک‌کننده در پایین‌ترین قسمت میله سوخت، مقداردهی اولیه می‌شود. در گام بعدی میله سوخت به صورت محوری و شعاعی به چندین قسمت تقسیم می‌شود. پاسخ دمایی میله سوخت برای هر گام زمانی تاریخچه‌ی قدرت از طریق تکرار حل عددی معادله‌ی انتقال گرما در حالت پایدار به صورت تفاضل محدود تا زمانی که افت دما در گپ هم‌گرا شود، مشخص می‌شود. معیار هم‌گرایی برای حلقه‌ی داخلی روندنما زمانی تحقق می‌یابد که افت دمای نسبی در گاف به ۰/۰۰۱ برسد. بعد از محقق شدن شرط هم‌گرایی در تمام قسمت‌های محوری میله سوخت، آهنگ تولید محصول‌های گازی شکافت و آهنگ خروج آن‌ها به گپ با استفاده از رابطه‌های ۲۳ تا ۲۶ محاسبه می‌شوند و در پایان هر گام زمانی، فشار گاز محبوس درون میله سوخت با استفاده از رابطه‌ی ۲۷ به دست می‌آید. این فرایند تا پایان یافتن تمامی گام‌های زمانی تاریخچه‌ی قدرت ادامه می‌یابد. در جدول ۲ پارامترهای اصلی عملیاتی رآکتور VVER-۱۰۰۰ نیروگاه بوشهر درج شده است.



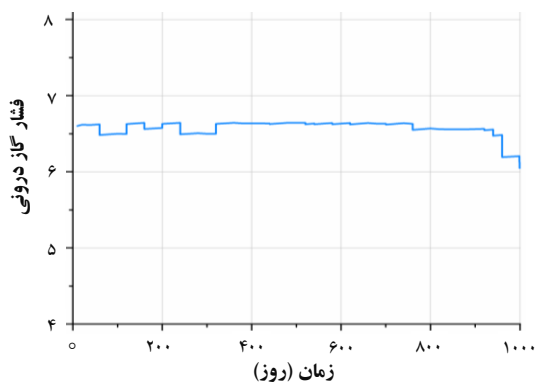
شکل ۸. روندنمای حل عددی.

کد فرایکون-۳/۳ وجود دارد. شکل ۱۰ فشار گاز محبوس در درون میله‌ی سوخت، به دست آمده با استفاده از رابطه‌ی ۲۷ را نشان می‌دهد. مشخص شد که اثر توزیع دما بر فشار گاز بسیار مؤثرتر از عامل محصول‌های گازی شکافت محبوس در درون میله‌ی سوخت است.

شکل ۱۱ نتایج شبیه‌سازی راه‌یابی محصول‌های گازی شکافت به فضا‌های خالی میله‌ی سوخت با استفاده از رابطه‌های ۲۴ و ۲۵، خروجی کد فرایکون-۳/۳ و نتیجه‌های گزارش شده در FSAR نیروگاه بوشهر برای ترکیب گازهای محبوس در درون میله‌ی سوخت برحسب میزان مصرف سوخت است. ساده بودن پیاده‌سازی به زبان ماشین و عملکرد بهتر در تخمین ترکیب گاز محبوس در درون میله‌ی سوخت در مقایسه با نتیجه‌های گزارش شده، از مهم‌ترین دلایل انتخاب مدل پیشنهادی نوتلی در این مقاله بوده است.



شکل ۹. دمای مرکز سوخت در داغ‌ترین قسمت محوری میله‌ی سوخت.



شکل ۱۰. فشار گاز محبوس در درون میله‌ی سوخت برحسب زمان.

جدول ۲. پارامترهای رآکتور VVER-1000 نیروگاه بوشهر

پارامتر	مقدار
شرایط بهره‌برداری	
فشار خنک‌کننده در قلب (bar)	۱۵۷
دمای خنک‌کننده (°C)	۲۹۱
شار گرمی خنک‌کننده ( $\text{kg m}^{-2}\text{sec}^{-1}$ )	۴۱۷۰۰
مجتمع سوخت	
شکل مجتمع‌های سوخت	شش ضلعی
میله‌ی سوخت	
قطر حفره‌ی مرکزی قرص سوخت (mm)	۱٫۵
قطر خارجی قرص سوخت (mm)	۷٫۵۷
ضخامت غلاف (mm)	۰٫۶۸
ضخامت گاف (mm)	۰٫۰۸
زبری سطح سوخت (mm)	$۷٫۹۸ \times 10^{-4}$
زبری سطح غلاف (mm)	$۷٫۱۰ \times 10^{-4}$
فاصله‌ی مرکز تا مرکز دو میله‌ی سوخت (mm)	۱۲٫۷۵
طول فعال میله‌ی سوخت (mm)	۳۵۳۰
جنس سوخت	$\text{UO}_2$
میزان تخلخل (%)	۹٫۴۹
جنس غلاف	آلیاژ Zr + ۱ Nb
فشار اولیه‌ی گاز میله‌ی سوخت (هلیوم) (bar)	۲۰

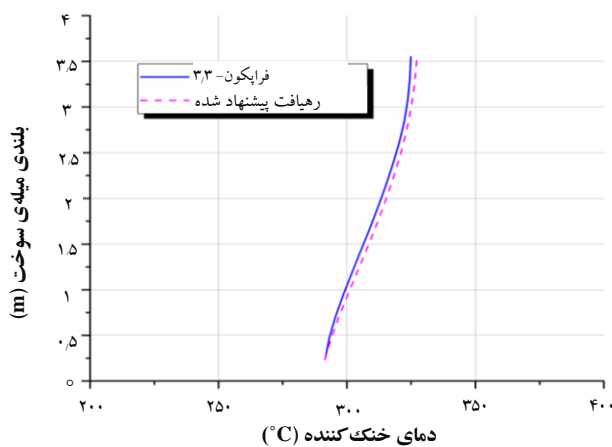
#### ۴. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش رفتار میله‌ی سوخت در کانال داغ رآکتور VVER-1000 نیروگاه بوشهر با چگالی گرمایی متوسط برای تاریخچه‌ی قدرت نشان داده شده در شکل ۴، به منظور ارزیابی مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی دمای مرکز سوخت، فشار گاز محبوس در درون میله‌ی سوخت و تغییرهای ترکیب گازهای محبوس در درون میله‌ی سوخت (مهم‌ترین پارامترهای عملکرد گرمایی)، شبیه‌سازی شده است. از نتایج کد فرایکون-۳/۳ و داده‌های تجربی FSAR نیروگاه بوشهر [۱۱] به منظور صحت‌سنجی یافته‌های شبیه‌سازی استفاده شده است. دمای مرکز سوخت از مهم‌ترین پارامترهای عملکردی سوخت به شمار می‌رود [۱] که می‌باید در مرحله‌ی طراحی میله‌ی سوخت مورد توجه قرار گیرد. در شکل ۹ دمای مرکز سوخت در داغ‌ترین قسمت محوری میله‌ی سوخت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین نتیجه‌ی مدل‌های فیزیکی استفاده شده در این مقاله به منظور تخمین دمای مرکز سوخت و خروجی

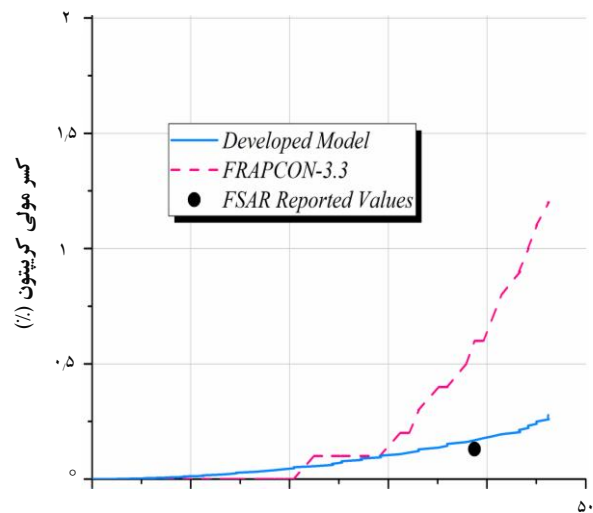
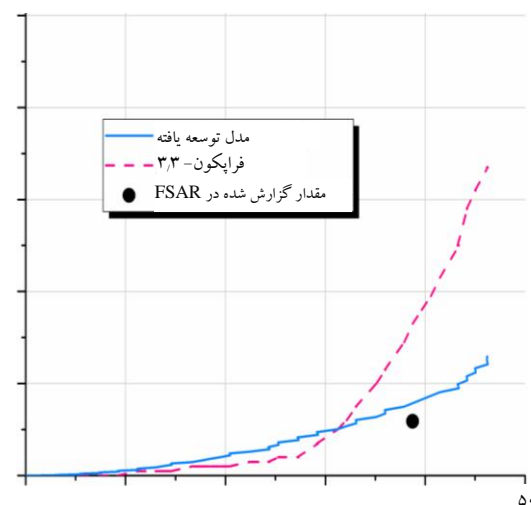
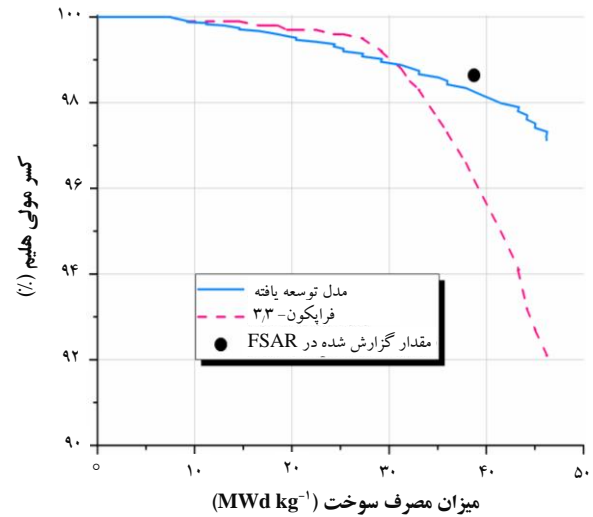
در شکل ۱۲ عملکرد رهیافت معرفی شده به منظور استفاده از کد فرایکون-۳٫۳ برای شبیه‌سازی مجتمع‌های سوخت با کانال‌های مثلی برای محاسبه‌ی دمای حجمی سیال خنک‌کننده، نشان داده شده است.

### ۵. جمع‌بندی

در مقاله‌ی حاضر مدل‌های گوناگون فیزیکی به منظور پیش‌بینی دمای مرکز سوخت و ترکیب محصول‌های گازی شکافت راه‌یافته به فضاهای خالی میله‌ی سوخت معرفی و نتیجه‌ی آن در قالب یک مدل به منظور تحلیل پارامترهای عملکرد گرمایی میله‌ی سوخت رآکتور VVER نیروگاه بوشهر ارایه شد. مدل و رهیافت عددی نهایی قادر به توصیف پدیده‌های فیزیکی حاکم بر میله‌های سوخت رآکتورهای VVER-1000 در سطح‌های مدل بالای میزان مصرف سوخت است. مقایسه‌ی نتیجه‌های مدل معرفی شده در پیش‌بینی مهم‌ترین پارامترهای عملکرد گرمایی (دمای مرکز سوخت، فشار، مقدار و ترکیب گازهای محبوس در درون میله‌ی سوخت)، با نتیجه‌های کد فرایکون-۳٫۳ و FSAR و نیروگاه بوشهر نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که مدل‌های فیزیکی انتخاب شده در این مقاله عملکرد بسیار خوبی در پیش‌بینی رفتار حاکم بر عملکرد حالت پایای میله‌های سوخت VVER دارند. مدل‌های ارایه شده برای شرایط پایدار رآکتور بوده و برای رفتارهای گذرای سوخت مناسب نیستند. برای تکمیل آن‌ها می‌توان روش‌های ارایه شده را برای شبیه‌سازی عملکرد سوخت در طی حادثه‌ها توسعه داد. علاوه بر این، پاسخ‌های حالت پایا را می‌توان به عنوان شرایط اولیه برای مدل گذرای میله‌ی سوخت در نظر گرفت.



شکل ۱۲. ارزیابی رهیافت پیشنهاد شده به منظور مدل‌سازی زیرکانال‌های مثلی توسط کد فرایکون-۳٫۳.



شکل ۱۱. رابطه‌ی بین کسر مولی گاز محبوس در درون میله‌ی سوخت و میزان مصرف سوخت.

## مراجع

1. IAEA, Analysis of differences in fuel safety criteria for WWER and western PWR nuclear power plants / TECDOC-1381, (2003).
2. G.A. Berna, G.A. Beyer, K.L. Davis, D.D. Lanning, FRAPCON-3: A computer code for the calculation of steady-state, thermal-mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup, (1997).
3. K. Lassmann, TRANSURANUS: a fuel rod analysis code ready for use, *J. Nucl. Mater.*, **188**, 295–302 (1992).
4. [4] U.É. Bibilashvily, À.V. Medvedev, S.Ì. Bogatyr, V.I. Kouznetsov, G.À. Khvostov, START-3 code gap conductance modelling, *Therm. Perform. High Burn. LWR Fuel.*, 369 (1998).
5. K.A. Terrani, D. Wang, L.J. Ott, R.O. Montgomery, *J. Nucl. Mater.*, **448**, 512-519 (2014).
6. P.E. MacDonald, J.M. Broughton, Cracked pellet gap conductance model: comparison of frap-s calculations with measured fuel centerline temperatures, (1975).
7. N.E. Todreas, M.S. Kazimi, Nuclear systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals, *Taylor & Francis*, (1990).
8. A.M. Ross, R.L. Stoute, Heat transfer coefficient between UO<sub>2</sub> and Zircaloy-2, AECL-1552., (1962).
9. K. Lassmann, F. Hohlefeld, *Nucl. Eng. Des.*, **103**, 215-221 (1987).
10. K.J. Geelhood, W.G. Luscher, FRAPCON-3.5: A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup, (2014).
11. Russia Federal Agency on Nuclear Energy, Bushehr NPP Final Safety Analysis Report, Moscow, (2003).
12. K.J. Geelhood, W.G. Luscher, FRAPCON-4: A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup, 1 (2015).
13. F.W. Dittus, L.M.K. Boelter, Heat transfer in automobile radiators of the tabular type, University of California, (1930).
14. K. Ohira, N. Itagaki, Thermal conductivity measurements of high burnup UO<sub>2</sub> pellet and a benchmark calculation of fuel center temperature, in: Proc. Am. Nucl. Soc. Meet. Light Water React. Fuel Performance, Portland, Oregon, 541 (1997).
15. S.P.S. Badwal, *Materials for solid oxide fuel cells*, (1997).
16. F.B. Tas, S. Ergun, *Energy Convers. Manag.*, **72**, 88–93 (2013).
17. F. Kreith, R.M. Manglik, M.S. Bohn, *Principles of Heat Transfer*, (2011).
18. IAEA, Advanced Fuel Pellet Materials and Designs for Water Cooled Reactors/TECDOC-1416, Tech. Comm. Meet. Held Brussels., (2004) 329.
19. D.L. Hagrman, G.A. Reymann, MATPRO-VERSION 11: a handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel rod behavior, (1979).
20. L.E. Herranz, A. Tigeras, *Prog. Nucl. Energy.*, **52**, 435–441 (2010).
21. J.E. Garnier, S. Begej, A.O. Desjarlais, R.P. Tye, Ex-Reactor Determination of Thermal Gap Conductance between Uranium Dioxide:Zircaloy-4 Interfaces, in: D.C. Larsen (Ed.), *Therm. Conduct. 16*, Springer US, Boston, MA, 211–219 (1983).
22. P.E. Macdonald, R.H. Smith, *Nucl. Eng. Des.*, **61**, 163-177 (1980).
23. C.M. Allison, G.A. Berna, R. Chambers, E.W. Coryell, K.L. Davis, D.L. Hagrman, D.T. Hagrman, N.L. Hampton, J.K. Hohorst, R.E. Mason, M.L. McComas, SCDAP/RELAP5/MOD3. 1 code manual, VOLUME I: CODE STRUCTURE, SYSTEM MODELS, AND SOLUTION METHODS, DT Hagrman, NUREG/CR-6150, EGG-2720., 1 (1993) 4–234.
24. K.E. Carlson, R.A. Riemke, S.Z. Rouhani, R.W. Shumway, W.L. Weaver, RELAP5/MOD3 Code Manual Volume I: Code Structure, System Models and Solution Methods, US NRC NUREG/CR-5535, Washingt. (DC, USA) June., (1990).
25. W.G. Luscher, K.J. Geelhood, Material Property Correlations: Comparisons between FRAPCON-4.0, FRAPTRAN 2.0, and MATPRO, (2015).
26. M.J.F. Notley, I.J. Hastings, *Nucl. Eng. Des.*, **56**, 163–175 (1980).
27. L.O. Jernkvist, A.R. Massih, Analysis of the effect of UO<sub>2</sub> high burnup microstructure on fission gas release, *Ski Rep.*, **2**, 56 (2002).

## 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

سعید طالبی (۱۳۹۸)، توصیف عملکرد میله‌ی سوخت رآکتورهای VVER-۱۰۰۰ در شرایط بهره برداری و بالاترین میزان مصرف سوخت، ۸۸، ۱۳-۱

DOI: [10.24200/nst.2019.992](https://doi.org/10.24200/nst.2019.992)

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_992.html](https://jonsat.nstri.ir/article_992.html)