



تحلیل عددی رفتار ترمومکانیکی میله سوخت (UO₂) در حالت پایا با استفاده از روش المان محدود

مرتضی ایمانی^{۱*}، مهدی آقایی^۲، محمد عماد عادل‌خواه^۲، احمدرضا ذوالفقاری^۲، عبدالحمید مینوچهر^۲
 ۱. پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران-ایران
 ۲. دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران-ایران
 *Email: Imani.mrt@gmail.com

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۲/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۲/۲۷

چکیده

در طراحی میله سوخت، توانایی پیش‌بینی قابل اطمینان از عملکرد سوخت به منظور رعایت اصول ایمنی از اهمیت بالایی برخوردار است. برای دستیابی به این هدف، کدهای کامپیوتری مختلفی ارائه شده‌اند که هر یک از آن‌ها از مدل‌های مختلف مکانیکی و روش‌های مختلف عددی و تحلیلی استفاده می‌کنند. بر همین اساس، هدف پژوهش حاضر تهیه برنامه‌ای کامپیوتری به زبان برنامه‌نویسی فرترن به منظور آنالیز مکانیکی و حرارتی میله‌های سوخت (UO₂) با استفاده از روش‌های عددی، به‌ویژه به‌کارگیری اصل کار مجازی در تحلیل مکانیکی میله سوخت در شرایط پایا می‌باشد. برای حل معادلات به‌دست آمده از روش المان محدود استفاده شده است. در قسمت تحلیل مکانیکی پدیده‌هایی از قبیل تورم و تراکم سوخت و خزش در غلاف در نظر گرفته شده‌اند. سپس با پدیده‌های فوق و انجام تحلیل مکانیکی و حرارتی به‌صورت هم‌زمان، زمان تماس سوخت با غلاف، میزان تنش و کرنش در سوخت و غلاف، دمای مرکز سوخت، میزان رشد لایه اکسید بر روی غلاف و توزیع دمای سوخت و غلاف در طول کار راکتور در حالت پایا (در یک توان ثابت) توسط برنامه نوشته شده به‌دست می‌آیند. نتایج این برنامه با نتایج روش تحلیلی موجود در منابع صحت‌سنجی شده و برای راکتور VVER1000 تحلیل مکانیکی و حرارتی میله سوخت در یک بازه ۱۶۰۰ روزه انجام پذیرفته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، قرص سوخت پس از ۱۲۵۰ روز با غلاف تماس پیدا می‌کند.

کلیدواژه‌ها: میله سوخت، غلاف، قرص سوخت، تحلیل مکانیکی، تحلیل حرارتی، روش المان محدود، اصل کار مجازی

Numerical analysis of thermomechanical behavior of fuel rod (UO₂) in steady state condition using finite element method

M. Imani^{1*}, M. Aghaei², M.E. Adeliakhah², A. R. Zolfaghari², A.H. Minuchehr²

1. Materials and Nuclear Fuel Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 11365-8486, Tehran-Iran
 2. Nuclear Engineering Department, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 1983963113, Tehran-Iran

Research Article

Received 1.3.2020, Accepted 16.5.2020

Abstract

In designing the fuel rod, having a reliable prediction of fuel performance is of high importance in order to comply with safety principles. Various computer codes have been provided for this purpose. Each of these codes uses different mechanical models, numerical and analytical methods. Accordingly, the purpose of the present work is to develop Fortran computer software for mechanical and thermal analysis of fuel rods using numerical methods, especially applying the principle of virtual work in mechanical analysis of fuel rods in steady-state conditions. The finite element method is used to solve the equations. The mechanical analysis includes phenomena such as swelling and fuel density and clad creep. Through these phenomena and simultaneous performance of mechanical and thermal analysis, fuel-clad interaction, stress and strain rate in fuel and clad, fuel center temperature, oxide layer thickness, fuel, and clad temperature distribution during operation is obtained by the code. The results of the code are compared with the results of the analytical method which are available in other research works. Finally, for the VVER1000 reactor, mechanical and thermal analysis of the fuel rod was performed over a 1600-day interval. According to the simulation, the fuel-clad interaction occurs after 1250 days.

Keywords: Fuel rod, Clad, Fuel pellet, Mechanical analysis, Thermal analysis, Finite element method, Virtual work



۱. مقدمه

امروزه انگیزه اصلی برای شبیه‌سازی عملکرد میله سوخت، کاهش هزینه‌های چرخه سوخت است؛ به طوری که مبانی تئوری و همچنین شبیه‌سازی رفتار و عملکرد میله سوخت در شرایط پایا و گذرای راکتور، سهم مهمی را در تعیین مشخصات مطلوب و در نتیجه در طراحی و ساخت آن داراست [۱]. هم چنین اهمیت تحلیل ساختاری میله سوخت و دستیابی به اطلاعات کمی از جزییات مربوط به عملکرد میله سوخت از نقطه نظر ایمنی و به منظور حصول اطمینان از پایداری میله سوخت در شرایط عادی بهره‌برداری، شرایط اضطراری و حتی پس از وقوع حادثه در راکتورها می‌باشد. به کارگیری روش‌های عددی در حل معادلات بنیادی در تحلیل حرارتی و مکانیکی میله سوخت، مستلزم استفاده از کامپیوتر و برنامه‌نویسی است. تاکنون تلاش‌های گسترده‌ای در زمینه تدوین کدهای شبیه سازی عملکرد میله‌های انجام گرفته است. هر یک از این کدها با روشی خاص تهیه شده و گستره متفاوتی را پوشش می‌دهند [۲].

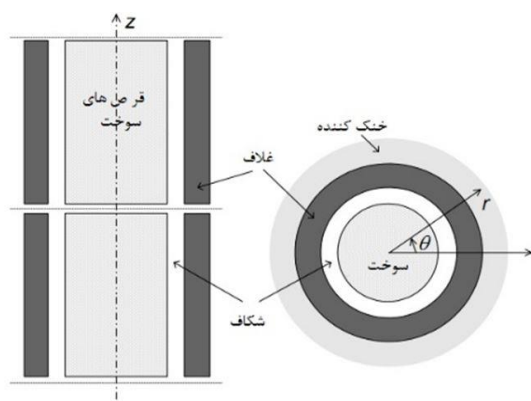
کدهای عملکرد سوخت برای حصول اطمینان از عملکرد ایمن راکتورهای هسته‌ای، که شامل پیش‌بینی نتیجه حوادث نیز می‌شود، اهمیت دارند. بنابراین این کدها به دلیل افزایش قابلیت اطمینان از عملکرد میله‌های سوخت مورد توجه کاربران راکتور می‌باشند. از سوی دیگر، این کدها برای توسعه میله‌های سوخت جدید با مواد تازه و قابلیت اطمینان آن‌ها مورد توجه تولیدکنندگان میله‌های سوخت نیز می‌باشند. مدهای حالت پایا شامل FRAPCON، TRANSURANUS، COMETHE و FEMAXI-V پروفایل دمایی و تنش‌های مکانیکی میله سوخت را در حالت پایا محاسبه می‌کنند که از نتایج مربوط به آن می‌توان آسیب‌ها و طول عمر میله سوخت را محاسبه کرد [۳]. برای هر یک از این کدها با توجه به روابط مورد استفاده در آن‌ها، می‌توان نقاط قوت و ضعف را برشمرد. به عنوان مثال روابط مورد استفاده در کد FEMAXI-V برای مصارف سوخت بالا صادق نیستند [۲]. در پژوهش حاضر، هدف نوشتن کد کامپیوتری برای بومی‌سازی و دستیابی به دانش فنی شبیه‌سازی عملکرد میله سوخت (UO_2) در راکتورهای آب تحت فشار در طی بهره‌برداری در حالت پایا است. این کد IR-FRA (Iran-Fuel Rod Analyzer) نام‌گذاری شده است. این شبیه‌سازی دارای دو بخش اصلی تحلیل حرارتی و تحلیل مکانیکی میله سوخت است. در تحلیل مکانیکی، معادلات از روش اصل کار مجازی به دست آمده و توسط روش المان محدود حل می‌شوند که این موضوع وجه تمایز این کد با سایر کدهای تحلیل میله سوخت می‌باشد. در این مقاله هم چنین میزان رشد لایه اکسید بر روی غلاف در طول زمان در نظر گرفته شده و میزان تغییر دما در این لایه نیز محاسبه می‌شود.

۲. روش کار

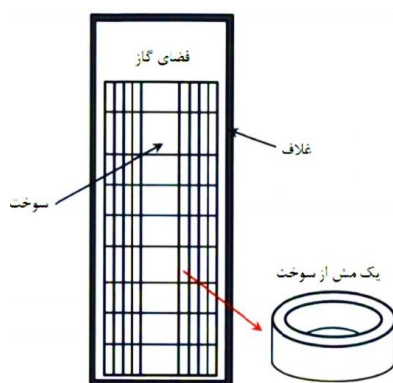
هندس و محورهای مختصات به کار رفته در انجام محاسبات میله سوخت مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است. قرص‌های سوخت به صورت استوانه‌های توپر در نظر گرفته شده و ستون قرص‌های چیده شده بر روی یکدیگر به صورت یکپارچه در نظر گرفته می‌شود. نحوه مش‌بندی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۱.۲ شبیه‌سازی حرارتی میله سوخت

تحلیل حرارتی میله سوخت مستلزم حل معادله انتقال حرارت هدایت در سوخت، گاز درون گپ^۱ و غلاف و همچنین معادله انرژی در راستای شعاعی میله سوخت بین غلاف و سیال خنک‌کننده است. در قسمت اول، در ابتدا میله سوخت در راستای محوری و شعاعی مش‌بندی شده و برای هر گره در ارتفاع میله سوخت، دمای خنک‌کننده محاسبه می‌شود. در نتیجه دمای سطح میله سوخت به دست آمده و با نوشتن معادله انتقال حرارت در غلاف، توزیع دما در راستای شعاعی غلاف نیز به دست می‌آید. روش محاسبه دمای خنک‌کننده در طول میله سوخت، ضریب انتقال حرارت خنک‌کننده و توزیع دما در غلاف مطابق روش محاسبات کد Frapcon است [۴].



شکل ۱. هندسه میله سوخت.



شکل ۲. نحوه مش‌بندی سوخت.

1. gap

غلاف برحسب پاسکال و R_f و R_c به ترتیب زبری سطح سوخت و غلاف برحسب متر هستند.

برای محاسبه پرش دمایی سوخت و غلاف از مدل ارایه شده در کد GAPCON، که پرش دمایی را به صورت زیر محاسبه می‌کند، استفاده شده است [۴]:

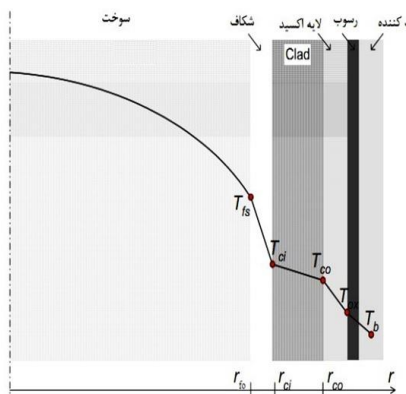
$$(g_f + g_c) = 0.7816 \left[\frac{k_{gas} \sqrt{T_{gas}}}{P_{gas}} \right] \left[\frac{1}{\sum a_i f_i / \sqrt{M_i}} \right] \quad (4)$$

در این رابطه T_{gas} دمای متوسط گاز برحسب کلون و P_{gas} فشار گاز برحسب پاسکال است. این فشار با توجه به میزان گاز رها شده اصلاح می‌شود. همچنین M_i وزن مولی جز i ام گاز درون گپ و α_i ضریب همسازی^۲ جز i ام گاز درون گپ است که برای دو گاز هلیوم و زینان به صورت زیر محاسبه می‌شود [۶]:

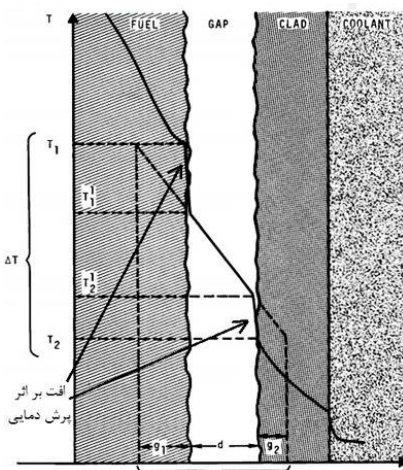
$$a_{He} = 0.425 - 2.3 \times 10^{-4} \times T_{gas} \quad (5)$$

$$a_{Xe} = 0.749 - 2.5 \times 10^{-4} \times T_{gas}$$

f_i در رابطه ۴ کسر مولی جز i ام گاز درون گپ است که این مقدار با محاسبه میزان گاز آزاد شده اصلاح می‌شود.



شکل ۳. نمایش توزیع دما در راستای شعاعی.



شکل ۴. افت دما در طول گپ و نمایش فاصله پرش دمایی.

۱.۱.۲ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی گپ بین سوخت و غلاف این ضریب طبق رابطه ۱ از سه جمله تشکیل شده است:

$$h = h_{rad} + h_{gas} + h_{solid} \quad (1)$$

که در آن h_{gap} جابه‌جایی حرارتی گاز درون گپ، h_{rad} جابه‌جایی حرارتی تشعشعی بین سطح سوخت و غلاف و h_{solid} جابه‌جایی حرارتی تماس سوخت و غلاف می‌باشد. انتقال حرارت تشعشعی از سوخت به سطح غلاف با فرض استوانه نامحدود در نظر گرفتن دو سطح تابش توسط رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۴]. توزیع دما در طول میله سوخت در شکل ۳ نمایش داده شده است.

$$h_{rad} = \frac{\sigma}{\left[\frac{1}{\epsilon_f} + \left(\frac{r_{fs}}{r_{ci}} \right) \left(1 - \frac{1}{\epsilon_c} \right) \right]} (T_f^4 - T_c^4) \quad (2)$$

که در آن T_f و T_c به ترتیب دمای سطح غلاف و دمای سطح سوخت برحسب کلون می‌باشند. ϵ_f و ϵ_c نیز به ترتیب نشان‌دهنده قابلیت انتشار سطح غلاف و سوخت بوده و σ ثابت استفان-بولتزمن است.

۲.۱.۲ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی گاز درون گپ همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، افت دما در طول گپ بر اثر جابه‌جایی گاز بر اثر دو عامل رخ می‌دهد:

- افت دما بر اثر عبور از توده گاز. میزان این افت دما به جابه‌جایی حرارتی گاز بستگی دارد.
- افت دما در هر سطح بر اثر انتقال ناقص انرژی از گاز به سطح. به این افت دما، پرش دمایی^۱ می‌گویند.

با ترکیب این دو مفهوم، یک فرمول واحد به دست می‌آید. در این کار پهنای گپ بیش‌تر از مقدار واقعی در نظر گرفته می‌شود تا افت دمای ناشی از پرش دمایی را پوشش دهد؛ به میزان پهنای اضافه شده به گپ، فاصله پرش دمایی گفته می‌شود که در شکل ۴، با g_1 و g_2 نشان داده شده است [۵].

رابطه ۳ توسط راس و استوت برای محاسبه جابه‌جایی حرارتی گپ ارایه شد [۶]:

$$h_{gas} = \frac{k_{gas}}{d_{eff} + 1.8(g_f + g_c) - 1.397 \times 10^{-4} + d} \quad (3)$$

که در آن پهنای گپ، که توسط تحلیل مکانیکی به دست می‌آید، به ترتیب پرش دمایی سطح غلاف و سوخت برحسب متر می‌باشند. d_{eff} هنگام بسته بودن گپ برابر $\exp(-0.01125p)(R_f + R_c)$ و در صورت باز بودن آن برابر $(R_f + R_c)$ می‌باشد، که p فشار تماس سطح سوخت و

در ادامه برای محاسبه توزیع دما در سوخت، هدایت حرارتی گپ بین سوخت و غلاف مورد نیاز است که برای این کار می‌بایست دمای گاز، میزان گازهای آزاد شده، فشار گاز و پهنای گپ محاسبه شده باشند؛ این پارامترها از بخش تحلیل مکانیکی و تعیین میزان گاز آزاد شده به دست می‌آیند. با محاسبه دمای سطح سوخت و شرط صفر بودن مشتق دما نسبت به شعاع در مرکز سوخت، معادله انتقال حرارت به صورت یک بعدی و در راستای شعاعی برای گره محوری مشخص، حل می‌شود. معادله انتقال حرارت برای سوخت به صورت زیر است [۵]:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[rk \frac{dT}{dr} \right] + q''' = 0 \quad (7)$$

برای حل به روش المان محدود، رابطه ۷ به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{q'''}{k} = 0 \quad (8)$$

برای حل این معادله، توابع تقریب به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند (روش گلرکین):

$$N_i = \frac{r_j - r}{r_j - r_i}, \quad N_j = \frac{r - r_i}{r_j - r_i} \quad (9)$$

حال با توجه به توابع تقریب، میزان خطا برای یک المان به صورت زیر، برابر صفر قرار داده می‌شود:

$$R_i^e = \int_{r_i}^{r_j} N_i^e(r) \left\{ \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{q'''}{k} \right\} dr = 0 \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

با انجام محاسبات رابطه ۱۰ خواهیم داشت:

$$\frac{1}{L} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_i \\ T_j \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} 1 - \frac{r_j}{L} \ln \frac{r_j}{r_i} & \frac{r_j}{L} \ln \frac{r_j}{r_i} - 1 \\ \frac{r_i}{L} \ln \frac{r_j}{r_i} - 1 & 1 - \frac{r_i}{L} \ln \frac{r_j}{r_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_i \\ T_j \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\times \begin{pmatrix} T_i \\ T_j \end{pmatrix} + \frac{Lq'''}{2k} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = 0$$

که در نهایت برای یک المان محلی به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{1}{L} \begin{pmatrix} -r_i \ln \frac{r_j}{r_i} & r_i \ln \frac{r_j}{r_i} \\ r_i \ln \frac{r_j}{r_i} & -r_i \ln \frac{r_j}{r_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_i \\ T_j \end{pmatrix} = -\frac{Lq'''}{2k} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

در نقطه تماس بین سوخت و غلاف انتقال حرارت به صورت تماس جامد به جامد می‌باشد و بر همین اساس میزان انتقال حرارت از سوخت به غلاف افزایش یافته و در نتیجه دمای غلاف زیاد می‌شود؛ این افزایش دما باعث افزایش رشد لایه اکسید و کاهش مقاومت مکانیکی و در نهایت سوراخ شدن غلاف خواهد شد. از این رو از یک گپ حاوی گاز معین با انتقال حرارت بالا، که در برابر انتقال حرارت جامد به جامد نوعی عایق محسوب می‌شود، استفاده می‌کنند. بنابراین بحث جابه‌جایی حرارتی تماس سوخت و غلاف در هنگام بسته شدن گپ مطرح شده و برای محاسبه آن مدل‌های متنوعی ارائه شده است که همگی آن‌ها این انتقال حرارت را تابعی از فشار تماس بین سطح سوخت و غلاف، زبری سطح سوخت و غلاف، و متوسط ضریب هدایت حرارتی سوخت و غلاف تعریف می‌کنند. همان طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، با افزایش فشار تماس میزان نقاط تماس و سطح تماس افزایش پیدا می‌کند که موجب افزایش ضریب جابه‌جایی حرارتی می‌شود.

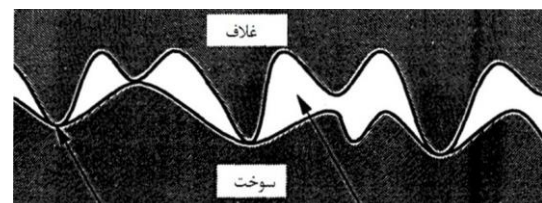
شکل کلی همه مدل‌های ارائه شده در این زمینه به صورت رابطه زیر است و فقط در ضرایب با یکدیگر تفاوت دارند [۵]:

$$h_{solid} = Ak_m F(L_i \text{ and } / \text{ or } R_i) \times (P/H)^n, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

در رابطه فوق $K_m = \frac{2 \times k_{fuel} \times k_{clad}}{(k_{fuel} + k_{clad})}$ ، فشار تماس P ، H معیار سختی مایر برحسب پاسکال می‌باشند. F تابعی از زبری سطح و یا طول موج، که به صورت فاصله دو قله در سطح زبر تعریف می‌شود، است و برای هر مدل می‌تواند متفاوت باشد. n و A اعداد ثابتی هستند که برای مدل‌های مختلف متفاوت می‌باشند. در کد تهیه شده از مدل میکس-تادرس اصلاح شده، که بیشترین تطابق را با داده‌های تجربی دارد، استفاده شده است [۵].

۳.۱.۲ محاسبه توزیع دما در سوخت

در یک مقطع محوری، توزیع دما در راستای شعاعی مطابق شکل ۳ است و با توجه به میزان نرخ تولید حرارت خطی و دمای توده سیال خنک‌کننده که ورودی محاسبات می‌باشند، به ترتیب دمای سطح غلاف، اختلاف دما در لایه اکسید شکل گرفته بر روی غلاف، توزیع دما درون غلاف، هدایت حرارتی گاز درون غلاف و در پایان توزیع دما درون سوخت محاسبه می‌شود. روابط استفاده شده برای این قسمت از محاسبات از کد برداشته شده است [۴].



شکل ۵. نمایش تماس و زبری سطح سوخت و غلاف.

در تحلیل مکانیکی کرنش تراکمی سوخت، که در ابتدای شرایط کاری به دلیل سینتر شدن مجدد سوخت به وجود می‌آید، از رابطه تجربی زیر استفاده می‌شود [۶]:

$$\varepsilon_D = \Delta\rho \cdot \left(e^{\frac{Bu \ln(\rho/\rho_0)}{C_D Bu_D}} - 1 \right) \quad (14)$$

در این رابطه ε_D کرنش بر اثر تراکم، $\Delta\rho$ بیشینه تراکمی که در سوخت می‌تواند رخ دهد (به صورت کسری از چگالی تئوری وارد می‌باشد)، Bu_D میزان مصرف سوختی که در آن تراکم سوخت پایان می‌پذیرد برحسب MW day /kg-u است. C_D برای دمای سوخت کم‌تر از ۷۵۰ درجه سلسیوس به صورت $C_D = 7.2 - 0.0086(T - 25)$ محاسبه می‌شود و برای بیش‌تر از این دما برابر یک در نظر گرفته می‌شود.

برای محاسبه جمله کرنش تورم ناشی از تجمع پاره‌های شکافت نیز از روابط تجربی زیر استفاده می‌شود [۶]:

$$\Delta\varepsilon_{sw-s} = 7.435 \times 10^{-12} \rho \Delta Bu \quad (15)$$

$$\Delta\varepsilon_{sw-g} = 2.617 \times 10^{-29} \cdot \Delta Bu \cdot \rho (2800 - T)^{1.37} \cdot e^{(-7.0162 \cdot (2800 - T))} \cdot e^{(-2.431 \cdot 10^{-11} \cdot \rho Bu)} \quad (16)$$

در روابط بالا $\Delta\varepsilon_{sw-s}$ نرخ کرنش تورم حجمی بر اثر پاره‌های شکافت جامد، $\Delta\varepsilon_{sw-g}$ نرخ کرنش تورم حجمی بر اثر پاره‌های شکافت گازی، ΔBu بازه مصرف سوخت که تورم در آن محاسبه می‌شود، ρ چگالی سوخت برحسب kg/m³ و دما برحسب کلوین می‌باشد. در نهایت برای محاسبه کرنش ناشی از رشد خزشی غلاف نیز از رابطه تجربی زیر، که اصلاح شده رابطه موجود در کد FRAPCON است، استفاده شده است [۷.۸]:

$$\dot{\varepsilon}_c = f_1(\sigma_\theta) f_2(T) f_3(\phi t) t^{-1/5} \quad (17)$$

در رابطه بالا $\dot{\varepsilon}_c$ نرخ کرنش خزشی، ϕ فلاکس نوترون‌های سریع برحسب n/m².s، t زمان برحسب ساعت، σ_θ تنش مماسی برحسب MPa و T دما برحسب کلوین می‌باشد.

۲.۲.۲ محاسبه جابه‌جایی توسط اصل کار مجازی اصل کار مجازی به این صورت بیان می‌شود که اگر یک جسم به وسیله یک جابه‌جایی مجازی در تعادل باشد، تغییرات در انرژی کرنش تولیدشده برابر تغییرات کار خارجی تمام نیروها می‌باشد. این اصل به صورت ریاضی به شکل زیر بیان می‌شود [۹]:

$$\int_V \sigma : \delta \varepsilon dV = + \int_S f_s \delta u dS \quad (18)$$

رابطه بالا را می‌توان برای تمام المان‌ها گسترش داد و به یک دستگاه معادلات خطی رسید که با حل آن میزان دما در گره‌ها به دست می‌آید. برای حل این دستگاه شرایط مرزی به صورت زیر است:

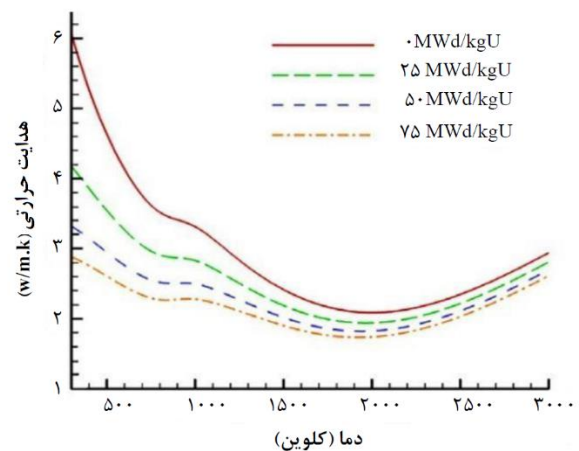
$$T_{Fuel_surface} = cte \quad \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{fuel_center} = 0 \quad (13)$$

برای تعیین مقدار ضریب هدایت حرارتی سوخت در ابتدا برای سوختی که تحت تابش قرار نگرفته است، ضریب هدایت ارایه می‌شود. سپس با اعمال ضرایب تصحیح، ضریب هدایت حرارتی سوخت برای شرایط کاری راکتور و سوخت تابش دیده محاسبه می‌شود.

مدل مورد استفاده در این برنامه مدل ارایه شده توسط لاکوتا^۱ است که توسط اغلب کدهای هسته‌ای (از قبیل FRAPCON, FROBA و ...) مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۶ اثر مجموع این ضرایب را در دماها و مصرف سوخت های متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، با افزایش مصرف سوخت ضریب هدایت کاهش پیدا می‌کند.

۲.۲ شبیه‌سازی رفتار مکانیکی میله سوخت

در تحلیل مکانیکی، عملکرد مکانیکی میله سوخت تحت بارهای مرزی (فشار گاز درون گپ بین سوخت و غلاف و فشار ناشی از خنک‌کننده) و بارهای بدنه مانند بارهای ناشی از تنش‌های حرارتی و کرنش‌های ناشی از تورم، تراکم سوخت و خزش در غلاف پرداخته می‌شود. با استفاده از این پدیده‌ها و جمع‌بندی اثرات آن‌ها روی شعاع سوخت و غلاف، میزان پهنای گپ و وقوع آسیب تماس سوخت و غلاف محاسبه می‌شود.



شکل ۶. نمایش ضریب هدایت حرارتی سوخت در دماها و مصارف سوخت مختلف [۷].

۱.۲.۲ کرنش تورمی، تراکمی و خزشی سوخت

با قرار دادن رابطه ۲۴ در رابطه ۲۳ و حذف جابه‌جایی مجازی از طرفین برای یک المان سوخت رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\int_{r_i}^{r_j} \begin{pmatrix} -1 & \left(1 - \frac{r_j}{r}\right) \\ \frac{1}{r_j - r_i} & \frac{1}{r_j - r_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu \\ \nu & 1-\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ \frac{1}{r_j - r_i} & \frac{1}{r_j - r_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ u_j \end{pmatrix} 2\pi r dr =$$

$$\int_{r_i}^{r_j} \begin{pmatrix} \mathcal{E}_r^{n,elas} \\ \mathcal{E}_\theta^{n,elas} \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu \\ \nu & 1-\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ \frac{1}{r_j - r_i} & \frac{1}{r_j - r_i} \end{pmatrix} 2\pi r dr = \quad (25)$$

در این حل، تنها کرنش غیرالاستیک در نظر گرفته شده، کرنش حرارتی می‌باشد و مقدار آن برای راستای شعاعی و مماسی یکسان در نظر گرفته می‌شود. (جمله کرنش غیرالاستیک می‌تواند شامل کرنش پلاستیک و کرنش ناشی از خزش نیز باشد که در این مقاله در نظر گرفته نشده است). با اعمال این فرضیات در نهایت برای یک المان رابطه زیر حاصل می‌شود ($L=r_j-r_i$):

$$\frac{1}{L} \begin{pmatrix} -L^2 + (1+\nu)r_j^2 \ln\left(\frac{r_j}{r_i}\right) & (\nu-1) \times r_j r_i \ln\left(\frac{r_j}{r_i}\right) \\ (\nu-1) \times r_j r_i \ln\left(\frac{r_j}{r_i}\right) & -L^2 + (1+\nu)r_j^2 \ln\left(\frac{r_j}{r_i}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ u_j \end{pmatrix} = \alpha_i T_i \begin{pmatrix} -r_i \\ r_j \end{pmatrix} \quad (26)$$

رابطه ۲۶ را می‌توان برای تمام المان‌ها گسترش داد و دستگاه معادله خطی تولید شده را با استفاده از شرایط مرزی حل نمود. شرایط مرزی برای سوخت به صورت زیر می‌باشد:

- جابه‌جایی مرکز سوخت توپر برابر صفر $u_1=0$
- تنش سطح سوخت برابر فشار گاز $\sigma_{r(\text{surface})}=P_{\text{gas}}$ است که می‌بایست به صورت معادله جابه‌جایی نوشته شود. برای این کار، از قانون هوک و معادله همسازی کرنش شکل نهایی شرط مرزی به صورت زیر حاصل خواهد شد (برای غلاف نیز به‌طور مشابه به دست می‌آید):

$$(1-\nu) \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta r} + \nu \frac{u_i}{r_i} = (1+\nu) \left[-\frac{P_{\text{gas}}}{E} (1-2\nu) + \alpha_i T_i \right] \quad (27)$$

برای غلاف هر دو شرط مرزی به صورت مشابه با شرط دوم سوخت به دست می‌آیند:
تنش سطح داخلی برابر فشار گاز داخل گپ

در رابطه بالا V حجم سیستم، S سطح، $\delta\mathcal{E}$ تانسور کرنش مجازی، $\delta\mathcal{V}$ جابه‌جایی مجازی و f_s نیروهای سطحی وارده به جسم هستند. سیستم موردنظر برای حل و اعمال اصل کار مجازی استوانه‌ای بوده و با اعمال شرایط مرزی می‌توان آن را هم برای سوخت و هم برای غلاف مورد استفاده قرار داد. برای حل رابطه ۱۸ از راستای محوری صرف‌نظر کرده و فقط کرنش‌های شعاعی و مماسی در نظر گرفته می‌شوند. میزان کرنش در سیستم را می‌توان مجموع کرنش الاستیک و غیرالاستیک در نظر گرفت [۱۰]:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}^{elas} + \mathcal{E}^{n,elas} \quad (19)$$

رابطه تنش و کرنش را برای حالت الاستیک می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۱، ۱۲]:

$$\sigma = D \mathcal{E}^{elas} \quad (20)$$

که در آن D ماتریس الاستیسیته می‌باشد که برای سوخت ترک‌نخورده به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu \\ \nu & 1-\nu \end{pmatrix} \quad (21)$$

با قرار دادن رابطه ۲۱ در رابطه ۲۰ و سپس قرار دادن معادله حاصل در رابطه ۱۸، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\int_{r_i}^{r_j} \mathcal{E} D \delta\mathcal{E} 2\pi r dr = \int_{r_i}^{r_j} \mathcal{E}^{n,elas} D \delta\mathcal{E} 2\pi r dr \quad (22)$$

با قرار دادن روابط $\mathcal{E}_\theta = \frac{u}{r}$ و $\mathcal{E}_r = \frac{du}{dr}$ در رابطه ۲۲، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\int_{r_i}^{r_j} \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{u}{r} \end{pmatrix}^t D \begin{pmatrix} \frac{\partial \delta v}{\partial r} \\ \frac{\delta v}{r} \end{pmatrix} 2\pi r dr = \int_{r_i}^{r_j} \begin{pmatrix} \mathcal{E}_r^{n,elas} \\ \mathcal{E}_\theta^{n,elas} \end{pmatrix}^t D \begin{pmatrix} \frac{\partial \delta v}{\partial r} \\ \frac{\delta v}{r} \end{pmatrix} 2\pi r dr \quad (23)$$

رابطه بالا برای یک المان شعاعی نوشته شده است که برای این المان بردار کرنش را می‌توان به صورت زیر نوشت:

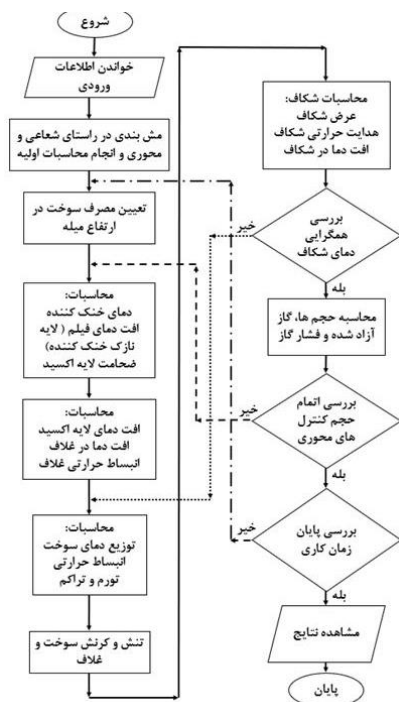
$$\begin{pmatrix} \mathcal{E}_r \\ \mathcal{E}_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{u}{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{u_j - u_i}{r_j - r_i} \\ \left(\frac{1 - \frac{r_j}{r}}{r_i - r_j} u_i + \frac{1 - \frac{r_i}{r}}{r_j - r_i} u_{i+1} \right) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ \frac{1}{r_j - r_i} & \frac{1}{r_j - r_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ u_j \end{pmatrix} \quad (24)$$

در این رابطه ϕ شار نوترون‌های سریع برحسب (n/cm².s) و Q_p انرژی فعال‌سازی است که برابر ۲۷۳۵۴ کالری بر مول می‌باشد. در شکل ۷ روندنمای ۱ کد و مراحل انجام محاسبات نمایش داده شده است.

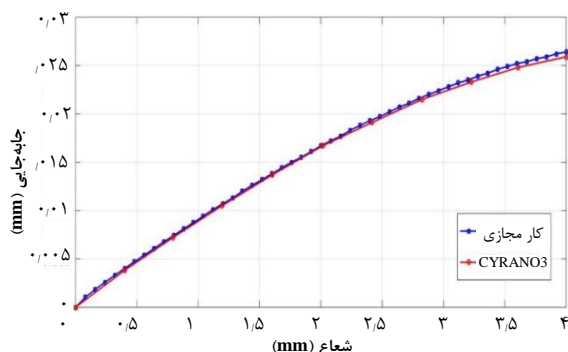
۳. نتایج

۳.۱ صحت‌سنجی تحلیل مکانیکی

برای بررسی صحت تحلیل مکانیکی، از مقایسه نتایج به‌دست آمده با نتایج گیوچرت و همکاران که کد CYRANO3 را به‌کار برده‌اند، استفاده می‌شود [۱۵]. روش حل این برنامه جایگذاری معادلات تعادل، معادله سازگاری کرنش و هم‌چنین قانون هوک در یکدیگر و حل معادله حاصل به روش تحلیلی می‌باشد. بر همین اساس برای مقایسه روش برنامه CYRANO3 با روش مورد استفاده در پژوهش حاضر، با اعمال ورودی‌های یکسانی که در جدول ۱ ارائه شده، نتایج این دو روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج این مقایسه با تعداد ۵۰ گره بر روی یک نمودار در شکل ۸ رسم شده است.



شکل ۷. روندنمای کد IR-FRA



شکل ۸. نمایش جابه‌جایی محاسبه شده از دو روش برحسب شعاع سوخت.

$$(1-\nu) \frac{u_r - u_1}{\Delta r} + \nu \frac{u_r}{r_r} = (1+\nu) \left[\frac{P_i}{E} (1-2\nu) + \alpha_i T_r \right] \quad (28)$$

تنش سطح خارجی غلاف برابر فشار خنک‌کننده

$$(1-\nu) \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta r} + \nu \frac{u_i}{r_i} = (1+\nu) \left[-\frac{P_{coolant}}{E} (1-2\nu) + \alpha_i T_i \right] \quad (29)$$

۳.۲ محاسبه ضخامت لایه اکسید

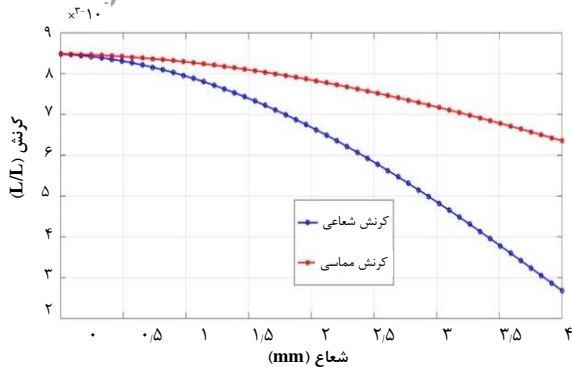
آلیاژهای زیرکونیم به‌دلیل داشتن خصوصیات موردنیاز برای ساخت میله‌های سوخت راکتورهای اتمی به‌طور گسترده در این زمینه کار می‌روند، تشکیل لایه اکسید زیرکونیم بر روی سطح تماس بین خنک‌کننده و میله سوخت، باعث کاهش مقاومت مکانیکی میله‌های سوخت، کاهش بازده حرارتی راکتور از طریق ایجاد محدودیت بر روی دمای ورودی خنک‌کننده و اعمال محدودیت بر روی ویژگی‌های شیمیایی خنک‌کننده می‌شود [۱۳]. خوردگی در آلیاژهای زیرکونیم در محیط آبی عموماً به‌دلیل اکسیدشدن زیرکونیم توسط اکسیژن موجود در خنک‌کننده، اکسیژن حل‌شده در زیرکونیم و یا اکسیژن تولید شده از طریق رادیولیز آب صورت می‌پذیرد. فلز زیرکونیم توانایی حل شدن مقدار بسیار ناچیزی اکسیژن را دارد که در صورت عبور از حد مشخص ZrO_2 بر روی فلز تشکیل می‌شود [۱۴]. اکسید تشکیل‌شده همانند لایه عایق عمل کرده و مانع از اکسیدشدن بیش‌تر فلز می‌شود. برای محاسبه میزان رشد لایه اکسید در مرحله پیش از زمان گذر و زمانی که میزان رشد لایه اکسید از نرخ مکعبی پیروی می‌کند، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{d(s^r)}{dt} = \frac{A}{s^r} \exp\left(\frac{-Q_1}{RT_1}\right) \quad (30)$$

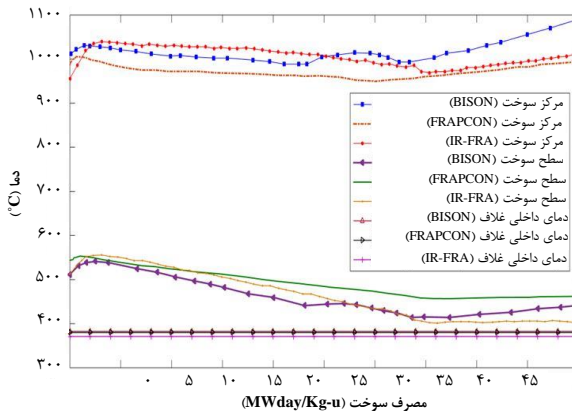
که در آن S میزان ضخامت لایه اکسید برحسب متر، t زمان بر حسب روز، A ثابت با مقدار 6×10^9 متر مکعب بر روز، انرژی فعال‌سازی با مقدار ثابت ۳۲۲۸۹ کالری بر مول، R ثابت با مقدار ۱/۹۸ کالری بر مول بر کلوین و T_1 دمای سطح مابین لایه اکسید و غلاف برحسب کلوین می‌باشد.

پس از رسیدن به ضخامت مشخص که زمان گذر بین مراحل بوده و برای آلیاژهای مختلف زیرکونیم متفاوت می‌باشد (به‌عنوان مثال برای زیرکالوی-۴ ضخامت زمان گذر بین مراحل ۲ میکرومتر می‌باشد) از رابطه زیر استفاده می‌شود [۴]:

$$\frac{ds}{dt} = \left\{ 1186 + 3.5e4(1.91e - 15\phi)^{2.4} \right\} \exp\left(\frac{-Q_2}{RT_1}\right) \quad (31)$$



شکل ۱۰. نمایش کرنش شعاعی و مماسی در سوخت برحسب شعاع.



شکل ۱۱. مقایسه نتایج تحلیل حرارتی.

جدول ۲. ورودی‌های مورد استفاده در برنامه برای صحت‌سنجی حرارتی.

پارامتر	مقدار
متوسط توان خطی	۲۰۰ w/cm
ضریب هدایت خنک‌کننده	۷۵۰۰ W/m ² K
فشار خنک‌کننده	۱۵٫۵ MPa
دمای ورودی خنک‌کننده	۲۵۷ °C
فشار اولیه گاز	۲ MPa
طول فعال میله سوخت	۱٫۱۹m
بیشینه تراکم سوخت	۱٪ of theoretical density
قطر میله سوخت	۰٫۹۵cm
شعاع قرص سوخت	۳٫۷۸۵mm
پهنای گپ	۸۰ μm
ضخامت غلاف	۰٫۵۷mm

۳٫۳ شبیه‌سازی رفتار میله سوخت راکتور VVER1000 برای مشاهده رفتار میله سوخت راکتور VVER1000 مطابق جدول ۳ فایل ورودی برای برنامه تولید می‌شود. تعداد گره‌های محوری ۱۰ و تعداد گره‌های شعاعی ۵۰ می‌باشد.

در شکل ۱۲ میزان ضریب انحراف از توان خطی میانگین در طول میله نمایش داده شده است. برای انجام محاسبات از مقدار متوسط ضرایب در ابتدا و انتهای سیکل کاری راکتور VVER1000 استفاده می‌شود و با ضرب این ضرایب توزیع توان محوری حاصل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، بیشینه نرخ تولید توان در گره شماره ۴ می‌باشد؛ این گره به‌عنوان گره بحرانی انتخاب شده و نتایج تحلیل مکانیکی و

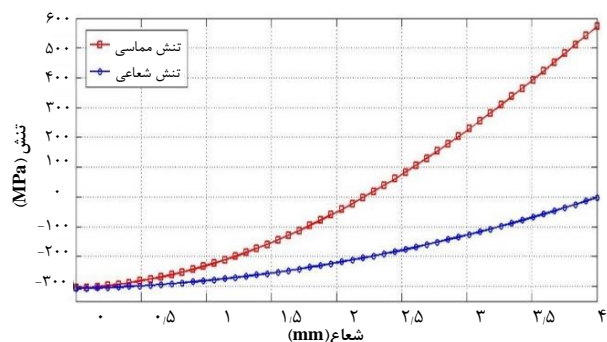
همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود جابه‌جایی محاسبه‌شده کاملاً با یکدیگر مطابقت داشته و بیشینه خطای نسبی بین دو منحنی کم‌تر از یک درصد بوده و از این‌رو روش استفاده شده مورد تأیید می‌باشد. در ادامه سایر نتایج از قبیل تنش شعاعی و مماسی و هم‌چنین کرنش شعاعی و مماسی که از میزان جابه‌جایی به‌دست آمده قابل محاسبه می‌باشند به-ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، تقریباً نیمی از سوخت تحت تنش مماسی منفی (فشاری) و نیمی دیگر تحت تنش مماسی مثبت (کششی) قرار گرفته است که علت آن تغییر گرادیان دما در طول سوخت می‌باشد. به‌همین دلیل در شرایط واقعی و کاری راکتورها، قرص سوخت به‌دلیل شکننده بودن در قسمت تحت کشش دچار ترک می‌شود.

۲.۴ صحت‌سنجی تحلیل حرارتی

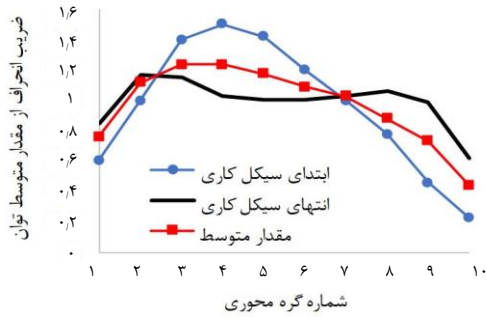
برای صحت‌سنجی تحلیل حرارتی از نتایج ویلیامسون و کد Frapcon استفاده شده است [۱۶]. پارامترهای ورودی در جدول ۲ ارایه شده است. در شکل ۱۱ دمای مرکز سوخت، دمای سطح سوخت و دمای داخلی غلاف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست آمده با یکدیگر مطابق بوده و بیشینه خطا در کل فرایند شبیه‌سازی کم‌تر از ۸ درصد می‌باشد. دلیل این اختلاف ناشی از اختلاف در مدل‌های به‌کار رفته برای هدایت حرارتی، خزش سوخت و محاسبه ضخامت لایه اکسید می‌باشد. صحت‌سنجی انجام‌شده علاوه بر این‌که نشان‌دهنده صحت تحلیل حرارتی به‌کار رفته است، حل همزمان تحلیل حرارتی و مکانیکی کد نوشته شده را نیز تأیید می‌کند.

جدول ۱. ورودی‌های مورد استفاده در دو روش مقایسه‌شده برای قرص سوخت.

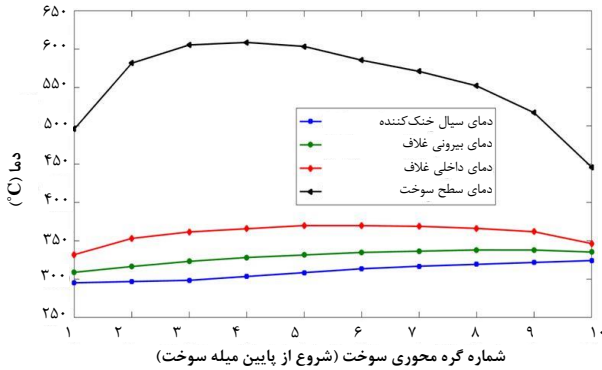
پارامتر	مقدار
پروفایل دمای اعمال شده	$T = -35r^2 - 10r + 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$
سوخت توپر با شعاع خارجی	۴ (mm)
مدول یانگ	$E(T) = 2,29 \times 10^5 (1 - 1,4 \times 10^{-4} (T - 20)) \text{ (MPa)}$
ضریب انبساط حرارتی	$\alpha = \frac{-1,723 \times 10^{-7} + 6,797 \times 10^{-9} T + 2,896 \times 10^{-11} T^2}{\Delta T} \text{ (} ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$
فشار سطح خارجی	$P_{\text{gas}} = 2,5 \text{ (MPa)}$



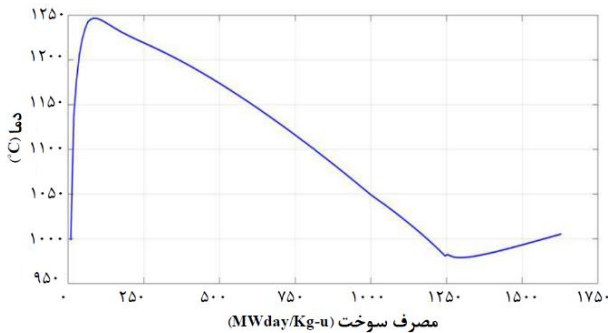
شکل ۹. نمایش تنش شعاعی و مماسی در سوخت برحسب شعاع.



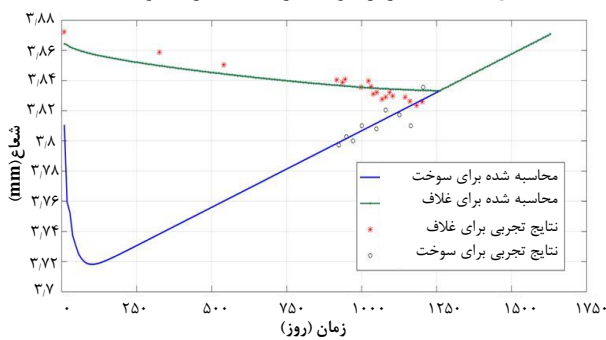
شکل ۱۲. توزیع توان در ارتفاع میله سوخت.



شکل ۱۳. توزیع دما در ارتفاع میله سوخت.



شکل ۱۴. دمای مرکز سوخت برحسب مصرف سوخت.



شکل ۱۵. شعاع سوخت و غلاف بر حسب مصرف سوخت.

در شکل ۱۶ تنش محوری و مماسی در غلاف برحسب زمان برای گره میانی در ارتفاع میله سوخت ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود قبل از تماس سوخت و غلاف، غلاف تحت تنش فشار بوده و بعد از آن، غلاف تحت تنش کششی قرار گرفته است.

در شکل ۱۷ ضخامت لایه اکسید تشکیل شده بر روی غلاف برحسب زمان نمایش داده شده است. زمان گذر بین

حرارتی برای آن ارایه شده است (شماره‌گذاری گره‌ها از پایین میله صورت می‌گیرد).

در شکل ۱۳ توزیع دمای توده سیال، سطح داخلی و خارجی غلاف و دمای سطح سوخت در ارتفاع میله سوخت نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای سطح سوخت رفتاری مشابه رفتار نرخ تولید حرارت خطی وارده شده را داراست. دمای سیال خنک‌کننده مطابق شکل در پایین میله سوخت ۲۹۱ درجه سانتی‌گراد بوده و در طول میله سوخت افزایش پیدا می‌کند. بیشینه دمای سیال خنک‌کننده در بالای میله سوخت (در گره محوری ۱۰) ۳۲۴ درجه سانتی‌گراد توسط کد محاسبه شده است.

تغییرات دمای مرکز سوخت برحسب مصرف سوخت در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. در ابتدای شرایط کاری راکتور به دلیل تراکم سوخت میزان گپ مابین سوخت و غلاف افزایش پیدا می‌کند. متعاقب آن هدایت حرارتی گاز درون گپ کاهش پیدا کرده و دمای مرکز سوخت افزایش می‌یابد. با از بین رفتن اثر تراکم، سوخت متورم شده و طول گپ کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه دمای سوخت کاهش پیدا می‌کند. در نهایت با بسته شدن گپ، بر اثر کاهش تدریجی کیفیت سوخت و کاهش هدایت حرارتی افزایش دما مشاهده می‌شود.

در شکل ۱۵ شعاع سوخت و غلاف محاسبه شده و همچنین نتایج تجربی موجود در منابع برای مقایسه قرار داده شده است و با استفاده از آن می‌توان به درستی محاسبات انجام شده پی برد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سوخت و غلاف در روز ۱۲۵۰ (معادل مصرف سوخت MWday/kg-u ۵۰/۸) با یکدیگر تماس پیدا کرده و گپ بین سوخت و غلاف از بین می‌رود. این تماس در ادامه منجر به وقوع نقص در میله سوخت می‌شود. با انجام شبیه‌سازی با شرایط جدول ۳ توسط کد FRAPCON، زمان تماس سوخت و غلاف ۱۰۲۵ روز محاسبه می‌شود، که خطای به‌وجود آمده ناشی از مدل‌های مختلف در نظر گرفته شده از قبیل، خزش، تراکم و تورم سوخت است.

جدول ۳. ورودی‌های مورد استفاده در برنامه [۱۷].

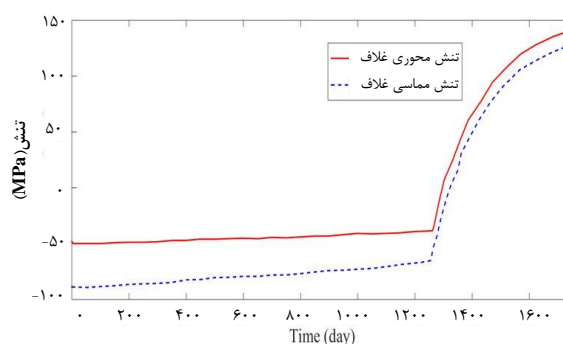
پارامتر	مقدار
متوسط توان خطی	۱۷۰ w/cm
متوسط دبی جرمی سیال خنک‌کننده	$2850 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$
فشار خنک‌کننده	۱۵٫۷ MPa
دمای ورودی خنک‌کننده	۲۹۱ °C
فشار اولیه گاز	۲ MPa
طول فعال میله سوخت	۳٫۵۸ m
بیشینه تراکم سوخت	۲/۸ of theoretical density
قطر میله سوخت	۹٫۱mm
قطر قرص سوخت	۳۷۸۵mm
پهنای گپ	۸۰ μm
حجم گاز در بالای میله سوخت	$1,8282e-5 \text{ m}^3$

4. N. R. Commission, "FRAPCON-3: A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup," vol. 2, (1997).
5. Lanning, D.D., Hann, C.R, *Review of Methods Applicable to the Calculation of Gap Conductance in Zircaloy-Clad UO₂ Fuel Rods.. Battelle Pacific Northwest Labs, Washington*, (1975).
6. J.B. Aniscough, *Gap Conductance in Zircaloy Clad LWR Fuel Rods. United Kingdom Atomic Energy*, (1982).
7. R. Williamson, "Enhancing the ABAQUS thermomechanics code to simulate multipellet steady and transient LWR fuel rod behavior," *J. Nucl. Mater.*, vol. 415, pp. 74–83, Aug. (2011).
8. Herranz, L.E., Fera, F., *Extension of the FRAPCON-3.3 creep model to dry storage conditions. Prog. Nucl. Energy* 52 (7), 634–639, 2010.
9. Rivera, J.E., *Performance of light water reactor fuel rods during plant power changes, in Department of Nuclear Engineering. MIT university*, 1981.
10. I. National and I. Falls, "Volume IV SCDAP / RELAP5 / MOD3 . 1 Code Manual Volume IV: MATPRO -- A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis," vol. IV.
11. M. Safari et al. "Numerical study of hyperstoichiometric fuel creep (UO_{2+x}) in fuel clad interaction of WWER1000," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 133, pp. 950–959, (2019).
12. M. Imani et al. "Numerical study of fuel-clad mechanical interaction during long-term burnup of WWER1000," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 80, pp. 267–278, (2015).
13. Y. Jiang et al. "Three-dimensional FE analysis of the thermal-mechanical behaviors in the nuclear fuel rods," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 38, pp. 2581–2593, Nov. (2011).
14. T. Allen et al. "Corrosion of Zirconium Alloys," *Compr. Nucl. Mater.*, vol. 5, pp. 49–68, Dec. (2012).
15. "Waterside corrosion of zirconium alloys in nuclear power plants," *IAEA-TECDOC-996*, (1998).
16. R. L. Williamson, "Simulation of NGNP Fuel Using the BISON Fuel Performance Code: 2010 Progress Report," *INL/EXT-11-21403* (2011).
17. "BUSHEHR VVER-1000 reactor Final Safety Analysis Report of Bushehr Nuclear Power Plant (FSAR of BNPP-1)". Chapter 4. *Ministry of Russian Federation of Atomic Energy, Moscow*, (2003).

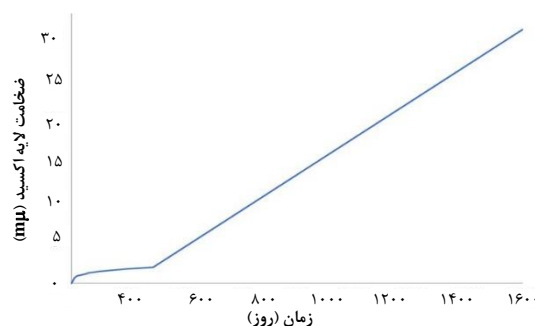
مراحل تشکیل لایه اکسید ۲۹۰ روز می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از این زمان، لایه اکسید به‌طور خطی افزایش پیدا می‌کند.

۴. نتیجه‌گیری

کد تحلیل مکانیکی و حرارتی ارایه شده در مقاله با عنوان IR-FRA ابزار مناسبی جهت تحلیل میله سوخت می‌باشد. با استفاده از این کد می‌توان پارامترهای حرارتی و مکانیکی سوخت و غلاف را برحسب زمان و در ارتفاع میله محاسبه کرده و زمان تماس قرص و غلاف را پیش‌بینی نمود. با شبیه‌سازی میله سوخت راکتور VVER1000 زمان تماس قرص و غلاف در روز ۱۲۵۰ در شرایط پایا محاسبه شد.



شکل ۱۶. تنش محوری و مماسی در غلاف برحسب زمان.



شکل ۱۷. شعاع سوخت و غلاف برحسب مصرف سوخت.

مراجع

1. Dyk, Š and Zeman, V, "Evolution of grid-to-rod fretting of nuclear fuel rods during burnup," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 108, pp. 160–168, (2018).
2. H. Aybar and P. Ortego, "A review of nuclear fuel performance codes," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 46, pp. 127–141, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.pnucene.2005.01.004.
3. R. L. Williamson and S. R. Novascone, "Application of the BISON Fuel Performance Code to the FUMEX-III Coordinated Research Project," *no. April*, (2012).

استناد به این مقاله

مرتضی ایمانی، مهدی آقایی، محمد عماد عادلخواه، احمدرضا ذوالفقاری، عبدالحمید مینوچهر (۱۴۰۰)، تحلیل عددی رفتار ترمومکانیکی میله سوخت (UO₂) در حالت پایا با استفاده از روش المان محدود، ۹۵، ۳۹–۳۰

DOI: 10.24200/nst.2021.1182

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1182.html