



تحلیل افت رسانندگی گرمایی سوخت پرتو دیده‌ی UO_2 به دلیل تولید تخلخل در میزان مصرف بالای سوخت

بهاره روستایی^۱، حسین کاظمی نژاد^{۲*}، صمد خاکشورنیا^۳

۱. پژوهشکده‌ی راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران
۲. پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۴۸۶-۱۳۶۵، تهران - ایران
۳. پژوهشکده‌ی فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

چکیده: یکی از عامل‌های تغییر رسانندگی گرمایی سوخت UO_2 ، تخلخل به وجود آمده در سوخت حین افزایش میزان مصرف سوخت است. در میزان مصرف‌های بالای سوخت، ساختاری موسوم به ناحیه‌ی لبه (rim) که ناشی از فرایند تهی شدن شبکه‌ی سوخت از گاز زنون، تولید تخلخل و باز تبلور دانه‌های سوخت است، به وجود می‌آید که به نوبه‌ی خود رسانندگی گرمایی سوخت را دست‌خوش تغییر می‌کند. در این مقاله با استفاده از یک مدل تورم شبکه‌ی سوخت ناشی از گاز شکافت که در محدوده‌ی دما-پایین و میزان مصرف بالای سوخت معتبر است و نیز با در نظر گرفتن اثر باز تبلور ناشی از تابش دهی سوخت UO_2 ، تورم شبکه‌ی سوخت محاسبه می‌شود و مقدار تخلخل کل تا میزان مصرف سوخت 120 MWd/kgU تعیین می‌شود. برای مطالعه‌ی اثر شکل‌گیری تخلخل بر روی رسانندگی گرمایی سوخت UO_2 تابش دیده، رابطه‌ی تجربی رسانندگی گرمایی هالدين انتخاب شده است که با یک ضریب تصحیح تخلخل پیشنهاد شده، ترکیب می‌شود. این ضریب تخلخل براساس ریخت‌شناسی سه فازی سوخت تابش دیده توسعه می‌یابد، که شامل تخلخل‌های بدون سهم در تورم شبکه‌ی سوخت و تخلخل‌های درشت ناشی از حباب‌های مرزخانه‌ای سهم در تورم شبکه‌ی سوخت است و فرض می‌شود به صورت یکنواخت در ماده‌ی سوخت چگال، متشکل از شبکه‌ی سوخت UO_2 و محصول‌های جامد شکافت پراکنده شده باشد. با در نظر گرفتن تحول تخلخل با مصرف سوخت، کاهش در حدود ۲۵٪ در رسانندگی گرمایی سوخت UO_2 در محدوده‌ی میزان مصرف سوخت موضعی 120 MWd/kgU مشاهده می‌شود که افزایش موضعی دمای سوخت را در بر خواهد داشت.

کلیدواژه‌ها: افت رسانندگی گرمایی، سوخت پرتو دیده، تخلخل، تورم شبکه

Analysis of Thermal Conductivity Degradation in Irradiated UO_2 Fuel Due to Porosity Formation at High Burnup

B. Roostai¹, H. Kazeminejad^{2*}, S. Khakshournia³

1. Nuclear Reactor and Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14395-836, Tehran-Iran
2. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran-Iran
3. Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran-Iran

Abstract: One of the factors that changes the UO_2 fuel thermal conductivity is the generated porosity in the fuel due to increasing burnup. At high burnups, the structure known as rim region, is created. This is due to the Xe depletion process from the fuel matrix, porosity formation, and fuel grain recrystallization, which in turn change the fuel thermal conductivity. In this paper by the use of existing low temperature high burnup fission gaseous swelling model with the progressive recrystallization for UO_2 fuel, the matrix swelling terms are calculated and the evolution of the total volume porosity up to burnup of 120 MWd/kgU is estimated. For the study the effect of porosity formation on the irradiated UO_2 thermal conductivity, the HALDEN correlation of the thermal conductivity is selected. Then, a porosity correction factor is developed based on an assumption that the fuel morphology is a three-phase type consisting of the pores, with no contribution to the matrix swelling and large pores due to intergranular bubbles with the contribution to matrix swelling dispersed in the fully dense material, composed of UO_2 matrix and solid fission products. The predicted thermal conductivity, based on the present porosity correction factor, demonstrates an additional degradation of 25% due to porosity formation at the burnup levels around 120 MWd/kgU causing an increase in the fuel temperature.

Keywords: Thermal Conductivity Degradation, Irradiated Fuel, Porosity, Matrix Swelling



۱. مقدمه

ناحیه‌ی لبه‌ی UO_2 (ناحیه‌ای از سوخت که در آن تغییرات ریزساختاری به صورت ریز شدن دانه‌های اولیه و درشت شدن تخلخل‌ها به علت میزان مصرف سوخت بالا، مشاهده می‌شود) بر روی کاهش رسانندگی گرمایی را با فرض این که همه‌ی اتم‌های گاز تولید شده، در تخلخل‌های این ناحیه باقی بماند مورد مطالعه قرار دادند و با استفاده از رابطه‌ی رسانندگی گرمایی هالدین^(۱۰)، کاهش ۲۰٪ رسانندگی گرمایی در ناحیه‌ی لبه‌ی قرص سوخت را نتیجه گرفتند. اخیراً، لمس و همکاران [۱۱] براساس مقادیرهای تجربی به دست آمده توسط اسپینو و همکاران [۱۲]، برای تخلخل سوخت UO_2 یک عبارت تجربی را به صورت تابعی از میزان مصرف سوخت موضعی در محدوده‌ی ۶۰ تا ۳۰۰ MWd/kgU با در نظر گرفتن اثرهای احتمالی برهم کنش مکانیکی غلاف و قرص سوخت، توسعه داده‌اند.

در کار دیگری اسپینو و همکاران [۱۳] رابطه‌ای را برای تورم کلی شبکه‌ی سوخت به دست آوردند که مرتبط با چگالی و تخلخل توده‌ی سوخت است. در این کار، آن‌ها با محاسبه‌ی تورم کلی شبکه و اندازه‌گیری چگالی توده‌ی سوخت، تحول تخلخل در سوخت UO_2 تابش‌دهی شده را برحسب میزان مصرف سوخت تعیین کردند. اما نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که تخلخل معرفی شده در کار اسپینو در حقیقت تخلخلی (حجم خالی)^(۱۱) است که سهمی از تورم شبکه‌ی سوخت ندارد در صورتی که تورم شبکه‌ی ناشی از حباب‌های گاز شکافت در تولید تخلخل کل سهم است و می‌تواند به صورت جمله‌ای به سهم تخلخل (حجم خالی) اضافه شود. کار اسپینو، باعث ایجاد انگیزه شد تا در این مقاله رابطه‌ای برای تخلخل حجمی کل سوخت تابش‌دهی شده، متشکل از دو بخش تخلخل و تخلخل تورمی فراهم شود. هم‌چنین در این مقاله سعی شده است، اثر تخلخل بر روی رسانندگی گرمایی شبکه‌ی سوخت UO_2 به طور کمی تعیین شود. برای دستیابی به این مهم، از مدل تخمین تخلخل اسپینو و همکاران [۱۳] و مدل رست [۲، ۴، ۵] برای محاسبه‌ی تورم همراه با باز تبلور شبکه‌ی سوخت UO_2 استفاده شده است. البته کار اسپینو فاقد مدلی برای باز تبلور است. سپس به عنوان یک مورد مطالعاتی، رابطه‌ی رسانندگی گرمایی هالدین [۱۴] برای سوخت UO_2 انتخاب و با یک ضریب تخلخل توسعه‌یافته از روش تحلیلی به کار رفته در کد DART ترکیب شده است.

رسانندگی گرمایی یکی از مهم‌ترین خواص سوخت هسته‌ای است که تأثیر زیادی روی دمای کاری، کارایی و رفتار سوخت دارد. در کل رسانندگی گرمایی نسبتاً پایین سوخت UO_2 تحت تأثیر عامل‌هایی نظیر دما، تخلخل، محصول‌های جامد شکافت، تغییر ریزساختار سوخت و ایجاد ساختار سوختن بالا^(۱۱) (HBS)، آسیب تابشی و استوکیومتری قرار می‌گیرد. از میان این عامل‌ها، اثر تخلخل بر روی رسانندگی گرمایی بسیار پیچیده است. در حقیقت سوخت اکسیدی عموماً با تف‌جوشی^(۲) پودر فشرده‌ی UO_2 در دمای بالا ساخته می‌شود. با کنترل شرایط تف‌جوشی می‌توان سوخت‌هایی با چگالی مناسب به طور معمول در حدود ۹۰٪ چگالی نظری تولید نمود. در نتیجه، تخلخل اولیه هنگام ساخت در سوخت تابش‌دهی نشده همیشه وجود دارد. اتم‌های گاز حاصل از فرایند شکافت در شبکه‌ی سوخت انحلال‌ناپذیر بوده و در حباب‌های درون‌دانه‌ای^(۳) و مرزدانه‌ای^(۴) انباشته می‌شود که در تورم سوخت^(۵) و تولید تخلخل^(۶) سهم است. با افزایش میزان مصرف سوخت در شرایط دمایی پایین، سوخت UO_2 تحت فرایند باز تبلور تابش - القا^(۷) قرار می‌گیرد. باز تبلور از مرز دانه آغاز و به سمت مرکز دانه پیش می‌رود تا این که کل دانه باز تبلور یابد. دانه‌های بزرگ به دانه‌های کوچک‌تر بدل می‌شود. بنابراین جذب اتم‌های گاز بیش‌تر در مرز دانه صورت می‌گیرد و در نتیجه حباب‌های مرزدانه‌ای بزرگی تولید خواهد شد که سهم عمده‌ای از تولید تورم ناشی از حباب‌های گاز و تخلخل نظیر آن را دارا است [۱-۵]. رابطه‌های تجربی و تحلیلی مختلفی برای توصیف اثر تخلخل روی رسانندگی گرمایی سوخت توسعه یافته است. لوئب [۶] و کمپف و همکاران [۷] با در نظر گرفتن یک سلول واحد از ماده‌ی متخلخل، به صورت یک مکعب از ماده‌ی جامد که یک تخلخل گازی را احاطه کرده است، یک عبارت تحلیلی برای اثر تخلخل روی رسانندگی گرمایی به دست آوردند. بعد از آن، مدل لوئب و کمپف به صورت متوالی در کد DART برای مدل‌سازی رسانندگی گرمایی سوخت پاشیده^(۸) مورد استفاده قرار گرفت [۸]. مطالعه‌ها بر روی رسانندگی گرمایی ساختار سوختن بالا و مشاهده‌های تجربی افزایش تخلخل در ناحیه‌ی لبه‌ی UO_2 ^(۹)، به طرح رابطه‌های مختلفی برای تحول تخلخل با مصرف سوخت در این ناحیه انجامیده است [۹]. لی و همکاران [۱۰] اثر تخلخل در



که در آن جمله‌ی اول سمت راست مربوط به تورم ناشی از محصول‌های جامد شکافت است که با معادله‌ی ۴ تعیین می‌شود [۱۵] و جمله‌ی دوم کسر کلی تورم گاز ناشی از اتم‌های گاز منفرد حل شده در شبکه‌ی سوخت و حباب‌های گاز شکافت است (معادله‌ی ۵).

$$\Delta V^{\text{solid}} / V_0^{\text{matrix}} = 0.0032 \times \text{Bu} (\text{MWd} / \text{KgU}) / 10 \quad (4)$$

$$\Delta V^{\text{gaseous}} / V_0^{\text{matrix}} = \Delta V^{\text{gas atom}} / V_0^{\text{matrix}} + \Delta V^{\text{gas bubble}} / V_0^{\text{matrix}} \quad (5)$$

به طوری که Bu میزان مصرف سوخت را نشان می‌دهد. برای تخمین تورم ناشی از محصول‌های گازی شکافت، در این کار از روش رست [۵، ۱۶] برای محدوده‌ی دما- پایین ($T < 850 \text{ K}$) استفاده شده است. تخلخل کل $P = P_s + P_v$ چنین به دست می‌آید:

$$P = 1 - (1 + \Delta V^{\text{matrix}} / V_0^{\text{matrix}})(\rho / \rho_{\text{th}}) + (\Delta V^{\text{gas bubble}} / V_0^{\text{matrix}}) / (1 + \Delta V^{\text{gas bubble}} / V_0^{\text{matrix}}) \quad (6)$$

مطالعه‌ی تحول تخلخل با مصرف سوخت با استفاده از معادله‌ی ۶ مستلزم محاسبه‌ی جمله‌های مربوط به تورم شبکه است.

۲.۲ تورم شبکه قبل از باز تبلور مجدد

یک روش برای محدوده‌ی میزان مصرف سوخت پایین توسط رست در مرجع‌های [۴، ۵، ۱۳] توسعه داده شده است که در آن تورم گاز شکافت تابعی از غلظت اتم‌ها و حباب‌های گاز شکافت و ثابت شبکه‌ی^(۱۵) سوخت است. چگالی گاز در حباب‌های درون‌دانه‌ای با زمان تابش‌دهی تغییر می‌کند و می‌تواند به صورت جمع معادله‌های ۷ و ۸ نوشته شود که تحول زمانی چگالی حباب گاز شکافت c_b و تعداد اتم‌های گاز n_b در حباب‌ها را نشان می‌دهد.

$$\frac{dc_b(t)}{dt} = \frac{16\pi f_n D_g r_g c_g(t) c_g(t)}{n_b(t)} - \frac{b}{\tau} c_b(t) \quad (7)$$

$$\frac{dn_b(t)}{dt} = 4\pi r_b(t) D_g c_g(t) - \frac{b}{\tau} n_b(t) \quad (8)$$

برای انجام محاسبات در این مقاله، یک برنامه‌ی کامپیوتری تهیه شده است که در آن دستگاه معادله‌های به کار رفته در مدل تورم سوخت رست [۲، ۴، ۵] به منظور یافتن تورم سوخت ناشی از حباب‌های درون‌دانه‌ای سوخت با روش عددی رانگ-کوتای مرتبه‌ی ۴ حل شده است و برای به دست آوردن سایر جمله‌های سهیم در تورم سوخت از مدل‌های تحلیلی بهره جسته شده است. مدل تخلخل اسپینو [۱۳] با تصحیح تخلخل کل همراه با رابطه‌ی رسانندگی گرمایی هالدین در این برنامه به کار رفته است.

۲. مدل‌ها و روش‌ها

۱.۲ تخلخل

تخلخل را می‌توان به صورت حجم خالی بر حجم کل تعریف نمود. حجم کل P نیز از دو بخش تشکیل می‌شود که یکی شامل حجم خالی هنگام ساخت^(۱۲) یا همان تخلخل اولیه‌ی سوخت P_v است و دیگری تخلخل تورمی^(۱۳) P_s است و از تورم شبکه که ناشی از حباب‌های گاز شکافت القا شده به وسیله‌ی تابش است، نشأت می‌گیرد. در واقع شبکه^(۱۴)، حجم سوخت بدون احتساب حجم تخلخل است. P_s و P_v در معادله‌های ۱ و ۲ تعریف شده است. با در نظر گرفتن حجم سوخت قبل از تابش‌دهی به عنوان حالت مرجع در محاسبات تورم سوخت، P_v می‌تواند چنین محاسبه شود [۱۳]

$$P_v = 1 - (1 + \Delta V^{\text{matrix}} / V_0^{\text{matrix}})(\rho / \rho_{\text{th}}) \quad (1)$$

$$P_s = (\Delta V^{\text{gas bubble}} / V_0^{\text{matrix}}) / (1 + \Delta V^{\text{gas bubble}} / V_0^{\text{matrix}}) \quad (2)$$

به طوری که V_0^{matrix} حجم اولیه‌ی شبکه، ΔV^{matrix} افزایش حجم شبکه‌ی ناشی از محصول‌های جامد $(\Delta V^{\text{solid}} / V_0^{\text{matrix}})$ و گازی $(\Delta V^{\text{gaseous}} / V_0^{\text{matrix}})$ شکافت، ρ / ρ_{th} نسبت چگالی واقعی به چگالی نظری سوخت، $\Delta V^{\text{gas bubble}}$ افزایش حجم شبکه‌ی ناشی از شکل‌گیری حباب‌های گاز شکافت و $\Delta V^{\text{gas bubble}} / V_0^{\text{matrix}}$ کسر تورمی شبکه‌ی سوخت ناشی از حباب‌های گاز شکافت است. $\Delta V^{\text{matrix}} / V_0^{\text{matrix}}$ کسر کلی تورم شبکه‌ی سوخت ناشی از محصول‌های جامد و گازی چنین داده می‌شود

$$\Delta V^{\text{matrix}} / V_0^{\text{matrix}} = \Delta V^{\text{solid}} / V_0^{\text{matrix}} + \Delta V^{\text{gaseous}} / V_0^{\text{matrix}} \quad (3)$$



برای به دست آوردن چگالی حباب‌ها روی مرز دانه، c_b می‌توان معادله‌ی تقریبی زیر را به کار برد [۴، ۵، ۱۳]:

$$C_b(t) = \left(\frac{\lambda z \left(\frac{a^r}{12}\right)^{\frac{1}{r}} K}{\pi^{\frac{r}{2}} \xi D_g \delta} \right)^{\frac{1}{r}} \quad (12)$$

به طوری که $\frac{a^r}{12}$ حجم اتمی متوسط UO_2 [۱۳]، a ثابت شبکه، z تعداد موضع‌هایی است که توسط اتم گاز در مرز دانه به ازای هر پرش طی می‌شود، δ عرض مرز دانه، ξ ضریب افزایش پخش مرز دانه و K شار اتم‌های گاز پخش شده از دانه به مرز دانه است که چنین محاسبه می‌شود [۱۳]

$$K = \frac{d_g}{3} \frac{dc_g}{dt} \frac{d(f_s t)}{dt} \quad (13)$$

که

$$\frac{dc_g}{dt} = \frac{\alpha \dot{f} - c_g df_s / dt}{1 + f_s + 32\pi f_n r_g D_g c_g / b} \quad (14)$$

چگالی اتم گاز روی مرز دانه، C_g ، چنین تعیین می‌شود

$$C_g(t) = \frac{d_g}{3} f_s(t) c_g(t) \quad (15)$$

و برای تعداد متوسط اتم‌های گاز در یک حباب مرزدانه‌ای داریم

$$N_b = \frac{C_g(t)}{C_b(t)} \quad (16)$$

شعاع حباب‌های گاز درون‌دانه‌ای می‌تواند با استفاده از معادله‌ی حالت اصلاح شده‌ی واندروالس به دست آید

$$3\gamma / r_b ((4\pi r_b^3) / 3 - h_s B n_b) = n_b kT \quad (17)$$

که در آن B ثابت واندروالس برای Xe ، k ثابت بولتزمن، T دمای مطلق، γ کشش سطحی و h_s یک ضریب تصحیح است که برای

در رابطه‌های بالا، f_n ضریب جوانه‌زنی حباب، b نرخ انحلال مجدد درون‌دانه‌ای، c_g ، D_g و r_g به ترتیب، چگالی، ضریب پخش و شعاع اتم‌های گاز درون‌دانه‌ای و r_b شعاع حباب‌های گاز درون‌دانه‌ای است. اولین جمله‌ی سمت راست معادله‌ی ۸ نرخ تولید حباب‌های درون‌دانه‌ای با شعاع متوسط r_b را نشان می‌دهد. آخرین جمله‌ی سمت راست معادله‌های ۷ و ۸ به ترتیب نرخ از دست رفتن کل حباب و اتم گاز از داخل حباب را بیان می‌نماید. رست این دستگاه معادله‌ها را به روش تحلیلی حل می‌نماید بدین صورت که فرض می‌کند نرخ افزایش غلظت حباب‌ها و اتم‌های گاز درون آن‌ها بعد از گذشت زمان طولانی به اندازه‌ی قابل توجهی کاسته شود (به حالت ثابتی می‌رسد) و طبق این فرض، سمت چپ معادله‌های ۷ و ۸ را برابر صفر قرار داده و آن‌ها را برای یافتن n_b و c_b حل می‌کند [۴]. در مقاله‌ی حاضر دستگاه معادله‌های مذکور با روش عددی رانگ-کوتای مرتبه‌ی ۴ برای تعیین n_b و c_b حل شده است. محاسبه‌ها در بازه‌ی زمانی ۰ تا $t = 7.5 \times 10^7$ sec (متناظر با محدوده‌ی میزان مصرف سوخت ۰ تا 120 MWd/kgU) انجام شده است. به علت این که محاسبه‌ها از زمان $t = 0$ sec یعنی زمانی قبل از تولید حباب گاز شکافتی آغاز شده است شرایط اولیه برای حل این دستگاه معادله‌ها، $c_b = 0$ و $n_b = 0$ است که برای اجتناب از نقطه‌ی تکین در معادله‌ی ۷ برای n_b یک مقدار غیرصفر کوچک در نظر گرفته می‌شود.

چگالی اتم‌های گاز درون‌دانه‌ای c_g مطابق با رست [۲] چنین تعیین می‌شود:

$$c_g(t) = \frac{-(1+f_s) + \left[(1+f_s)^2 + 64\pi f_n r_g D_g \alpha \dot{f} t / b \right]^{\frac{1}{2}}}{32\pi f_n r_g D_g / b} \quad (9)$$

که در آن \dot{f} برحسب $\frac{\text{شکافت}}{m^{-3} \text{ sec}}$ نرخ چگالی شکافت، α تعداد اتم‌های گاز تولید شده در هر شکافت و f_s کسر گازهای پخش شده به مرز دانه با دانه‌هایی به قطر d_g است و با رابطه‌های تقریبی زیر بیان می‌شود [۴]:

$$f_s = \frac{\lambda}{d_g} \left(\frac{D_g t}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{6}{d_g} D_g t \quad \frac{4\pi^{\frac{r}{2}} D_g t}{d_g^{\frac{r}{2}}} \leq 1 \quad (10)$$

$$f_s = 1 - \frac{d_g^{\frac{r}{2}}}{6 \cdot D_g t} + \frac{d_g^{\frac{r}{2}}}{2 D_g t} \exp\left(-\frac{4\pi^{\frac{r}{2}} D_g t}{d_g^{\frac{r}{2}}}\right) \quad \frac{4\pi^{\frac{r}{2}} D_g t}{d_g^{\frac{r}{2}}} > 1 \quad (11)$$



متعاقباً، باز تبلور به صورت رو به جلو از لبه‌ی خارجی دانه به سمت مرکز آن حرکت می‌نماید تا در نهایت تمامی دانه دست خوش تغییر شود، کسر حجمی ناحیه‌ی باز تبلور یافته تابعی از زمان تابش دهی و نیز اندازه‌ی اولیه‌ی دانه است که به صورت زیر تعیین می‌شود [۲، ۵]:

$$V_r = 1 - \left[1 - \frac{96\gamma B_r (F_d - F_{dx})}{d_g C_A C_p} \sqrt{\frac{f(v)}{2\pi}} \right]^2 \quad (21)$$

که در آن، F_d و $F_{dx} = \dot{f}t_x$ به ترتیب چگالی شکافت وابسته به زمان تابش دهی t^* و زمان شروع پدیده‌ی باز تبلور t_x^* است، $f(v) = (1-v/2)/(1-v)$ که v در آن ضریب پواسون است، C_A برای شبکه‌ی مکعبی برابر ۳ و C_p برابر واحد است [۲، ۵]، B_r یک پارامتر مرتبط با خزش تابش-القا است، $\dot{\epsilon} = B_r \dot{f} \sigma$ ، و تنش " σ " تابعی است از ثابت شبکه، $\sigma = E\Delta a / a_0$ ، که در آن E مدول یانگ ماده‌ی سوخت است [۳]. بعد از شروع باز تبلور، با گذشت زمان تابش دهی بخشی از دانه‌های اولیه به دانه‌های ریزتر تبدیل می‌شود و بخشی هنوز تبدیل نشده است، در آن زمان کسر کلی تورم گاز این است [۲]

$$\left(\frac{\Delta V_{\text{gaseous}}}{V_{\text{matrix}}} \right)_{\text{TOT}} = (1 - V_r) \left(\frac{\Delta V_{\text{gaseous}}}{V_{\text{matrix}}} \right)_g + V_r \left(\frac{\Delta V_{\text{gaseous}}}{V_{\text{matrix}}} \right)_{\text{gx}} \quad (22)$$

که در آن V_r از معادله‌ی ۲۱ به دست می‌آید، تورم $\left(\frac{\Delta V_{\text{gaseous}}}{V_{\text{matrix}}} \right)_g$ گاز در ناحیه‌ی باز تبلور نیافته است که شامل حباب‌های درون‌دانه‌ای و مرزدانه‌ای است و با معادله‌ی ۱۹ تعیین شده است و $\left(\frac{\Delta V_{\text{gaseous}}}{V_{\text{matrix}}} \right)_{\text{gx}}$ تورم گاز در ناحیه‌ی باز تبلور یافته را نشان می‌دهد که ناشی از تهی شدن شبکه‌ی سوخت از زنون است و شامل تنها حباب‌های مرزدانه‌ای است و می‌تواند چنین محاسبه شود [۲، ۵]

$$\left(\frac{\Delta V_{\text{gaseous}}}{V_{\text{matrix}}} \right)_{\text{gx}} = 4\pi R_{\text{bx}}^2 \left(\frac{C_b}{d_g} + \frac{C_{\text{bx}}}{d_{\text{gx}}} + \frac{1}{3d_{\text{gx}}^2} \right) \quad (23)$$

دما‌ی داده شده‌ی T ، معادله‌ی ۱۷ را با معادله‌ی حالت کره‌ی سخت^(۱۶) معادل می‌سازد [۱۳].

برای حباب‌های در اندازه‌های نانو یک حل تقریبی معادله‌ی ۱۷ این است:

$$r_b(t) = \left(\frac{3h_s B n_b(t)}{4\pi} \right)^{1/3} \quad (18)$$

شعاع حباب مرزدانه‌ای (R_b) نیز می‌تواند از حل عددی معادله‌ی ۱۷ روی مرز دانه به دست آید.

نهایتاً کسر کلی تورم گاز در معادله‌ی ۵ به صورت زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$\left(\frac{\Delta V_{\text{gaseous}}}{V_{\text{matrix}}} \right)_g = \frac{c_g a^2}{4} + \frac{4\pi}{3} \left(R_b^2 c_b + \frac{3R_b^3 C_b}{d_g} \right) \quad (19)$$

جمله‌ی اول سمت راست معادله‌ی ۱۹ تورم ناشی از اتم‌های گاز حل شده در درون شبکه‌ی سوخت است که در تخلخل تورمی P_S شرکت ندارد و جمله‌ی دوم به ترتیب مربوط به تورم ناشی از حباب‌های گاز درون‌دانه‌ای و مرزدانه‌ای است که منجر به شکل‌گیری تخلخل تورمی می‌شود.

۳.۲ تورم شبکه با باز تبلور دانه

در شرایط دما-پایین و با افزایش میزان مصرف سوخت، فرایند باز تبلور تابش-القا باعث انتقال ساختار از دانه‌های اولیه با قطر حدود میکرون به دانه‌های جدید با اندازه‌های زیرمیکرون می‌شود که منجر به افزایش تورم ناشی از گاز شکافت می‌گردد و دلیل آن فاصله‌های پخش کوچک‌تر و به دنبال آن افزایش امکان تهی شدن زنون، افزایش مساحت به واحد حجم مرزدانه و بزرگ شدن نرخ رشد حباب‌های مرزدانه‌ای در مقایسه با شرایط برای حباب‌های درون‌دانه‌ای است. مشاهده می‌شود شروع پدیده‌ی باز تبلور عمدتاً در امتداد مرزدانه‌های اولیه در یک چگالی شکافت F_{dx} که به صورت زیر تخمین زده می‌شود [۲، ۵] رخ می‌دهد:

$$F_{dx} = 4 \times 10^{24} \dot{f}^{1/5} \quad (20)$$



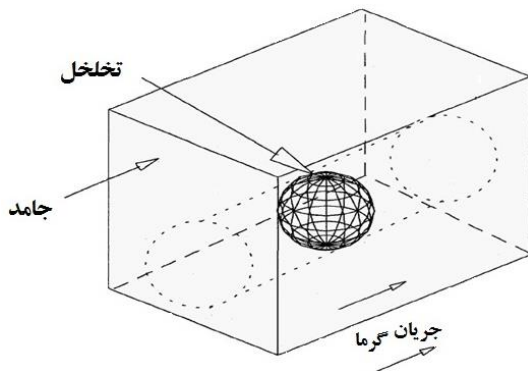
در این مقاله یک مدل برای تعیین ضریب تخلخل براساس مدل رسانندگی گرمایی به کار رفته در کد DART مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل مطابق شکل ۱، یک ماده‌ی جامد یک تخلخل گازی منفرد را در بر گرفته است و یک سلول واحد از ذره‌ی سوخت را تشکیل می‌دهد [۸، ۱۵]. طبق این مدل وقتی که ماده‌ی جامد و تخلخل گازی به ترتیب، سوخت و تخلخل Pv در نظر گرفته شوند، آن‌گاه برای یافتن رسانندگی گرمایی مؤثر سلول واحد خواهیم داشت

$$\frac{k_e^V}{k_o} = 1 - \left[\pi \left(\frac{3}{4\pi} P_v \right)^{\frac{1}{3}} \right] \left[1 - \frac{k_g}{2k_o \left(\frac{3}{4\pi} P_v \right)^{\frac{1}{3}}} \right] \quad (26)$$

که در آن k_e^V رسانندگی گرمایی مؤثر سوخت شامل تخلخل Pv برحسب W/mK ، k_o رسانندگی گرمایی سوخت کاملاً چگال و UO_2 و k_g رسانندگی گرمایی گاز داخل تخلخل است. چون تخلخل Pv کاملاً خالی است و گازی را شامل نمی‌شود در این جا k_g برابر صفر است.

برای سهم کردن تخلخل تورمی در رسانندگی گرمایی سوخت، یک بار دیگر سلول واحد را در نظر می‌گیریم که این بار ماده‌ی جامد شامل سوختی است که تخلخل Pv را در بر دارد (با رسانندگی گرمایی k_e^V) و تخلخل گازی، تخلخل تورمی P_s است. در نتیجه ضریب تخلخل چنین به دست می‌آید

$$\frac{k_{eff}}{k_o} = 1 - \left[\pi \left(\frac{3}{4\pi} P_v \right)^{\frac{1}{3}} \right] \left\{ 1 - \left[\pi \left(\frac{3}{4\pi} P_s \right)^{\frac{1}{3}} \right] \left[1 - \frac{k_g}{2k_o \left(\frac{3}{4\pi} P_v \right)^{\frac{1}{3}}} \right] \right\} \quad (27)$$



شکل ۱. سلول واحد شامل ماده‌ی جامد و تخلخل گازی [۸، ۱۵].

که در آن R_{bx} و C_{bx} به ترتیب شعاع و چگالی حباب مرزدانه‌ای گاز شکافت و d_{gx} اندازه‌ی دانه بعد از باز تبلور است. برای محاسبه‌ی C_{bx} از معادله‌ی ۱۲ استفاده می‌شود که در آن d_g با d_{gx} جای‌گزين شده است و معادله‌ی درجه‌ی سه ۱۷ با جای‌گزينی r_b و n_b به ترتیب با R_{bx} و N_{bx} ، به صورت عددی این بار برای R_{bx} حل می‌شود. N_{bx} نیز با معادله‌ی اصلاح شده توسط کوی و همکاران [۱۷] تعیین می‌شود.

$$N_{bx} = \frac{\alpha t}{r \left(\frac{C_b}{d_g} + \frac{C_{bx}}{d_{gx}} + \frac{1}{r d_{gx}^2} \right)} \quad (24)$$

در معادله‌ی ۲۴ فرض می‌شود در ناحیه‌ی باز تبلور یافته از سوخت، قسمت عمده‌ی گاز شکافت روی مرزدانه‌ها تولید می‌شود. این فرض با کسر گاز رها شده به مرزدانه‌ها با استفاده از معادله‌ی ۱۱ اعمال می‌شود [۴].

۴.۲ مدل رسانندگی گرمایی هالدين

رسانندگی گرمایی سوخت UO_2 ، که از نتایج تجربی هالدين [۱۸] و با در نظر گرفتن اثر کاهنده‌ی مصرف سوخت روی آن به دست آمده است، چنین به دست می‌آید

$$k_{95} = \frac{1}{0.1148 + 0.0035Bu + (0.002474 - 8.24 \times 10^{-7}Bu)(T - 273) + 0.132 \exp(0.0188(T - 273))} \quad (25)$$

که در آن k_{95} رسانندگی گرمایی سوخت UO_2 در ۹۵٪ چگالی نظری (10.96 g cm^{-3}) برحسب W/mK ، Bu میزان مصرف سوخت برحسب $\frac{MWd}{kgU}$ و T دما برحسب کلون است.

۵.۲ ضریب تخلخل

برای در نظر گرفتن اثر تخلخل P روی رسانندگی گرمایی سوخت تابش‌دیده‌ی UO_2 که توسط رابطه‌ی هالدين تعريف شده است، فرض می‌شود که از لحاظ ریخت‌شناسی، سوخت دارای یک ساختار سه فازی شامل تخلخل‌های کروی P_v ، (که دخالتی در تورم شبکه سوخت ندارد) و تخلخل تورمی P_s (دخیل در تورم شبکه) باشد که به طور یکنواخت در ماده‌ی سوخت کاملاً چگال متشکل از شبکه‌ی سوخت و محصول‌های جامد شکافت، پراکنده شده است.



در این جا تورم کلی توده‌ی سوخت $(\Delta V^{\text{bulk}} / V_0^{\text{bulk}})$ به صورت تغییر نسبی حجم کل سوخت، در میزان مصرف سوخت نظیر تعریف می‌شود.

شکل ۳، تورم کلی شبکه‌ی سوخت را به عنوان تابعی از دما برای میزان مصرف‌های مختلف سوخت نشان می‌دهد. در واقع دمای بالا باعث ایجاد حباب‌های مرزانه‌ای با شعاع بزرگ می‌شود که منجر به افزایش تورم حباب‌های گاز شکافت می‌شود.

۲.۳ تولید تخلخل

تورم حباب گاز $\Delta V^{\text{gas bubble}} / V_0^{\text{matrix}}$ به همراه تورم کلی شبکه‌ی سوخت $\Delta V^{\text{matrix}} / V_0^{\text{matrix}}$ تعیین شده است. حالا می‌توان تخلخل تورمی P_s ، سهم تخلخل P_v و تخلخل کل P را به ترتیب با رابطه‌های ۱، ۲ و ۶، و با استفاده از رابطه‌ی تجربی ۳۳ برای چگالی نسبی ρ / ρ_{th} که در محدوده‌ی ۱۵ تا ۱۰۰ MWd/kgU به دست آمده است، محاسبه نمود [۱۳].

$$\rho / \rho_{\text{th}} = \left(0.9383 - 1.71 \times 10^{-4} \text{Bu}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (33)$$

که در آن Bu میزان مصرف سوخت (برحسب MWd/kgU) است.

پارامتر	مقدار	واحد	مرجع
α	۰.۲۶	-	[۱۵]
b_0^{*1}	10^{-23}	m^3	[۱۳]
D_0^{*2}	1.2×10^{-29}	m^5	[۱۳]
r_g	2.16×10^{-10}	m	[۱۵]
ξ	1.65×10^3	-	[۱۳]
δ	2×10^{-9}	m	[۲]
γ	۱	Jm^{-2}	[۱۵]
B	8.5×10^{-29}	$\text{m}^2 \text{atom}^{-1}$	[۱۵]
f_n	10^{-2}	-	[۱۳]
h_s	۰.۶	-	[۱۳]
d_g	5×10^{-6}	m	[۵]
\dot{f}	2×10^{19}	$\text{m}^{-2} \text{sec}^{-1}$	کار حاضر
B_r	1×10^{-34}	$\text{m}^5 \text{N}^{-1}$	[۲]
ν	۰.۳۱	-	[۲۰]
d_{gx}	0.15×10^{-6}	m	[۲۱]

$$*1 b = b_0 \dot{f},$$

$$*2 D_g = D_0 \dot{f}$$

که در آن k_{eff} رسانندگی گرمایی مؤثر سوخت شامل تخلخل‌های P_s و P_v است. برای تخلخل تورمی k_g ، P_s ، رسانندگی گرمایی مخلوط Xe و Kr است و چنین تعیین می‌شود [۱۹]

$$k_{\text{Xe}} = (4.0288 \times 10^{-5}) T^{0.877} \text{ (W/mK)} \quad (28)$$

$$k_{\text{Kr}} = (4.726 \times 10^{-5}) T^{0.877} \text{ (W/mK)} \quad (29)$$

$$k_g = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{1 + \sum_{j=1, j \neq i}^n \Psi_{ij} \frac{X_j}{X_i}} \quad (30)$$

$$\Psi_{ij} = \phi_{ij} \left[1 + 2.41 \frac{(M_i - M_j)(M_i - 0.142M_j)}{(M_i - M_j)^2} \right] \quad (31)$$

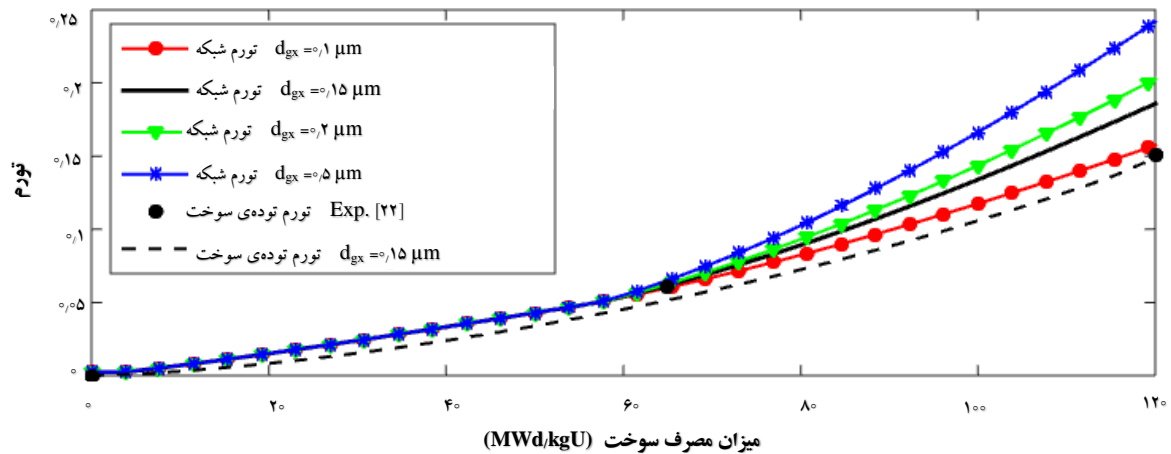
$$\phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{k_i}{k_j} \right)^{\frac{1}{\nu}} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{\nu}} \right]^{\nu}}{\nu^{\frac{1}{\nu}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{\nu}}} \quad (32)$$

در رابطه‌های بالا k_i رسانندگی گرمایی گاز i ، X_i کسر مولی گاز i $\left(\frac{X_{\text{Xe}}}{X_{\text{Kr}}} \sim 10.8 \right)$ [۱۱]، M_i جرم مولکولی گاز i ($M_{\text{Xe}} = 131.3$, $M_{\text{Kr}} = 83.8$) [۱۹] و n تعداد مؤلفه‌های مخلوط است ($n = 2$). رسانندگی گرمایی مخلوط Xe و Kr با نسبت $\text{Xe/Kr} \sim 10.8$ [۱۱] در دمای ۸۰۰ K، در مقایسه با رسانندگی گرمایی Xe که 0.137 W/mK است برابر با 0.1084 W/mK محاسبه شده است.

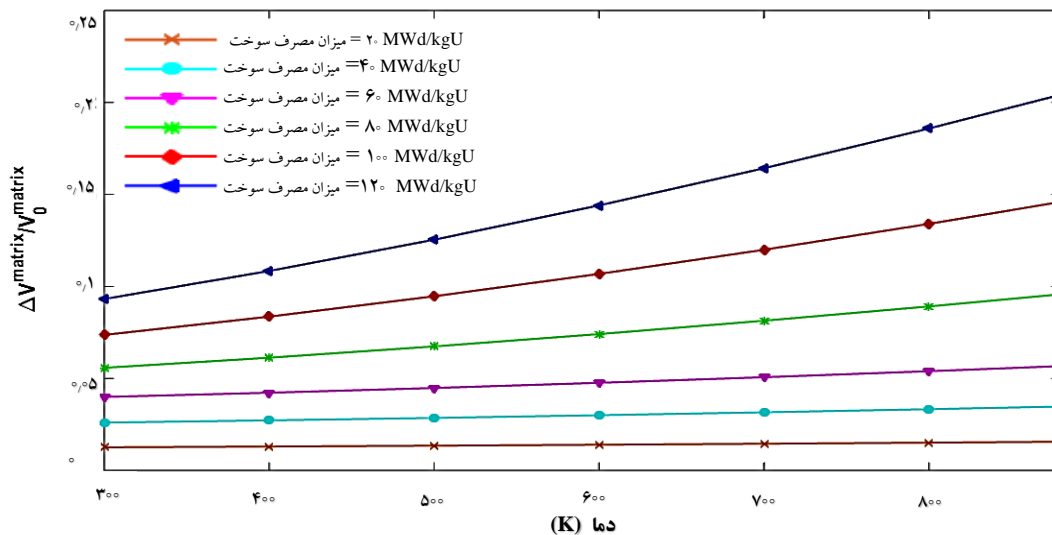
۳. یافته‌ها و بحث

۱.۳ تورم شبکه

مقدارهای پارامترهای استفاده شده در این مقاله در جدول ۱ درج شده است. شکل ۲، تورم کلی شبکه‌ی سوخت UO_2 را به عنوان تابعی از میزان مصرف سوخت برای اندازه‌های مختلف دانه‌های باز تبلور یافته نشان می‌دهد. هم‌چنان که دیده می‌شود بعد از شروع باز تبلور نرخ تورم شبکه‌ی سوخت افزایش می‌یابد. به علاوه با افزایش اندازه‌ی دانه‌ی باز تبلور یافته، بر نرخ تورم سوخت افزوده می‌شود. هم‌چنین مقایسه‌ی مقدارهای تجربی تورم کلی توده‌ی سوخت [۲۲] با تورم کلی توده‌ی سوخت محاسبه شده از معادله‌ی ۲ مرجع [۱۳] برای $d_{gx} = 0.15 \mu\text{m}$ توافق خوبی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تورم کلی شبکه‌ی سوخت UO_2 برحسب میزان مصرف سوخت، برای اندازه‌های مختلف دانه‌ی باز تبلور یافته در دمای 800 K حاصل از جمع معادله‌ی ۲۱ با معادله‌ی ۴ $\left(\frac{\Delta V_{\text{gaseous}}}{V_{\text{matrix}}} \right)_{\text{Tot}} + \left(\frac{\Delta V_{\text{solid}}}{V_{\text{matrix}}} \right)$ (تورم شبکه) به همراه مقادارهای تجربی تورم توده‌ی سوخت [۲۲] و تورم توده‌ی سوخت محاسبه شده در کار حاضر (از معادله‌ی ۲) مرجع [۱۳] برای $d_{gx} = 0.15\ \mu\text{m}$.

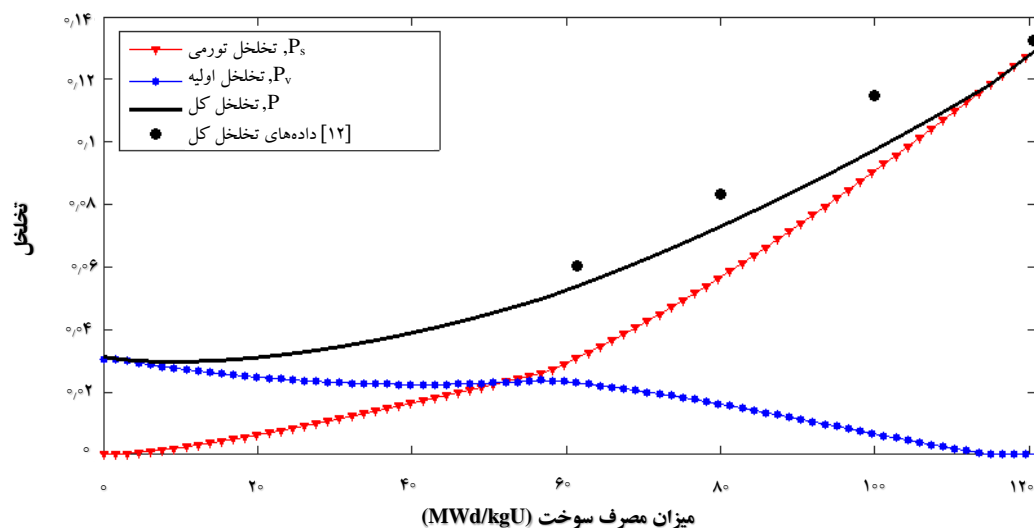


شکل ۳. تورم کلی شبکه‌ی سوخت UO_2 برحسب دما برای میزان مصرف‌های مختلف سوخت با $d_{gx} = 0.15\ \mu\text{m}$.

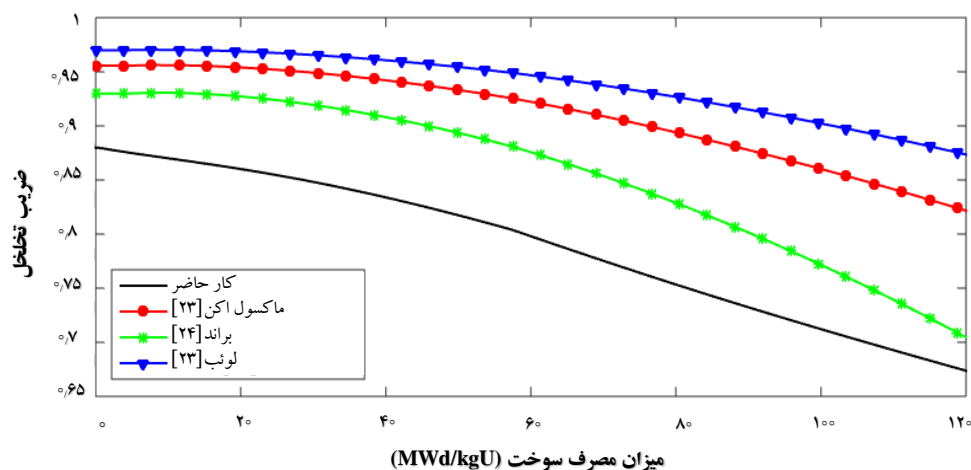
۳.۳ ضریب تخلخل

ضریب تخلخل به دست آمده در این مقاله با چند ضریب تخلخل رایج [۲۳، ۲۴] در شکل ۵ مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب تخلخل جدید نسبت به سایر ضریب‌ها محافظه کارانه‌تر بوده و مقدار کم‌تری را پیش‌بینی می‌کند. قطعاً با تأثیر این ضریب تخلخل بر رابطه‌ی رسانندگی گرمایی هالدرن، کاهش بیش‌تری در رسانندگی گرمایی نسبت به تأثیر سایر ضریب‌ها ایجاد خواهد شد که باعث می‌شود رسانندگی گرمایی مؤثر پیش‌بینی شده برای سوخت متخلخل مطابق با شکل ۶ به مقادارهای تجربی نزدیک‌تر شود.

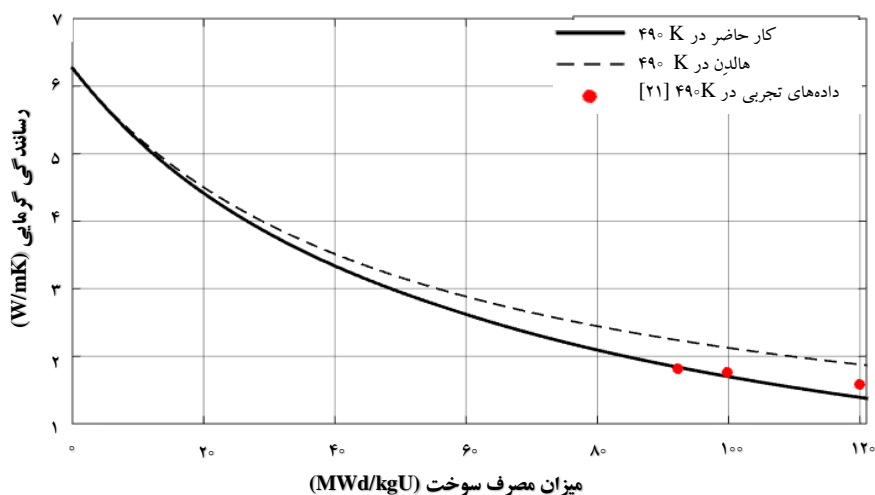
در شکل ۴ تخلخل تورمی P_s ، تخلخل P_v و جمع آن‌ها که تخلخل کل P نامیده می‌شود، به عنوان تابعی از میزان مصرف سوخت نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در میزان مصرف‌های بالای سوخت به علت افزایش تجمع حباب‌های گاز مرزدانه‌ای در مرز دانه‌ی باز تبلور یافته، تورم حباب‌گازی مربوط و در نتیجه تخلخل ناشی از آن یعنی P_s افزایش می‌یابد که به افزایش تخلخل کل می‌انجامد در صورتی که سهم تخلخل ناشی از تخلخل‌های P_v با شروع پدیده‌ی باز تبلور در میزان مصرف‌های بالای سوخت کاهش یافته و نهایتاً از بین می‌رود زیرا تخلخل‌های اولیه در حال پر شدن با گاز شکافت هستند و سهم تخلخل P_v در حال تبدیل به سهم P_s است.



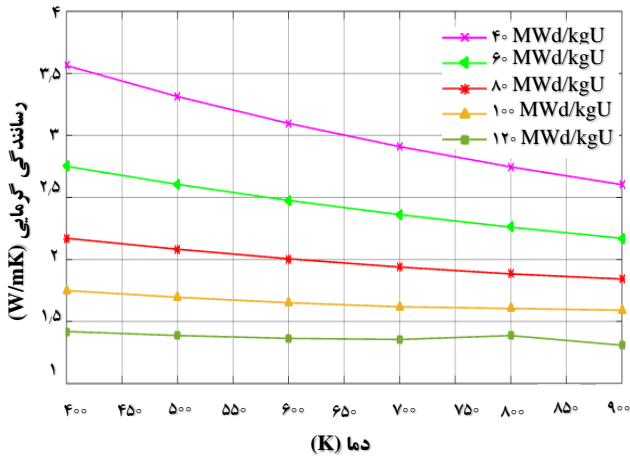
شکل ۴. تخلخل P_v (معادله‌ی ۱)، تخلخل تورمی P_s (معادله‌ی ۲) و تخلخل کل P (معادله‌ی ۶) برحسب میزان مصرف سوخت در دمای 800 K به همراه مقادیرهای تجربی تخلخل کل [۱۲] برای مقایسه.



شکل ۵. مقایسه‌ی ضریب تخلخل کار حاضر و چند ضریب تخلخل رایج [۲۳، ۲۴].



شکل ۶. مقایسه‌ی رسانندگی گرمایی سوخت UO_2 با رابطه‌ی هالدرن با در نظر گرفتن تحول تخلخل (کار حاضر) با حالت تخلخل ثابت و مقادیرهای تجربی [۲۱] در دمای 490 K .



شکل ۷. رسانندگی گرمایی بر حسب دما برای میزان مصرف‌های مختلف سوخت.

شایان ذکر است که حساسیت‌سنجی تورم شبکه و رسانندگی گرمایی سوخت نسبت به تغییرهای پارامترهای مختلف ذکر شده در جدول ۱ در مقاله قبلی نویسندگان این مقاله [۲۵] انجام شده است.

۴. نتیجه‌گیری

با اصلاح مدل تخلخل اسپینو در این مقاله و انجام محاسبه‌های تخلخل مطابق با آن برای سوخت UO_2 مشاهده شد که در میزان مصرف‌های بالای سوخت در حدود 120 MWd/kgU ، تخلخل کل در حدود ۱۵٪ است که به طور عمده ناشی از تخلخل تورمی ایجاد شده به خاطر شکل‌گیری حباب‌های مرزدانه‌ای روی مرز دانه‌های باز تبلور یافته است، در حالی که از سهم تخلخل‌های اولیه با شروع پدیده‌ی باز تبلور تا حدود زیادی کاسته می‌شود. برای مطالعه‌ی اثر تحول تخلخل با میزان مصرف سوخت بر روی رسانندگی گرمایی سوخت UO_2 تابش دیده، رابطه‌ی تجربی هالدرن انتخاب شد که با یک ضریب تصحیح پیشنهادی تخلخل ترکیب گردید. این ضریب براساس ریخت‌شناسی سه فازی سوخت تابش دیده‌ی شامل تخلخل‌های بدون سهم در تورم شبکه‌ی سوخت و درشت تخلخل‌های ناشی از حباب‌های مرزدانه‌ای سهم در تورم شبکه‌ی سوخت با توزیع یکنواخت در ماده‌ی سوخت کاملاً چگال متشکل از شبکه‌ی سوخت UO_2 و محصول‌های جامد شکافت، توسعه یافته است. با در نظر گرفتن تحول تخلخل با مصرف سوخت، کاهش در حدود ۲۵٪ در رسانندگی گرمایی سوخت UO_2 در محدوده‌ی میزان مصرف سوخت موضعی 120 MWd/kgU و دمای 490 K در مقایسه با حالتی که تخلخل ثابت و برابر با ۳٪ در نظر گرفته شود، تعیین شد. هم‌چنین سازگاری خوبی بین مقدارهای تجربی و رسانندگی گرمایی پیش‌بینی شده در این مقاله در میزان‌های مصرف بالای سوخت مشاهده شد.

۴.۳ رسانندگی گرمایی

رسانندگی گرمایی در رابطه‌ی هالدرن برای سوخت با چگالی نظری ۹۵٪ تعیین شده است. برای استفاده از این رابطه برای سوخت‌های دیگر با تخلخل اولیه‌ی متفاوت (در این مقاله تخلخل اولیه‌ی سوخت UO_2 ، ۳٪ در نظر گرفته شده است)، می‌توان از ضریب تخلخل معادله‌ی ۲۷ به صورت معادله‌ی ۳۵ استفاده نمود (در شرایطی که هنوز حباب‌های گازی تولید نشده باشد یعنی $P_g = 0$). هم‌چنین رسانندگی گرمایی سوخت متخلخل UO_2 نیز از ضرب معادله‌ی ۲۷ در معادله‌ی ۳۴ حاصل می‌شود

$$k_o = k_{95} \times \left[1 - \pi \left(\frac{3}{4\pi} \cdot 0.05 \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{-1} \quad (34)$$

$$k_d = k_o \times \left[1 - \pi \left(\frac{3}{4\pi} P_v \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{-1} \quad (35)$$

در رابطه‌های بالا k_o و k_{95} به ترتیب، رسانندگی گرمایی در ۱۰۰٪ و ۹۵٪ چگالی نظری است و k_d رسانندگی گرمایی در درصد چگالی نظری d است. ضریب $\left[1 - \pi \left(\frac{3}{4\pi} \cdot 0.05 \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{-1}$ رسانندگی گرمایی را از ۹۵٪ به ۱۰۰٪ چگالی نظری برمی‌گرداند.

شکل ۶ تحول رسانندگی گرمایی سوخت UO_2 با رابطه‌ی هالدرن را به صورت تابعی از میزان مصرف سوخت برای دو حالت تخلخل حجمی ثابت با مقدار ۳٪ و تخلخل متغیر با میزان مصرف سوخت محاسبه شده با رابطه‌های بالا، مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نظر گرفتن تحول تخلخل با میزان مصرف سوخت به کاهش رسانندگی گرمایی تا حدود ۲۵٪ در میزان مصرف سوخت موضعی 120 MWd/kgU و دمای 490 K منجر می‌شود که سازگاری بهتری با مقدارهای تجربی رسانندگی گرمایی تعیین شده توسط واکر و همکاران [۲۲] دارد. شکل ۷ رسانندگی گرمایی محاسبه شده از رابطه‌ی هالدرن را با احتساب تحول تخلخل به صورت تابعی از دما برای میزان مصرف سوخت‌های مختلف نشان می‌دهد. کاهش رسانندگی گرمایی ناشی از مصرف سوخت و دمای بالا به طور واضح در این شکل مشاهده می‌شود. لازم به یادآوری است که برای انجام مقایسه‌ی درست، داده‌های تجربی واکر از ۹۵٪ به ۹۷٪ چگالی نظری با استفاده از رابطه‌های ۳۴ و ۳۵ برای تخلخل‌های کروی شکل به‌نجار شده است.



- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. High Burn-Up Structure (HBS) 2. Sintering 3. Intragranular 4. Intergranular 5. Fuel Swelling 6. Porosity 7. Irradiation-Induced Recrystallization 8. Dispersion Fuel | <ol style="list-style-type: none"> 9. Rim Structure 10. Halden 11. Void 12. As-Fabricated Voids 13. Swelling Porosity 14. Matrix 15. Lattice Parameter 16. Hard Sphere |
|--|--|

- [1] J. Rest, An alternative explanation for evidence that xenon depletion, pore formation, and grain subdivision begin at different local burnups, *J. Nucl. Mater.*, 277 (2000) 231-238.
- [2] J. Rest, A model for the effect of the progression of irradiation-induced recrystallization from initiation to completion on swelling of UO₂ and U-10Mo nuclear fuels, *J. Nucl. Mater.*, 346 (2005) 226-232.
- [3] J. Rest, Derivation of analytical expressions for the network dislocation density, change in lattice parameter, and for the recrystallized grain size in nuclear fuels, *J. Nucl. Mater.*, 349 (2006) 150-159.
- [4] J. Rest, G. Kagana, A Physical description of fission product behavior in fuels for advanced power reactors, ANL-07/24, Argonne National Laboratory, (2007) 21-26.
- [5] J. Rest, editor: Rudy J.M. Konings, *Comp. Nucl. Mater.*, Vol. 3, Elsevier (2012) 579-627.
- [6] A.L. Loeb, Thermal Conductivity: VIII, A theory of thermal conductivity of porous materials, *J. Amer. Ceram. Soc.*, 37 (1954) 96-99.
- [7] H. Kampf, G. Karsten, Effects of different types of void volume on the radial temperature distribution of fuel pins, *Nucl. Appl. Technol.*, 9 (1970) 288-300.
- [8] J. Rest, The DART Dispersion Analysis Research Tool: A Mechanistic Model for Predicting Fission-Product-Induced Swelling of Aluminum Dispersion Fuels, AN L-95/36, (1995).
- [9] M. Owaki, N. Ikatsu, K. Ohira, N. Itagaki, Development of a fuel rod thermal-mechanical analysis code for high burn up, IAEA-TECDOC-1233, Session 6 (2000) 375-385.
- [10] B.H. LEE, Y.H. KOO, D.S. SOHN, Rim characteristics and their effects on the thermal conductivity in high burnup UO₂ fuel, *J. Nucl. Sci. Tech.*, 38 (2001) 45-52.
- [11] M. Lemes, A. Soba, A. Denis, An empirical formulation to describe the evolution of the high burnup structure, *J. Nucl. Engin. Tech.*, 456 (2015) 174-181.
- [12] J. Spino, A.D. Stalios, H. Santa Cruz, D. Baron, Stereological evolution of the rim structure in PWR-fuels at prolonged irradiation: Dependencies with burnup and temperature, *J. Nucl. Mater.*, 354 (2006) 66-84.
- [13] J. Spino, J. Rest, W. Goll, C.T. Walker, Matrix swelling rate and cavity volume balance of UO₂ fuels at high burnup, *J. Nucl. Mater.*, 346 (2005) 131-144.
- [14] W. Wiesenack, Assessment of UO₂ conductivity degradation based on in-pile temperature data, *Proc. Int. Topi. Mtg. LWR fuel performance*, Portland, Oregon, (1997) 507.
- [15] D.R. Olander, Fundamental aspects of nuclear fuel elements, Technical Information Center & Energy Research and Development Administration (publisher), USA, (1976) 193-194.
- [16] J. Rest, A model for the influence of microstructure, precipitate pinning and fission gas behavior on irradiation-induced recrystallization of nuclear fuels, *J. Nucl. Mater.*, 346 (2004) 175-184.



- [17] Y. Cui, S. Ding, Z. Chen, Y. Huo, Modifications and applications of the mechanistic gaseous swelling model for UMo fuel, *J. Nucl. Mater.*, 457 (2015) 157-164.
- [18] C. Ronchi, M. Sheindlin, D. Staicu, M. Kinoshita, Effect of burn-up on the thermal conductivity of uranium dioxide up to 100.000 MWd/t, *J. Nucl. Mater.*, 327 (2004) 58-76.
- [19] DL. Hagrman, GA. Reymann, MATPRO version 11-A, Handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel rod behavior, 3rd edn. TREENUREC-1280, *Adv. Inorg. Chem.*, (1979).
- [20] J. Rest, A microstructurally-based model for the evolution of irradiation-induced recrystallization in U-Mo monolithic and Al-dispersion fuels, RERTR-2004 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, USA, Argonne National Laboratory, (2004) 17.
- [21] C.T. Walker, D. Staicu, M. Sheindlin, D. Papaioannou, W. Goll, F. Sontheimer, On the thermal conductivity of UO₂ nuclear fuel at a high burnup of around 100 MWd/kgHM, *J. Nucl. Mater.*, 350 (2006) 19-39.
- [22] M.L. Bleiberg, R.M. Berman, B. Lustman, Effects of high burn-up on oxide ceramic fuels, in *symp. on radiation damage in solid and reactor materials*, Proc. Series, IAEA, Venice, (1963) 319.
- [23] C.B. Lee, J.G. Bang, D.H. Kim, Y.H. Jung, Development of irradiated UO₂ thermal conductivity model, IAEA-TECDOC-1233, (2000) 363-371.
- [24] R. Brandt, J. Neuer, Thermal conductivity and thermal radiation properties of UO₂, *J. Non-Equilib. Thermodyn.*, 1 (1976) 3-23.
- [25] B. Roostaii, H. Kazeminejad, S.Khakshournia, Influence of porosity formation on irradiated UO₂ fuel thermal conductivity at high burnup, *J. Nucl. Mater.*, 479 (2016) 374-381.