

بررسی عملکرد انتقال حرارت در سوخت هسته‌ای صفحه‌ای از نوع پراکنده

بهاره روستایی

پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران-ایران

چکیده

در سوخت‌های نوع پراکنده (Dispersion Fuels)، ذرات سوخت در بستری از ماده زمینه که می‌تواند فلز یا سرامیک باشد، قرار می‌گیرند. این نوع سوخت بیشتر در راکتورهای تحقیقاتی به کار می‌رود. در کل، در تمامی راکتورها تعیین توزیع دما جهت انتقال حرارت مناسب، اطمینان از ایمنی و طراحی مواد و ساختار سوخت بسیار حائز اهمیت است. در کار حاضر، برای بررسی اثرات ذرات سوخت و فلز زمینه بر روی کارکرد حرارتی سوخت، معادلات انتقال حرارت ذرات سوخت، فلز زمینه و غلاف به روش المان محدود با استفاده از نرم افزار ANSYS جهت تعیین دقیق توزیع دما در این نوع سوخت با در نظر گرفتن یک المان RVE، حل می‌گردد. نتایج حاصل، نشان دهنده اهمیت در نظر گرفتن تورم ذرات سوخت در محاسبه توزیع دمایی است و برای مصرف سوخت $U_{30\%}$ اختلاف دمایی ۶ درجه کلوین را نشان می‌دهد. به علاوه، با مقایسه انجام شده مشاهده می‌گردد، نتایج کار حاضر با نتایج سایر مقالات مطابقت خوبی دارد.

کلمات کلیدی: سوخت هسته‌ای نوع پراکنده، انتقال حرارت، روش المان محدود، نرم افزار ANSYS.

Study on the heat transfer performance of dispersion nuclear fuel plate

B. Roostaii

Nuclear reactor and safety School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 14395-836, Tehran-Iran.

Abstract

Fuel particles in dispersion fuels are placed in metal or ceramic matrix. Dispersion fuels are mostly used in research reactors. In general, in all reactors, determining of the temperature distribution for proper heat transfer, ensuring the safety and design of fuel materials and structure is very important. In the present work, to study the effects of fuel particles and matrix metal on the thermal performance of the fuel, the heat transfer equations of fuel particles, metal matrix and clad are solved by finite element method using ANSYS software to determine the exact temperature distribution in this type of fuel by considering an RVE element. The results show the importance of considering the swelling of fuel particles in calculating of the temperature distribution and for fuel burnup, 30% shows a temperature difference of 6 degrees. In addition, the comparison shows that the results of the present work are in good agreement with the results of other articles.

Key word: Dispersion nuclear fuel, heat transfer, finite element method, ANSYS software

۱. مقدمه

شبیه‌سازی‌های حرارتی نقش مهمی در طراحی بسیاری از کاربردهای مهندسی بازی می‌کند. در بسیاری از موارد، مهندسان یک تحلیل حرارتی را همراه با یک تحلیل تنش برای محاسبه تنش حرارتی دنبال می‌کنند (که این تنش‌ها از انبساط‌ها یا انقباض‌های حرارتی پدید آمده است).

با یک تحلیل حرارتی پایا با استفاده از طرق مختلف انتقال حرارت همچون رسانش، همرفت یا تابش می‌توان دماها، گرادیان‌های حرارتی، نرخ‌های جریان حرارتی و شارهای حرارتی را که توسط بارگذاری‌های حرارتی نامتغیر با زمان ایجاد شده است در یک هدف، محاسبه نمود. بعضی از این بارگذاری‌ها شامل همرفتی‌ها، تابش، نرخ‌های انتقال حرارتی، شارهای حرارتی، نرخ‌های تولید حرارت و مرزهای دما ثابت می‌باشد. علاوه بر این یک تحلیل حرارتی با خواص مواد ثابت، می‌تواند خطی یا با خواص مواد وابسته به دما، غیر خطی باشد. چون خواص حرارتی بیشتر مواد با دما تغییر می‌کند در نتیجه این تحلیل معمولاً غیر خطی می‌باشد. بسیاری از نرم افزارهای اختلاف محدود یا المان محدود تجاری همانند ANSYS، ABAQUS و ... و نیز بسیاری از کدهای هسته‌ای نظیر FRAPCON، DART، TRANSURANUS و غیره، تحلیل حرارتی و یا تحلیل حرارتی-مکانیکی انجام می‌دهند [۲ و ۱]. کارهای بسیاری در رابطه با تحلیل حرارتی سوخت‌های میله‌ای صورت گرفته است [۳ و ۴]، اما کمتر به سوخت‌های نوع صفحه‌ای پرداخته شده است [۵ و ۶].

به علت در دسترس نبودن کدهای هسته‌ای جهت بررسی رفتار و ریزساختار سوخت‌ها در داخل کشور و عدم امکان تهیه آن‌ها، استفاده از روش‌هایی که کاربرد نرم افزارهای تجاری مرسوم را ممکن می‌سازد بسیار حائز اهمیت و شایان توجه است.

در این مقاله، مشابه مراجع [۵ و ۶] سوخت صفحه‌ای از نوع پراکنده که در آن ذرات سوخت در شبکه‌ای از فلز زمینه قرار دارد، در نظر گرفته شده است. پس از تعیین یک مدل هندسی برای المان سوخت، تعیین شرایط مرزی و مدل‌های هدایت حرارتی برای ذرات سوخت UO_2 ، فلز زمینه و غلاف زیرکالوی، توزیع دما در المان سوخت محاسبه می‌شود. دلیل انتخاب UO_2 و زیرکالوی، در دسترس بودن اطلاعات مورد نیاز این مواد برای انجام محاسبات است. اما در کل می‌توان از این روش محاسباتی برای سایر سوخت‌ها و مواد مختلف غلاف استفاده نمود.

۱ روش کار

۱.۱ انتقال حرارت رسانش در حالت پایدار

معادله انتقال حرارت رسانش در حالت پایدار برای سوخت، فلز زمینه و غلاف می‌توان به ترتیب به صورت معادلات (۱) و (۲) نوشت:

$$\nabla \cdot (K_p(T)\nabla T) + \dot{q} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (K_{m \text{ or } c}(T)\nabla T) = 0 \quad (2)$$

که K (W/mK) هدایت حرارتی، T (K) دما و \dot{q} (W/m^3) نرخ تولید حرارت در واحد حجم و $K_p(T)$ ، $K_m(T)$ و $K_c(T)$ به ترتیب هدایت حرارتی سوخت، فلز زمینه و غلاف است [۵].

برای تعیین توزیع دمایی المان سوخت می‌بایست شرایط مرزی، هدایت حرارتی ذرات سوخت، فلز زمینه و غلاف، نرخ تولید حرارت ذرات سوخت و تورم ناشی از تابش دهی ذرات سوخت تعیین گردد.

۱،۲ مدل هندسی المان سوخت و شرایط مرزی

به علت ضخامت بسیار کوچک صفحه سوخت نسبت به طول و عرض آن، انرژی گرمایی تولیدی به طور عمده از سطوح بالایی و پایینی صفحه سوخت به آب خنک کننده منتقل می‌شود. در نتیجه سطوح بالایی و پایینی مهمترین مرزهای سوخت پراکنده صفحه‌ای است. برای بررسی اثرات ذرات سوخت و فلز زمینه روی کارکرد حرارتی سوخت، می‌بایست مدل‌سازی به گونه‌ای باشد که ریز ساختار سوخت را دربر گیرد. به دلیل مشابهت سوخت پراکنده با کامپوزیت‌های ذرات، می‌توان دانش مکانیک مقیاس مزو^۱ در کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات^۲ را به عنوان مرجع برای این سوخت‌ها به کار برد. در مدل‌سازی کامپوزیت‌های ذرات، روش RVE^۳ به طور معمول مورد قبول بوده و استفاده می‌شود. با فرض اینکه ذرات سوخت به طور متناوب در امتداد طول و عرض صفحه سوخت توزیع شده است، می‌توان یک مدل RVE بخصوص همانند شکل ۱ در آن انتخاب شده، دارای اندازه تکرار شونده (در مقیاس مزو) در جهت طول و عرض و اندازه واقعی (در مقیاس ماکرو) در جهت ضخامت است. برای ساده‌سازی فرض می‌شود ذرات کروی سوخت به صورت شکل ۱ ب چیده شده است.

برای افزایش سرعت محاسبات، مدل المان محدود مطابق با تقارن موجود در مدل RVE، به صورت $\frac{1}{8}$ انتخاب می‌شود (شکل ۱ پ). صفحه $Z = 0$ ، صفحه میانی صفحه سوخت و $Z = H/2$ سطح خارجی صفحه سوخت است که در تماس با آب خنک کننده می‌باشد. با توجه به اینکه صفحات $X = 0$ ، $X = a/2$ ، $Y = 0$ و $Y = a/2$ دارای تقارن هستند باید شرط مرزی بی دررو روی آنها به صورت $-k \frac{\partial T}{\partial n} = 0$ اعمال شود. صفحه $Z = H/2$ مرز جابجایی است که این شرط مرزی با معادله $-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_f)$ بیان می‌گردد. که h ضریب انتقال حرارت و T_f دمای آب خنک کننده است و n راستای عمودی بیرونی سطح مرزی را نشان می‌دهد [۵]. همچنین دماها و شارهای حرارتی در امتداد بردار عمود بر مرز مشترک فلز زمینه و غلاف و نیز در امتداد بردار عمود بر مرز مشترک سوخت و فلز زمینه پیوسته است.

۱،۳ نرخ تولید حرارت در ذرات سوخت

میزان تولید حرارت در واحد حجم ذرات سوخت مطابق با نرخ شکافت می‌باشد، با در نظر گرفتن اینکه از هر شکافت 200 MeV انرژی گرمایی آزاد می‌شود و $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$ است، می‌توان نرخ تولید حرارت در ذره سوخت، \dot{q}_p ، را بر حسب $\text{J/m}^3\text{s}$ را با استفاده از معادلات $\dot{q}_p = c \cdot \dot{f}$ و $c = 3.204 \times 10^{-11}$ محاسبه نمود. که در آن c مقدار انرژی گرمایی تولید شده در هر شکافت بر حسب J/fission می‌باشد، \dot{f} نرخ شکافت ذرات سوخت در واحد زمان و حجم نشان می‌دهد ($\text{fission/m}^3\text{s}$) [۵].

۱،۴ مدل هدایت حرارتی ذرات سوخت و غلاف

یک مدل معمول و پرکاربرد برای هدایت حرارتی سوخت تابش دیده UO_2 ، توسط Lucuta و همکاران [۷] پیشنهاد شد که مطابق معادله (۳) شامل شش جمله است که در معادلات (۴) تا (۷) ذکر شده است.

$$k^{Lucuta} \left(\frac{W}{mK} \right) = k_0 \kappa_S \kappa_P \kappa_{RD} \kappa_{DP} \kappa_{PP} \quad (۳)$$

$$k_0 \left(\frac{W}{mK} \right) = \frac{1}{0.0375 + 2.165 \times 10^{-4} T(K)} + \frac{4.715 \times 10^9}{T^2(K)} \exp \left(-\frac{16361}{T(K)} \right), \quad (۴)$$

$$\kappa_{RD} = 1 - \frac{0.2}{1 + \exp \left(\frac{T(K) - 900}{80} \right)} \quad (۵)$$

^۱ Meso-mechanics

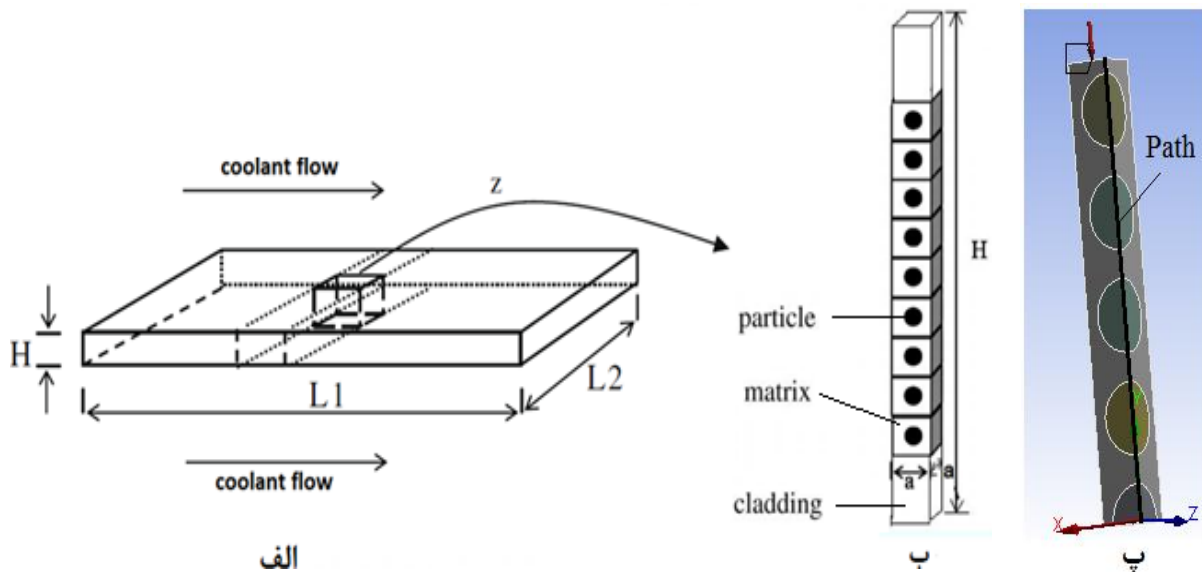
^۲ Particle-reinforced composite

^۳ Representative Volume Element

$$\kappa_{DP} = \left(\frac{1.09}{Bu^{3.265}} + \frac{0.0643}{\sqrt{Bu(\%)}} \sqrt{T(K)} \right) \arctan \left(\frac{1}{\frac{1.09}{Bu(\%)^{3.265}} + \frac{0.0643}{\sqrt{Bu(\%)}} \sqrt{T(K)}} \right) \quad (۶)$$

$$\kappa_{PP} = 1 + \frac{0.019Bu(\%)}{(3-0.019Bu(\%))} \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{T(K)-1200}{100}\right)} \quad (۷)$$

κ_0 هدایت حرارتی سوخت تازه UO_2 در ۱۰۰٪ چگالی نظری است. κ_S به اثر انحراف از استوکیومتری مرتبط است و تحت شرایط کارکرد عادی راکتور، $\kappa_S = 1$. κ_P بعنوان ضریب تخلخل، اثر تخلخل روی هدایت حرارتی را نشان می‌دهد و مطابق با مرجع [۷] برابر با $\kappa_P = \frac{1-P}{1+(\sigma-1)P}$ است که P کسر تخلخل ($p=0.05$) و σ ضریب شکل تخلخل است (برای تخلخل‌های کروی $\sigma = 1.5$). κ_{RD} به اثر آسیب تابشی و افزایش عیوب شبکه و متعاقباً کاهش هدایت حرارتی برمی‌گردد [۷]. κ_{DP} اثر محصولات شکافت محلول در سوخت و κ_{PP} اثر محصولات شکافت رسوب کرده در سوخت است.



شکل ۱. الف) هندسه صفحه‌ای سوخت نوع پراکنده، ب) استخراج سلول RVE، پ) مدل سازی به صورت $\frac{1}{8}$

هدایت حرارتی زیرکالوی با معادله (۸) توصیف می‌گردد که در آن $T(K)$ دما است [۵].

$$\kappa_{Zr} = 7.51 + 2.09 \times 10^{-2}T - 1.45 \times 10^{-5}T^2 + 7.67 \times 10^{-9}T^3 \quad (۸)$$

۱.۵ روابط تورم سوخت UO_2

رابطه تورم ذرات سوخت تحت تابش مطابق معادله (۹) شامل سه بخش تورم حباب گاز $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs}$ ، تورم محصولات جامد شکافت $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{ss} = 0.0025$ به ازای هر 10^{26} fission/ m^3 و چگال شدن $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{ds}$ است [۵].

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{TOT} = \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs} + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{ss} + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{ds} \quad (۹)$$

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs} = 4.396 \times 10^2 \exp\left(-\frac{1.645 \times 10^4}{T(K)-100}\right) / 10^{26} \frac{\text{fission}}{m^3} \quad (۱۰)$$

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{ds} = -0.6 \times [0.01420(1 - \exp(-6.7943.BU)) + 0.00793(1 - \exp(-1.1434.BU))] \quad (۱۱)$$

¹ Densification

$BU(MWd/kg U_2)$ مصرف سوخت است. شایان ذکر است روابط تجربی ذکر شده برای تورم ذرات سوخت (روابط (۹) الی (۱۱)) فقط تابع دما و مصرف سوخت هستند. اصولاً تورم سوخت به میزان مصرف سوخت، دما و ترکیب و خواص مکانیکی و فیزیکی ماده سوخت مرتبط است.

۱،۶ تحلیل حرارتی

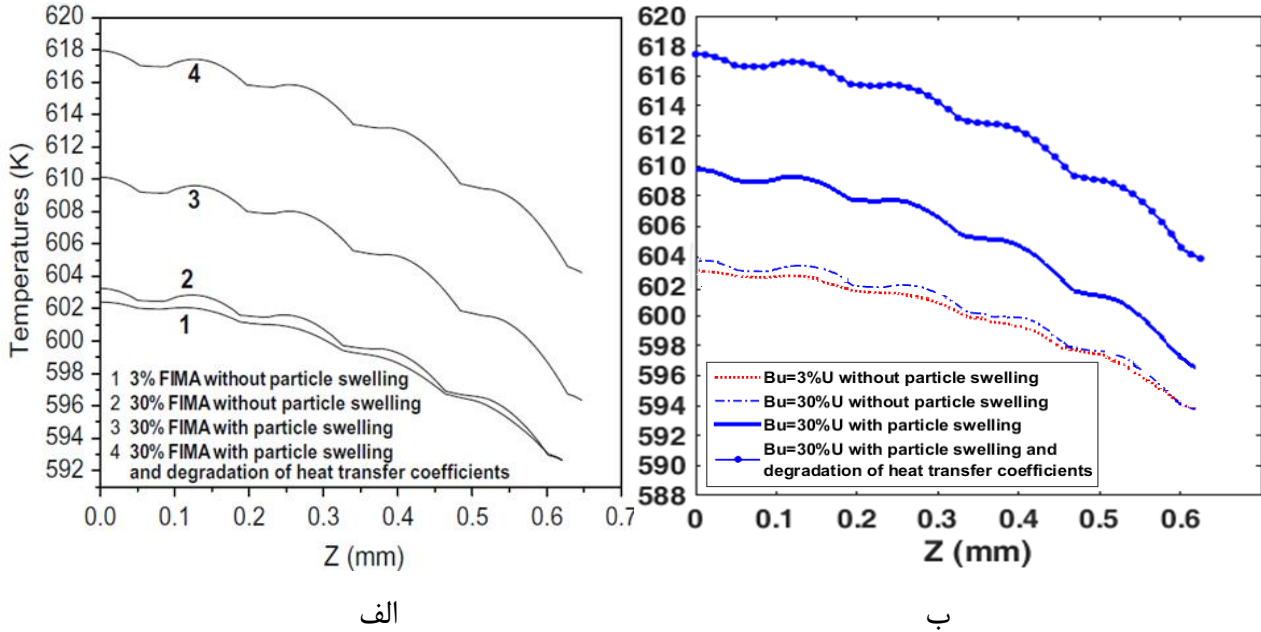
در کار حاضر به منظور تعیین توزیع دما در المان سوخت، حل معادلات انتقال حرارت ذرات سوخت، فلز زمبینه و غلاف به روش المان محدود با استفاده از نرم افزار ANSYS انجام شده است.

ابعاد مدل RVE در شکل ۱ شامل شعاع ذرات سوخت، ضخامت گوشت سوخت و ضخامت غلاف به ترتیب برابر با $5 \times 10^{-5} m$ ، $6.25 \times 10^{-4} m$ و $4 \times 10^{-4} m$ است ($H = clad + meat + clad$). کسر حجمی ذرات سوخت ۲۰٪ است. ضریب انتقال حرارت h ، و دمای آب خنک کننده T_f ، است که به ترتیب $2 \times 10^4 W/m^2$ و $573 K$ و نرخ تولید حرارت برابر با $3.204 \times 10^9 W/m^3$ فرض شده است.

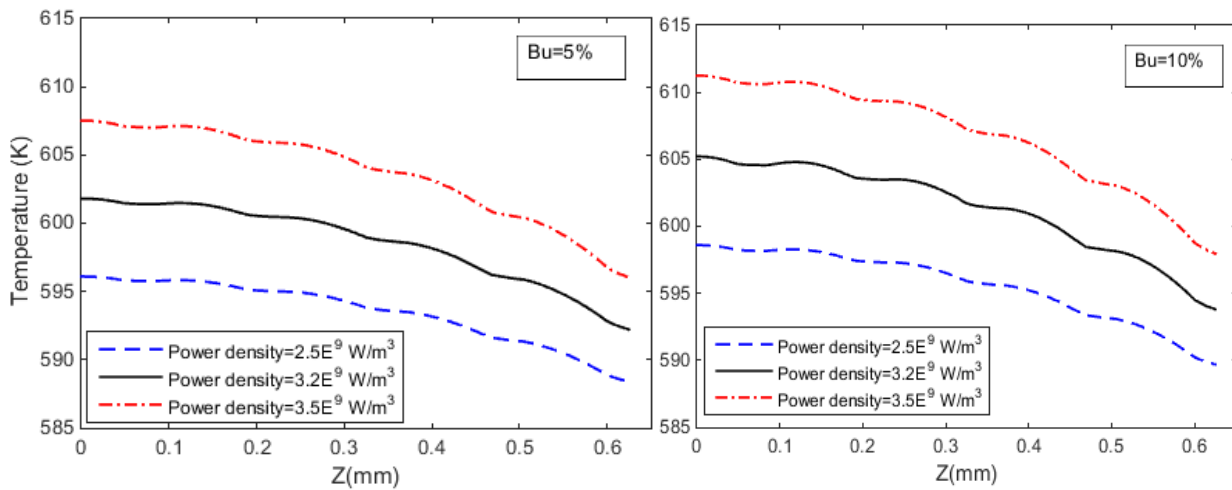
اگر مدل، همانند مرجع [۵ و ۶] بدون غلاف در نظر گرفته شود (شکل ۱پ)، آنگاه می‌توان توزیع دما در امتداد مسیر (Path) نشان داده شده در شکل ۱پ را نظیر شکل ۲ محاسبه و رسم نمود که در آن توزیع دمایی المان سوخت (در راستای ضخامت و با در نظر گرفتن تعداد ۴/۵ ذره سوخت و فلز شبکه مابین آن مطابق شکل ۱پ) در مصرف سوخت ۳٪ U و ۳۰٪ U بدون در نظر گرفتن تورم ذرات سوخت و بار دیگر با در نظر گرفتن تورم ذرات سوخت و نیز تغییر در ضریب انتقال حرارت h رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در حالتی که تورم ذرات سوخت در محاسبات لحاظ نشود، اختلاف چندانی در توزیع دمایی المان در نظر گرفته شده بین مصرف سوخت ۳٪ U و ۳۰٪ U ، مشاهده نمی‌گردد اما برای مصرف سوخت‌های بالا که مقدار تورم ذرات سوخت قابل ملاحظه است می‌بایست در نظر گرفته شود. این موضوع در منحنی سوم شکل ۲، قابل مشاهده می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که بیشینه دمای منحنی ۳۰٪ U ، بدون در نظر گرفتن تورم ذرات سوخت و با در نظر گرفتن آن حدود ۶ درجه با هم اختلاف دمایی دارد. همچنین تورم ذرات سوخت و افزایش ضخامت صفحه سوخت می‌تواند باعث وخیم شدن انتقال حرارت در مرز جابجایی صفحه سوخت و تغییر در ضریب انتقال حرارت h و کاهش آن شود به طوری که بیشینه دما را در منحنی توزیع دمای المان، افزایش دهد. این مورد در منحنی چهارم قابل مشاهده است که در آن مقدار h از $2 \times 10^4 W/m^2 K$ در منحنی سوم به $1/5 \times 10^4 W/m^2 K$ در منحنی چهارم رسیده است و اختلاف دمایی ۸ درجه‌ای را به وجود آورده است.

در شکل ۳ اثر تغییر چگالی توان بر توزیع دمایی المان سوخت با لحاظ نمودن تورم ذرات سوخت در مصرف سوخت‌های ۵٪ U و ۱۰٪ U نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد با افزایش توان در واحد حجم، دما نیز افزایش می‌یابد.

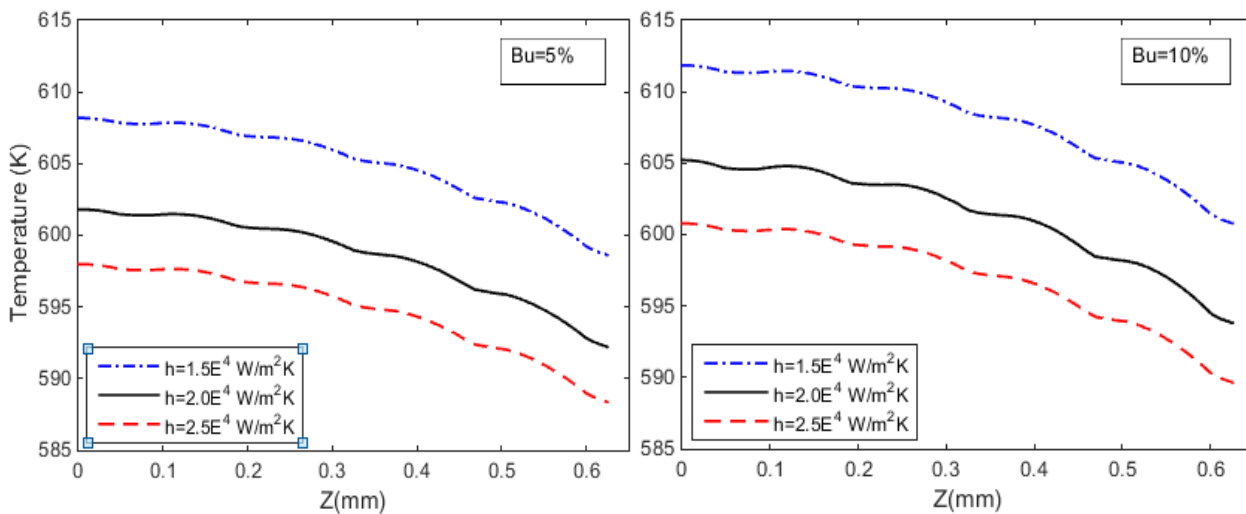
در شکل ۴ اثر تغییرات ضریب انتقال حرارت بر توزیع دمای المان سوخت با لحاظ نمودن تورم ذرات سوخت در مصرف سوخت‌های ۵٪ U و ۱۰٪ U نمایش داده شده است. مطابق با انتظار با کاهش مقدار ضریب انتقال حرارت مقدار دما افزایش می‌یابد.



شکل ۲. اثر تورم ذرات سوخت بر توزیع دمایی المان سوخت (الف) نتایج مرجع [۵] و (ب) مقادیر محاسبه شده در کار حاضر



شکل ۳. اثر تغییرات چگالی توان بر توزیع دمایی المان سوخت در مصرف سوخت‌های ۵٪U و ۱۰٪U.



شکل ۴. اثر تغییرات ضریب انتقال حرارت بر توزیع دمایی المان سوخت در مصرف سوخت‌های ۵٪U و ۱۰٪U.

۲ نتیجه گیری

در این کار جهت بررسی رفتار حرارتی ریزساختار سوخت صفحه‌ای نوع پراکنده (شامل ذرات سوخت و فاز زمینه به صورت جداگانه) و تعیین دقیق توزیع دمایی بر روی المان RVE در نظر گرفته شده، از کد المان محدود ANSYS استفاده گردید. اثر تورم ذرات سوخت در مصرف سوخت‌های بالا با استفاده از روابط تورمی موجود و نیز تغییر ضریب انتقال حرارت h بر روی توزیع دمایی بررسی گردید. مشخص شد، با در نظر گرفتن تورم ذرات سوخت در مصرف سوخت U ، اختلاف دمایی 6 درجه‌ای حاصل می‌شود. در نهایت نتایج حاصل با کارهای مشابه مقایسه شد که مطابقت خوبی مشاهده گردید.

مراجع

- [1] 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, NUREG/CR-7022, (2014).
- [2] J. Rest, "The DART Dispersion Analysis Research Tool: A Mechanistic Model for Predicting Fission-Product-Induced Swelling of Aluminum Dispersion Fuels", ANL-95/36, Argonne National Laboratory, (1995).
- [3] K. Ito, et al. "FEMAXI-III, a computer code for fuel rod performance analysis." Nuclear engineering and design 76.1 (1983): 3-11.
- [4] Lassmann, K. "TRANSURANUS: a fuel rod analysis code ready for use." Journal of nuclear materials 188 (1992): 295-302.
- [5] S. Ding, Y. Huo, X. Yan, Modeling of the heat transfer performance of plate-type dispersion nuclear fuel elements, Journal of Nuclear Materials, 392 (2009) 498–504.
- [6] S. Ding, X. Jiang, Y. Huo, L. Li, Reliability analysis of dispersion nuclear fuel elements, Journal of Nuclear Materials, 374 (2008) 453–460.
- [7] P.G. Lucuta, HJ. Matzke, I.J. Hastings, A pragmatic approach to modelling thermal conductivity of irradiated, UO_2 fuel, Journal of Nuclear Materials, 232 (1996) 166-180.