



آنالیز انتقال حرارت در حالت غیر هم محور بودن قرص‌های سوخت و غلاف در میله سوخت رآکتور هسته‌ای به روش‌های تحلیلی و عددی

حبیب امین فر*، محمدحسین غفاری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، صندوق پستی: ۱۶۴۷۱-۵۱۶۶۶، تبریز - ایران

چکیده: میله سوخت رآکتور هسته‌ای متشکل از قرص‌های سوخت، فاصله گازی و غلاف می‌باشد که در حالت عادی قرص‌های سوخت و غلاف پیرامون آنها هم‌محور بوده و فاصله گازی هم در حد فاصل این دو جزء قرار گرفته است. در این حالت معادله انتقال حرارت در میله سوخت دو بعدی است و به زاویه بستگی ندارد. مسلماً حذف شدن فاصله گازی در یک جهت خاص (حالت غیرهم محوری قرص‌های سوخت و غلاف)، منجر به افزایش دمای غلاف و سیال خنک‌کننده در آن جهت خواهد شد. در این پژوهش نحوه توزیع درجه حرارت در سه بعد برای یک میله سوخت، به دو روش تحلیلی و عددی در حالت پایا، برای بدست آوردن ماکزیموم درجه حرارت در قرص‌های سوخت، غلاف و سیال خنک‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از دو روش تحلیلی و عددی تطابق خوبی با هم داشته و نشان می‌دهند پدیده‌هایی چون ذوب موضعی غلاف و جوشش سیال بوجود نخواهند آمد.

واژه‌های کلیدی: محاسبات سه‌بعدی، میله سوخت، فاصله گازی، غلاف، قرص‌های سوخت، سیال خنک‌کننده، غیر هم محور، ارزیابی‌های تطبیقی

Analytical and Numerical Heat Transfer Analysis of Eccentric Fuel Pellets in a Fuel Element of Nuclear Reactor

H. Aminfar*, M.H. Ghafari

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, P.O. Box: 51666-16471, Tabriz – Iran

Abstract: A fuel element in nuclear reactors generally consists of fuel pellets, gaseous gap and cladding. Normally the pellets and cladding are coaxial. In this case; heat conduction equation in the fuel element is two dimensional, independent on angle (θ). Certainly elimination of gaseous gap in one direction (eccentricity of fuel pellets), will increase cladding and coolant temperature at the same direction. In this work, three dimensional analytical and numerical steady state heat transfer behavior in eccentric fuel element were studied to determine maximum temperature of fuel pellets, cladding, and coolant. Good agreement between analytical and numerical results was obtained. It is concluded that because of eccentricity of fuel element, melting of cladding and boiling in coolant will not occur.

Keywords: Three Dimensional Calculations, Fuel Element, Gaseous Gap, Cladding, Fuel Pellets, Coolant, Eccentric, Comparative Evaluations

*email: hh_aminfar@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

در این پژوهش نحوه توزیع درجه حرارت در سه بعد و در بدترین حالت (که تمام قرص های سوخت در امتداد یک خط طولی بر غلاف مماس باشند)، با در نظر گرفتن یک میله سوخت در حالت جریان سیال تک فازی و پایا و تولید حرارت کسینوسی در قرص های سوخت، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تئوری

در دستگاه مختصات استوانه ای (z, θ, r) ، معادله رسانش سه بعدی گرما به صورت زیر است [۳]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q'''(z)}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن $q'''(z)$ تولید گرما در واحد حجم می باشد. با در نظر گرفتن حالت پایا، معادله (۱) به صورت زیر در می آید:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q'''(z)}{k} = 0 \quad (2)$$

۳- حل تحلیلی

از آنجا که تغییرات مقدار ترم $\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$ در مقایسه با ترم $\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$ در میله سوخت با توجه به ابعاد آن (جدول ۱) ناچیز می باشد [۴]، در حل تحلیلی معادله (۲) از ترم $\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$ صرف نظر می شود:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{q'''(z)}{k} = 0 \quad (3)$$

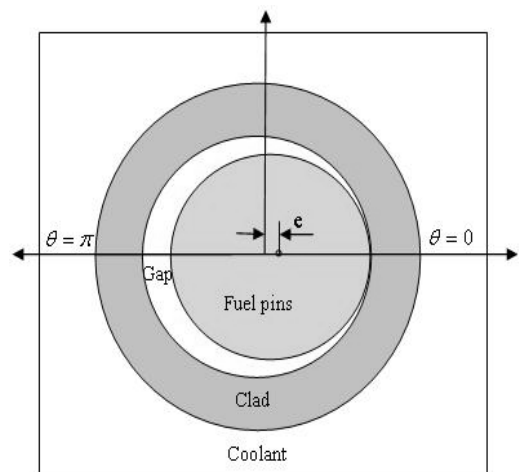
با توجه به ساکن بودن گاز در ناحیه گپ گازی و ضخامت بسیار کم این ناحیه (جدول ۱)، انتقال حرارت جابجایی وجود ندارد و سهم انتقال حرارت از طریق تشعشع نسبت به انتقال حرارت به وسیله هدایت در میله سوخت با توجه به محدوده نسبتاً پایین دما در آن، بسیار ناچیز می باشد (شکل ۲) [۴].

جدول ۱- مشخصات هندسی اجزا.

مشخصات هندسی	
۱	تعداد میله های سوختی
۱/۳۶۳	قطر میله سوختی (cm)
۱/۱۴۸	قطر قرص سوختی (cm)
۰/۰۹۷۵	ضخامت غلاف (cm)
۰/۰۱	ضخامت فاصله گازی (cm)
۳۴۳	طول میله سوختی (cm)H

قلب یک رآکتور هسته ای متشکل از تعدادی مجتمع سوخت می باشد که هر یک از آنها، از تعدادی میله سوخت، نگهدارنده و کانال های عبور سیال خنک کننده تشکیل شده اند. در حالت کلی، ماکزیموم دما در قلب رآکتور باید کمتر از دمای ذوب فلزات موجود در ساختار آن و در رآکتورهای با خنک کننده آب تحت فشار، کمتر از دمای جوش سیال خنک کننده باشد. همانطور که اشاره شد در حالت عادی قرص های سوخت و غلاف پیرامون آنها در یک میله سوخت هم محور بوده و فاصله گازی هم در حد فاصل این دو جزء قرار گرفته است. وجود فاصله گازی مقاومت عمده ای در جهت انتقال حرارت از سطح سوخت ایجاد می کند. مسلماً حذف شدن فاصله گازی در یک راستای خاص، (شکل ۱)، (حالت غیر هم محوری قرص های سوخت و غلاف)، منجر به افزایش دمای غلاف و سیال خنک کننده در آن راستا خواهد شد که مسأله انتقال حرارت را از حالت دوبعدی به سه بعدی تغییر خواهد داد [۱ و ۲]. با توجه به افزایش دما در جهتی که فاصله گازی حذف شده است و با توجه به امکان ذوب شدن موضعی غلاف، بررسی توزیع دما و میزان افزایش دمای میله سوخت ضروری می باشد.

آنالیز انتقال حرارت در یک میله سوخت به صورت عددی با کد COBRA III-C و نرم افزار Fluent و برای یک کانال سوخت با استفاده از کد COBRA III-C به منظور بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان توسط ح. امین فر و م. محمدپور انجام شده است [۴ و ۵]. لازم به ذکر است که در این تحقیق قرص های سوخت و غلاف پیرامون آنها هم محور فرض شده است و در این حالت مسأله انتقال حرارت دوبعدی خواهد بود.



شکل ۱- نمای یک میله سوخت در حالت غیر هم محوری.



جدول ۲- مشخصات مواد مورد استفاده.

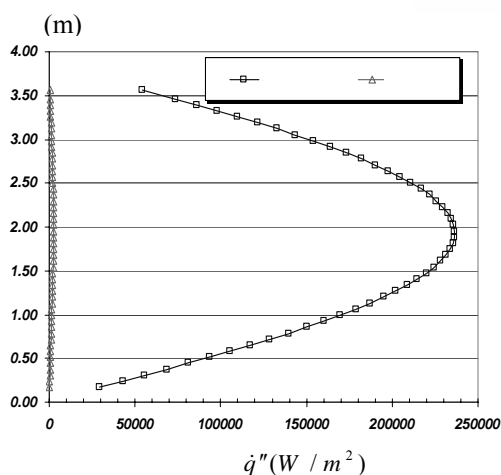
مشخصات مواد	
سیال خنک کننده	آب سنگین (D_2O)
سوخت	دی اکسید اورانیوم (UO_2)
غلاف	زیرکانیوم
ناحیه گازی	هلیوم

جدول ۳- خواص فیزیکی مواد در دستگاه SI.

خواص مواد	
۴۲۰۰	گرمای ویژه سیال خنک کننده در $60^\circ C$ (J/kg K)
۱۰۸۷,۷	چگالی سیال خنک کننده (kg/m^3)
$10^{-4} * 4/3$	ویسکوزیته دینامیک سیال خنک کننده (Pa.s)
۰/۶۲۶	ضریب هدایت سیال خنک کننده (W/mK)
۳۰۱/۴	گرمای ویژه غلاف در $100^\circ C$ (J/kg K)
۶۵۰۳	چگالی غلاف (kg/m^3)
۲۰/۴	ضریب هدایت غلاف (W/mK)
۲۹۹	گرمای ویژه سوخت در $300^\circ C$ (J/kg K)
۱۰۹۵۶/۶	چگالی سوخت (kg/m^3)
۶/۹	ضریب هدایت سوخت (W/mK)
۰/۱۷۸	ضریب هدایت فاصله گازی در $150^\circ C$ (W/mK)

جدول ۴- شرایط مرزی.

شرایط مرزی	
۲۳۹۲۵/۹۲۶	توان تولیدی هر میله سوخت؛ Q (W)
۰/۱۶۵۵۵۱۰۳	نرخ جرمی (kg/s)
$q_c''' \cos(\frac{\pi z}{H})$	ترم تولید در سوخت (W/m^3)
۲/۸۹	فشار سیال خنک کننده در خروج (bar) _{abs}
۵۰	درجه حرارت سیال خنک کننده ($^\circ C$)



شکل ۲- نمودار مقایسه مقدار انتقال حرارت بوسیله هدایت با مقدار تشعشع در راستای میله سوخت در ناحیه گازی.

۱-۳ حل تحلیلی در حالت هم محوری

در حالت هم محوری قرص‌های سوخت و غلاف، با توجه به این نکته که توزیع دما نسبت به پارامتر θ متقارن است، معادله (۳) به صورت معادله (۴) ساده می‌شود:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q'''(z)}{k} = 0 \quad (4)$$

معادله (۴) با استفاده از مشخصات و شرایط مرزی داده شده در جدول‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در نظر گرفتن شار حرارتی به صورت $q'''(z) = q_c''' \cos(\frac{\pi z}{H_{He}})$ (شکل ۳)، حل و توزیع درجه حرارت در هر جزء معلوم می‌شود [۱ و ۴]. لازم به ذکر است که q_c''' از رابطه $Q = \int_{-\frac{H_e}{2}}^{\frac{H_e}{2}} q'''(z) A_c dz$ با توجه به معلوم بودن A_c (سطح مقطع قرص سوخت) و سهم تولیدی هر میله سوخت (Q) که مقادیر آنها در جدول‌های شماره ۱ و ۴ مندرج است، حساب می‌شود: $q_c''' = 93973400 \text{ W/m}^3$. اینک به اختصار فقط به معالات توزیع دما در قسمت‌های مختلف اشاره می‌شود.

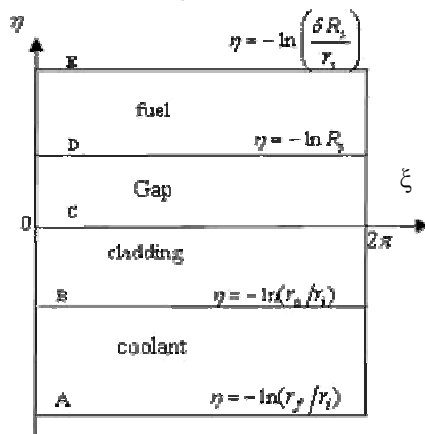
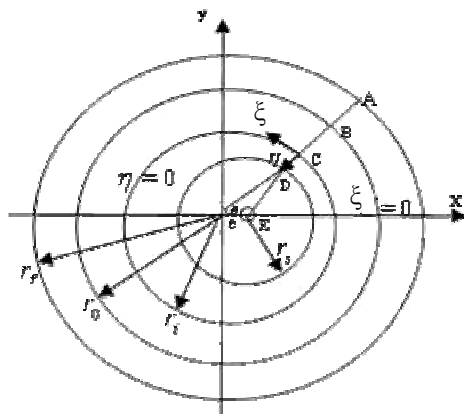
$$T_{cool} = T_{in} + \frac{q_c''' A_c H_e}{\pi \dot{m} c_p} \left(\sin \frac{\pi z}{H_e} + \sin \frac{\pi z}{2H_e} \right) \quad (5)$$

که در آن T_{in} دمای سیال ورودی خنک کننده و T_{cool} دمای سیال در هر نقطه در طول میله سوخت می‌باشد.

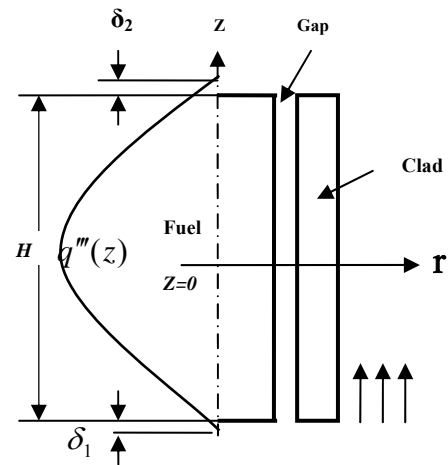
فضای فیزیکی (r, θ, z) با توجه به شرایط مرزی و هندسه موجود پیچیده است، لذا از یک نگاشت استفاده کرده و فضای فیزیکی را مطابق شکل ۴ به فضای محاسباتی (ξ, η, z) منتقل کرده و پس از حل معادلات در فضای (ξ, η, z) ، با نگاشت معکوس پاسخها را به فضای (r, θ, z) برمی گردانیم. برای نگاشت محیط فیزیکی، نگاشت های متفاوتی را در نظر می گیریم. به عبارت دیگر با نگاشت های متفاوتی نواحی گپ گازی، غلاف، سیال خنک کننده و قرص های سوخت را به فضای محاسباتی (ξ, η, z) منتقل می کنیم [۶ و ۷].

۳-۲-۱ نگاشت سیال خنک کننده و غلاف

برای نگاشت ناحیه سیال خنک کننده، با توجه به اینکه فضای فیزیکی مطابق شکل ۱ به صورت مربعی است، با استفاده از رابطه $D_h = \frac{4A}{P}$ ، قطر هیدرولیکی معادل ناحیه سیال خنک کننده مطابق شکل ۴ حساب شده و جهت نگاشت از فضای فیزیکی (r, θ, z) به فضای محاسباتی (ξ, η, z) بکار می رود بنابراین، از یک تابع تحلیلی برای نگاشت هر دو ناحیه غلاف و سیال خنک کننده استفاده می شود و فقط دامنه η تغییر خواهد کرد.



شکل ۴- فضای فیزیکی و محاسباتی.



شکل ۳- میله سوخت با شار حرارتی کسینوسی.

$$T_c = T_{cool} + \frac{q_c''' A_c}{hP} \cos \frac{\pi z}{H_e} \quad (6)$$

P بیانگر محیط تماس غلاف با سیال خنک کننده و T_c دمای سطح خارجی غلاف می باشد. (لازم به یادآوری است که برای حساب کردن ضریب انتقال حرارت جابجایی از رابطه دیتوس- بولتر^(۱) استفاده شده است $h = \frac{k Nu}{D_h}$ و

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \text{ و } D_h = \frac{4A}{P}.$$

$$T_s = T_c + \frac{q_c''' A_c}{2\pi} \left[\frac{1}{k_c} \ln \frac{r_0}{r_i} + \frac{1}{k_G} \ln \frac{r_i}{r_s} \right] \cos \frac{\pi z}{H_e} \quad (7)$$

و T_s دمای سطح سوخت است.

$$T_m = T_s + \frac{q_c''' A_c}{4\pi k_f} \cos \frac{\pi z}{H_e} \quad (8)$$

که T_m دمای مرکز سوخت است.

مطابق شکل ۳، δ_1 و $\delta_2 = 0.73 \text{ mm}$ ، طول هایی هستند که اگر به طول میله سوخت اضافه شوند، شار حرارتی کسینوسی کامل می گردد؛ $He = H + \delta_1 + \delta_2$.

۳-۲-۲ حل تحلیلی در حالت غیر هم محوری

بعد از حل معادله (۴)، که در آن توزیع دما مستقل از پارامتر θ بود، معادله (۳) حل می شود. با توجه به اینکه حل معادله (۳) در



$$\eta = -\ln\left(\frac{\sqrt{((ar_i - x)(ax - r_i) - ay^2)^2 + y^2 r_i^2 (1 - a^2)^2}}{(ax - r_i)^2 + a^2 y^2}\right) \quad (16)$$

$$\frac{x}{r_i} = \frac{e^{-\eta} (1 + a^2) \cos \zeta + a (1 + e^{-2\eta})}{1 + a^2 e^{-2\eta} + 2ae^{-\eta} \cos \zeta} \quad (17)$$

$$\frac{y}{r_i} = \frac{e^{-\eta} (1 - a^2) \sin \zeta}{1 + a^2 e^{-2\eta} + 2ae^{-\eta} \cos \zeta} \quad (18)$$

$$\xi = \zeta' + i\eta = -i \ln\left(\frac{z}{r_i}\right) \quad (9)$$

$$\zeta' = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad \text{و} \quad \eta = -\ln\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r_i}\right) \quad (10)$$

$$\frac{x}{r_i} = e^{-\eta} \cos \zeta' \quad \text{و} \quad \frac{y}{r_i} = e^{-\eta} \sin \zeta' \quad (11)$$

۳-۲-۳ نکاشت قرص‌های سوخت
 تابع تحلیلی زیر برای نکاشت قرص‌های سوخت به کار می‌رود:

که برای سیال $-\ln\left(\frac{r_f}{r_i}\right) \leq \eta \leq -\ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)$ بوده و برای غلاف $-\ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right) \leq \eta \leq 0$ است.

۳-۲-۳ نکاشت ناحیه گازی

برای انتقال ناحیه گازی از تابع تحلیلی زیر استفاده می‌کنیم:

$$\xi = \zeta'' + i\eta = -i \ln\left[\frac{(z - e)R_s}{r_s}\right] \quad (19)$$

$$\zeta'' = \tan^{-1} \frac{y}{x - e} \quad (20)$$

$$\eta = -\ln\left(\frac{R_s \sqrt{(x - e)^2 + y^2}}{r_s}\right) \quad (21)$$

$$\xi = \zeta + i\eta = -i \ln\left(\frac{ar_i - z}{az - r_i}\right) \quad (12)$$

که در آن $0 < \zeta < 2\pi$ و $0 < \eta < -\ln R_s$ تغییر می‌کند. در این رابطه R_s و a به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$-\ln(R_s) \leq \eta \leq -\ln\left(\frac{\delta R_s}{r_s}\right) \quad \text{که در آن}$$

$$a = \frac{r_i^2 + e^2 - r_s^2}{2er_i} - \left[\left(\frac{r_i^2 + e^2 - r_s^2}{2er_i}\right)^2 - 1\right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$\frac{x}{r_s} = \frac{e^{-\eta}}{R_s} \cos \zeta'' + \frac{e}{r_s} \quad (22)$$

$$\frac{y}{r_s} = \frac{e^{-\eta}}{R_s} \sin \zeta'' \quad (23)$$

$$R_s = \left[\frac{e - ar_i}{a(ea - r_i)}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

در انتقال معادلات (۹) و (۱۹) روابط زیر بکار رفته‌اند:

$$\zeta' = \tan^{-1}\left(\frac{(1 - a^2) \sin \zeta}{(1 + a^2) \cos \zeta + 2a}\right) \quad (24)$$

$$\zeta'' = \tan^{-1}\left[\frac{R_s (1 - a^2) \sin \zeta}{R_s (1 + a^2) \cos \zeta + w - u}\right] \quad (25)$$

در رابطه فوق e ، مطابق شکل ۱ نشان‌دهنده مقدار خروج از مرکزی قرص‌های سوخت می‌باشد. برای $e=1$ ($\theta=0$) تمام قرص‌های سوخت بر غلاف مماس بوده و $e=0$ حالت هم‌محوری می‌باشد. با بسط رابطه (۱۲):

$$\zeta = \tan^{-1}\left(\frac{yr_i (1 - a^2)}{(ar_i - x)(ax - r_i) - ay^2}\right) \quad (15)$$

$$(T_G)_{r=ri} = (T_c)_{r=ri}, \left(k_G \frac{\partial T_G}{\partial r}\right)_{r=ri} = \left(k_c \frac{\partial T_c}{\partial r}\right)_{r=ri} \quad (30)$$

- در سطح تماس غلاف و سیال خنک کننده شرط انتقال حرارت جابجایی به صورت زیر اعمال شد،

$$\left(\frac{\partial T_c}{\partial r}\right)_{r=r_0} = -\frac{h}{k_c}(T_c - T_b) \quad (31)$$

که در آن T_b دمای بالک سیال بوده و از معادله (۳۸) بدست می آید و h در قسمت ۳-۱ توضیح داده شده است.

- در سطح خارجی سیال خنک کننده به دلیل وجود تقارن بین میله‌های سوختی، شرط عایق اعمال شد.

معادلات (۲۶) و (۲۷) همراه با شرایط مرزی موجود، بروش جداسازی متغیرها و استفاده از تبدیلات فوریه حل شدند.

دمای جدید در فضای محاسباتی برای سیال خنک کننده به صورت زیر بدست می آید:

$$T_{cool,n}(\zeta, \eta, z) = \frac{He \cdot q''' \cdot r_0}{2 \cdot \pi \cdot \dot{m} c_p \varepsilon} \cdot \frac{r_s^2 \cdot e \cdot \left(\left(\frac{r_f}{r_i} \right)^2 e^\eta + e^{-\eta} \right)}{k_{cool} \cdot k_G \cdot \left(\left(\frac{r_f}{r_c} \right)^2 \left(\frac{r_i}{r_0} \right) - \left(\frac{r_0}{r_i} \right) \right)} \cdot \cos \zeta \left(\sin \frac{\pi z}{He} + \sin \frac{\pi H}{2He} \right) \quad (32)$$

در رابطه بالا، ε ضخامت گپ گازی می باشد. بعد از نگاهت معکوس، دمای کل در فضای فیزیکی به صورت زیر خواهد بود.

$$T_{co,t}(r, \theta, z) = T_{cool} + \frac{He \cdot q''' \cdot r_0}{2 \cdot \pi \cdot \dot{m} c_p \varepsilon} \cdot \frac{r_s^2 \cdot e \cdot \left(\left(\frac{r_f}{r_i} \right)^2 \cdot \left(\frac{r_i}{r} \right) + \left(\frac{r}{r_i} \right) \right)}{k_{cool} \cdot k_G \cdot \left(\left(\frac{r_f}{r_c} \right)^2 \left(\frac{r_i}{r_0} \right) - \left(\frac{r_0}{r_i} \right) \right)} \cdot \cos \theta \left(\sin \frac{\pi z}{He} + \sin \frac{\pi H}{2He} \right) \quad (33)$$

که در آن U و w به صورت زیر تعریف شده‌اند.

$$u = e(1 + a^2 R_s^2 + 2aR_s \cos \zeta) / r_i ; w = a(1 + R_s^2)$$

بعد از نگاهت محیط فیزیکی، در فضای محاسباتی با توجه به شرایط مرزی حاکم بر این محیط، معادلات حاکم را حل کرده و برای $\varepsilon=1$ ، توزیع دما را بدست می آوریم. معادلات حاکم پس از انتقال، در نواحی قرص‌های سوخت، ناحیه گازی، غلاف و سیال خنک کننده در محیط محاسباتی به صورت زیر در می آید.

- ناحیه غلاف، ناحیه سیال خنک کننده و ناحیه گازی

$$T_{\eta\eta} + T_{\xi\xi} = 0 \quad (26)$$

- ناحیه قرص‌های سوخت

$$T_{\eta\eta} + T_{\xi\xi} + \frac{Jq'''(z)}{k} = 0 \quad (27)$$

که J ، ژاکوبین تبدیل بوده و به صورت زیر تعریف می شود:

$$J = y_\xi^2 + y_\eta^2 = x_\xi^2 + x_\eta^2 \quad (28)$$

در انتقال معادلات بالا روابط کوشی-ریمان، $X_\xi = Y_\eta$ و $X_\eta = -Y_\xi$ که برای نگاهت همدیس برقرار می باشند، بکار رفته‌اند.

۴-۲-۳ شرایط مرزی

برای حل معادلات (۲۶) و (۲۷) شرایط مرزی زیر در فضای فیزیکی در نظر گرفته شده‌اند:

- در سطح تماس سوخت با ناحیه گازی که در آن،
 $(x-e)^2 + y^2 = r_s^2$

$$(T_s)_{r=rs} = (T_G)_{r=rs}, \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial n}\right)_{r=rs} = \left(k_G \frac{\partial T_G}{\partial n}\right)_{r=rs} \quad (29)$$

و n جهت بردار عمود بر سطح سوخت می باشد.
 در سطح تماس غلاف و ناحیه گازی،



$$T_{c,tot} = T_b + \frac{q_c'' A_c}{Ph} \cdot \cos \frac{\pi z}{He} \quad (41)$$

دمای سطح داخلی غلاف از دمای سطح خارجی غلاف به صورت معادله (۴۲) خواهد بود،

$$T_{G,tot} = T_{c,tot} + \frac{q_c''' A_c}{2\pi k_c} \ln \frac{r_o}{r_i} \quad (42)$$

برای بدست آوردن دمای سطح سوخت، معادله (۴۲) به فضای محاسباتی منتقل شده و با حل معادلات در فضای محاسباتی و بدست آوردن دما در این فضا، با نگاهت معکوس دمای سطح سوخت را در فضای فیزیکی بدست می‌آوریم:

$$t_{s,tot} = T_s + \left(\frac{8.L.R_s^n}{(R_s^{2n} + 1)\pi} I + I_1 \cdot ww \cdot (R_s^{-n} - R_s^n) \cos \frac{\pi z}{He} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \left(n \tan^{-1} \left(\frac{r \cdot \sin \theta (1 - a^2) r_i}{uu} \right) \right)}} \quad (43)$$

که در رابطه (۴۳) به سبب قرار گرفتن فرمول در یک ستون، کمیت‌های uu، ww و L تعریف شده‌اند:

$$ww = \frac{r_s^3 \cdot e \cdot q_c''' \cdot R_s^n}{\pi \cdot \varepsilon \cdot k_G \cdot n (1 + R_s^{2n})}$$

$$uu = (ar_i - r \cos \theta)(ar \cos \theta - r_i) - ar^2 \sin^2 \theta$$

$$L = \left[\frac{r_f^7}{5r_i} + \frac{2r_f^3}{r_i} \left(r_f \ln \frac{r_o}{r_f} + r_f \right) - \frac{r_o^4 r_f^3}{r_i} + \frac{r_f^7}{7r_i} - \frac{r_o^4}{r_i} \left(\frac{r_f^3}{3} \right) + \frac{2r_f}{r_i} \left(r_f^3 \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) + \frac{r_f^3}{9} \right) - \frac{r_o^2 r_f^5}{5r_i} - \left[\frac{2r_f^3 r_o}{r_i} + \frac{r_o r_f^2}{r_i} - \frac{r_o^7}{7r_i} + \frac{r_o^7}{3r_i} - \frac{2r_f r_i^3}{9r_i} \right] \right]$$

در رابطه (۴۳) I و I₁ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$I = \int_0^\pi \frac{\cos m \zeta \left((1 + a^2) \cos \zeta + 2a \right)}{\sqrt{\left((1 + a^2) \cos \zeta + 2a \right)^2 + (1 - a^2)^2 \sin^2 \zeta}} d\zeta \quad (44)$$

برای پیدا کردن دمای سطح غلاف می‌توان ابتدا دمای بالک سیال را بدست آورد؛ برای این کار ابتدا سرعت را برحسب بقیه پارامترها بدست می‌آوریم. پروفیل سرعت در سیال خنک‌کننده در حالت کلی به صورت معادله (۳۴) می‌باشد [۳].

$$u(r) = \frac{1}{\mu} \left[\frac{dp}{dz} \right] \frac{r^2}{4} + c_1 \ln r + c_2 \quad (34)$$

که با اعمال شرایط مرزی خواهیم داشت:

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \left(\frac{dp}{dz} \right) \left(r^4 - r_o^4 + 2r_f \ln \frac{r_o}{r} \right) \quad (35)$$

و سرعت متوسط به صورت زیر حساب می‌شود:

$$u_m = \frac{\int_{r_o}^{r_f} \rho u(r, z) dA}{\rho A} = \frac{1}{2\mu(r_f^2 - r_o^2)} \frac{dp}{dz} \cdot \left(\frac{r_f^6}{6} - \frac{r_f^2 r_o^4}{2} + r_f^3 \ln \frac{r_o}{r_f} + \frac{r_f^3}{2} + \frac{r_o^6}{3} - \frac{r_f r_o^2}{2} \right) \quad (36)$$

$$u = \frac{u_m \left(r^4 - r_o^4 + 2r_f \ln \frac{r_o}{r} \right)}{\frac{r_f^6}{3} - r_f^2 r_o^4 + 2r_f^3 \ln \frac{r_o}{r_f} + r_f^3 + \frac{2r_o^6}{3} - r_f r_o^2} \quad (37)$$

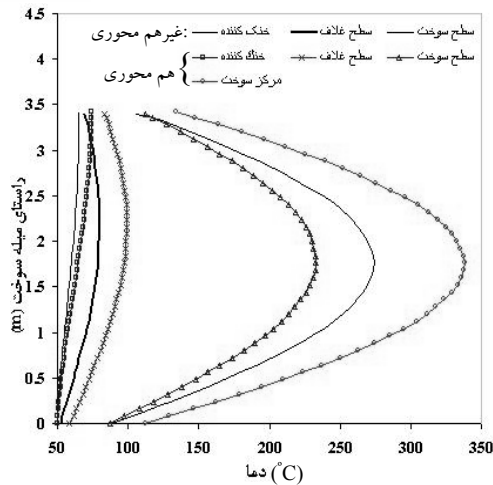
دمای بالک سیال به صورت رابطه (۳۸) است که در آن T'_b از رابطه (۳۹) بدست می‌آید:

$$T_b = T_b' + T_{cool} \quad (38)$$

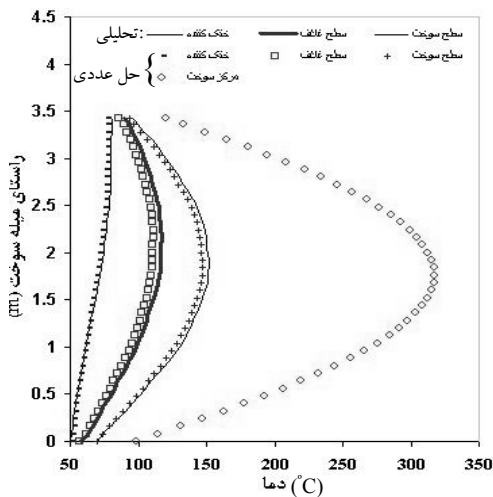
$$T_b' = \frac{\rho \int_{r_i}^{r_f} u T_{ff} dA}{\dot{m}} \quad (39)$$

دمای کل سطح غلاف در فضای فیزیکی از روابط زیر بدست می‌آید:

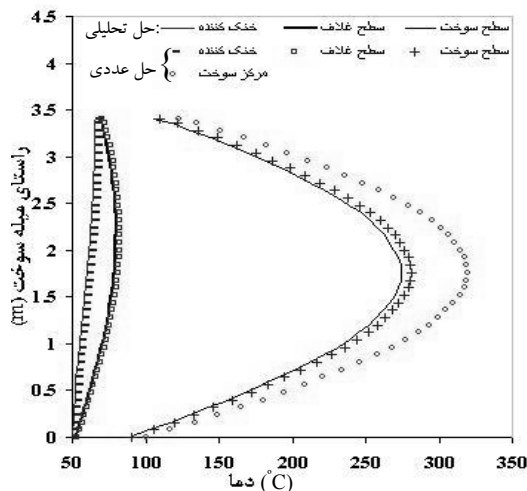
$$(T_{c,tot} - T_b) h \cdot P \cdot dz = q_c'' A_c dz \quad (40)$$



شکل ۶- توزیع دما در راستای طولی میله سوخت به روش تحلیلی در دو حالت هم محور بودن و غیر هم محور بودن قرص های سوخت و غلاف در $(e=1)$ در $\theta = \pi$.



شکل ۷- نمودارهای توزیع دما در راستای طولی میله سوخت در حالتی که قرص های سوخت بر غلاف مماسند ($\theta=0$) و برای $e=1$ ، به روش تحلیلی و عددی.

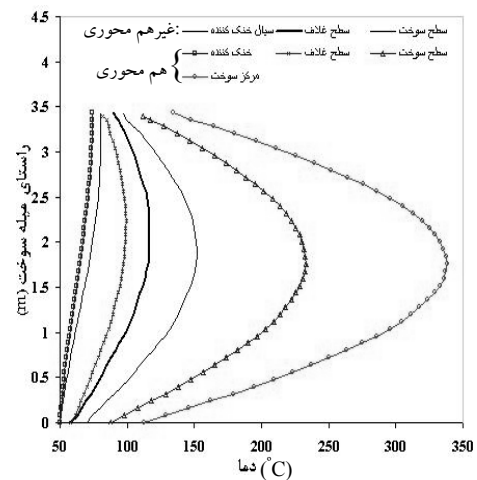


شکل ۸- نمودارهای توزیع دما در راستای طولی میله سوخت در حالتی که قرص های سوخت از غلاف فاصله گرفته اند ($\theta=\pi$) و برای $e=1$ ، به روش تحلیلی و عددی.

$$I_1 = \int_0^\pi \frac{((1+a^2)\cos\zeta + 2a)}{\sqrt{((1+a^2)\cos\zeta + 2a)^2 + (1-a^2)^2\sin^2\zeta}} d\zeta \quad (45)$$

۴- حل عددی توزیع درجه حرارت در میله سوخت

در این تحقیق برای محاسبه عددی از نرم افزار Fluent استفاده شده است که در آن معادلات به روش حجم های محدود گسسته سازی می شوند تمام معادلات لازم برای حل مسأله در دستورالعمل نرم افزار موجودند و تکرار آنها در این قسمت ضروری نیست [۸]. با توجه به عدم وابستگی خواص فیزیکی به دما (بازه تغییرات دما در هر یک از چهار ناحیه جداگانه میله سوخت در رآکتورهای تحقیقاتی پایین است شکل های ۵ تا ۸)، معادلات جریان و انرژی در نرم افزار، بصورت مجزا^(۲) حل شده اند. برای حل جریان آشفته از مدل k-ε استاندارد استفاده شد. بعد از حل اولیه در Fluent، برای بهبود راه حل از روش بالا دست مرتبه دو^(۳) استفاده شد. به منظور حل عددی با نرم افزار Fluent ابتدا مسأله به صورت سه بعدی در نرم افزار Gambit مدل شده و در هنگام مدل سازی استقلال حل از شبکه بدست آمد. در مدل نهایی تعداد گره ها در هر یک از نواحی بدین صورت بود: قرص های سوخت: ۱۸۰۰۰، ناحیه گازی: ۶۸۰۰، غلاف و سیال خنک کننده: ۱۵۰۰۰. یکی از شرایط مرزی پیچیده مورد نیاز برای حل در نرم افزار Fluent، تعریف ترم تولید کسینوسی سوخت می باشد، که برای تعریف آن یک زیرروال به زبان C++ نوشته شده سپس به وسیله نرم افزار Fluent پردازش و خوانده شد [۸].



شکل ۵- توزیع دما در راستای طولی میله سوخت به روش تحلیلی در دو حالت هم محور بودن و غیر هم محور بودن قرص های سوخت و غلاف در $(e=1)$ در $\theta=0$.

۵- بحث

در این کار تحقیقی نحوه توزیع درجه حرارت در حالت غیر هم‌محوری قرص‌های سوخت و غلاف، برای یک میله سوخت به دو روش تحلیلی و عددی با نرم‌افزار Fluent بدست آمده است و نتایج در شکل‌های ۵ تا ۸، مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که در این پژوهش برای انجام دادن محاسبات و بدست آوردن مقادیر عددی، بیشتر از داده‌های یک نوع رآکتور تحقیقاتی استفاده شده است.

در شکل ۵ نتایج حاصل از حل تحلیلی برای یک میله سوخت در دو حالت هم‌محوری و غیرهم‌محوری قرص‌های سوخت و غلاف در حالتی که قرص‌های سوخت بر غلاف مماسند (شکل ۱، $\theta=0$ و $e=1$) با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل ۵ مشخص می‌شود که دمای سطح غلاف و سیال خنک‌کننده در حالت غیرهم‌محوری قرص‌های سوخت و غلاف بیشتر از حالت هم‌محوری آنها است. ولی این افزایش دما به علت هم‌محور شدن قرص‌های سوخت و غلاف، برای سیال خنک‌کننده کمتر از 10°C و برای سطح غلاف کمتر از 15°C می‌باشد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پدیده‌هایی از قبیل ذوب موضعی سطح داخلی غلاف و جوشش سیال (بوجود آمدن پدیده دو فازی) با توجه به محدوده دماهای آنها (شکل ۵)، ایجاد نمی‌شوند.

نکته جالب توجه اینکه دمای سطح سوخت در طرفی که قرص‌های سوخت بر غلاف مماسند، در حالت غیرهم‌محوری کمتر از حالت هم‌محوری می‌باشد. علت این است که چون ضریب انتقال حرارت هدایتی غلاف از ناحیه گازی بیشتر است بنابراین در حالتی که فاصله گازی حذف شده است، انتقال حرارت از قرص‌های سوخت بیشتر بوده و دمای سطح خارجی سوخت افت می‌کند.

در شکل ۶ نتایج حاصل از حل تحلیلی برای یک میله سوخت در دو حالت هم‌محوری و غیرهم‌محوری قرص‌های سوخت و غلاف در حالتی که قرص‌های سوخت از غلاف فاصله گرفته‌اند (شکل ۱، $\theta=\pi$ و $e=1$) با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل ۶، همانطور که انتظار می‌رفت دمای سیال خنک‌کننده و غلاف در حالت غیرهم‌محوری نسبت به حالت هم‌محوری، کمتر است لیکن دمای سطح سوخت در حالت غیرهم‌محوری نسبت به حالت هم‌محوری بیشتر می‌باشد علت آن است که چون ضریب

انتقال حرارت هدایتی غلاف از ناحیه گازی بیشتر است در طرفی که فاصله گازی زیاد شده است (ضخامت ناحیه گازی در این حالت نسبت به حالت هم‌محوری مطابق شکل ۱ دو برابر شده است)، انتقال حرارت از قرص‌های سوخت کمتر بوده و دمای سطح خارجی سوخت در این سمت افزایش می‌یابد.

با توجه به دشواری حل تحلیلی و در مواردی غیرممکن بودن آن (بخاطر وجود چشمه حرارتی متغیر با مکان در قرص‌های سوخت)، دمای مرکز سوخت در این تحقیق در حالت غیرهم‌محوری فقط به روش عددی بدست آمد و از آنجاییکه پاسخ‌های حل عددی در بقیه موارد با نتایج حاصل از حل تحلیلی همخوانی دارند (شکل‌های ۷ و ۸)، پاسخ‌های روش عددی برای مرکز سوخت را نیز می‌پذیریم.

نمودارهای شکل ۷ توزیع دما در اجزای میله سوخت را، که از دو روش تحلیلی و عددی بدست آمده‌اند، در حالتی که قرص‌های سوخت به غلاف مماسند (شکل ۱، $\theta=0$ و $e=1$) نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۷ باز هم ملاحظه می‌گردد که ماکزیموم دمای سطح غلاف از هر دو روش بدست آمده کمتر از 120°C بوده بنابراین دمای سطح غلاف هیچ وقت به دمای ذوب نمی‌رسد. همچنین ماکزیموم دمای سیال خنک‌کننده در خروجی از 80°C تجاوز نمی‌کند پس در سیال هم پدیده دو فازی اتفاق نخواهد افتاد. با توجه به نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود که پاسخ‌های روش عددی همخوانی خوبی با حل تحلیلی دارند.

نمودارهای شکل ۸ توزیع دما در اجزای میله سوخت را که از دو روش تحلیلی و عددی بدست آمده‌اند، در طرفی که قرص‌های سوخت از غلاف فاصله گرفته‌اند (شکل ۱، $\theta=\pi$ و $e=1$)، نشان می‌دهند. از شکل ۸ ملاحظه می‌گردد که پاسخ‌های روش عددی همخوانی خوبی با حل تحلیلی دارند بنابراین همچنانکه در بالا هم اشاره گردید دمای مرکز سوخت با توجه به دشواری بودن حل تحلیلی برای آن، به روش عددی حساب شد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش آنالیز انتقال حرارت برای یک میله سوخت در حالت سه بعدی و در بدترین حالت خروج از مرکزیت قرص‌های سوخت ($e=1$)، با در نظر گرفتن حالت پایا و تولید حرارت کسینوسی در قرص‌های سوخت، به دو روش تحلیلی و عددی

چگالی	ρ	مورد بررسی قرار گرفت. پاسخ‌های بدست آمده از هر دو روش
ضخامت گپ گازی	ε	عددی و تحلیلی همخوانی خوبی با هم داشته و نشان می‌دهند
راستای زاویه در مختصات استوانه‌ای	θ	دمای سیال خنک‌کننده در ماکزیموم نقطه در خروجی، کمتر از
محور مختصات در فضای محاسباتی	ξ	80°C است، بنابراین جوشش در سیال اتفاق نخواهد افتاد.
محور مختصات در فضای محاسباتی	η	همچنین ماکزیموم دمای سطح داخلی غلاف در حالت
		غیرهم‌محوری در حدود 15°C بیشتر از حالت هم‌محوری
		می‌باشد که با دمای ذوب غلاف فاصله زیادی دارد.

اندیس‌ها

c	سطح داخلی غلاف
s	سطح سوخت
cool	سیال خنک‌کننده
f	قرص‌های سوخت
m	مرکز سوخت

پی‌نوشت‌ها:

- ۱- Dittus- Boelter
- ۲- Segregated
- ۳- Second Order Upwind

References:

1. M.M. EL-Wakil, Nuclear Heat Transport, 3rd Edition, The American Nuclear Society, USA, (1981).
2. N.E. Todreas, M.S. Kazimi, Nuclear System II, Hemisphere Publishing Corporation, (1990).
3. E.R.G. Eckert and R.M. Drake, "Heat and Mass Transfer, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, New-York (1959).
4. ح. امین‌فر و م. محمدپورفرد، "آنالیز انتقال حرارت در میله سوخت راکتور هسته‌ای"، مجله دانشکده فنی، دانشگاه تبریز، (زمستان ۱۳۸۴).
5. ح. امین‌فر و م. محمدپورفرد، "بررسی عددی انتقال حرارت در کانال سوخت راکتور هسته‌ای"، کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه شیراز (۱۳۸۴).
6. R.A. Churchill, J.W. Brown, "Complex variables and applications, fifth edition, McGraw-Hill Publication Company, New York (1990).
7. M.S. Mayeri, S.A. Gandjalikhan Nassab, "A two dimensional thermohydrodynamic analysis of journal bearing characteristics," Iranian Journal of Science and Technology, No.3, p. 203 (2000).
8. Fluent Package Manual, Version 6.0.12 (2002).

نمادهای لاتین

q''	تولید حرارتی سوخت در واحد حجم
e	خروج از مرکزیت
k	ضریب هدایت حرارتی
\dot{m}	دبی جرمی
T	دما
T_b	دمای بالک سیال
J	ژاکوبین تبدیل
A_c	سطح مقطع قرص‌های سوخت
\dot{q}''	شار حرارتی
h	ضریب کنوکسیون سیال
H_e	طول مؤثر میله سوخت
H	طول میله سوخت
Pr	عدد پراتل
Re	عدد رینولدز
Nu	عدد نوسلت
r_o	قطر خارجی غلاف
r_i	قطر داخلی غلاف
r_s	قطر قرص‌های سوخت
r_f	قطر هیدرولیکی ناحیه سیال
D_h	قطر هیدرولیکی
C_p	گرمای ویژه فشار ثابت
P	محیط خارجی غلاف

نمادهای یونانی

α	پخشندگی حرارتی
----------	----------------