

آنالیز انتقال حرارت در میله سوخت راکتور هسته ای

حبیب امین فر
موسی محمدپورفرد
استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز
کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

چکیده

وجود شکافت و پرتوزایی شدید به علت واپاشی پاره های شکافت سوخت هسته ای سبب گرم شدن شدید سوخت، غلاف، گند کننده، خنک کننده و سایر مواد ساختاری راکتور می شود. بهر میزان که بتوان با انتخاب سیال خنک کننده و طراحی مناسب، بدون آسیب رساندن به مواد ساختاری راکتور مخصوصاً میله های سوخت حرارت تولید شده را به سیال خنک کننده انتقال داد، در قدرت تولیدی راکتور هسته ای تاثیر تعیین کننده خواهد داشت. در حقیقت طراحی یک قلب راکتور همان اندازه که به ملاحظات هسته ای بستگی دارد به ملاحظات حرارتی نیز وابسته است. از اینرو تحلیل حرارتی قلب راکتور (توزیع درجه حرارت و میزان حرارت منتقل شده) ضروری می باشد. در کار حاضر، با در نظر گرفتن حالت پایا، جریان سیال تک فازی و شار حرارتی کسینوسی در میله سوخت، برای ارزیابی قابلیت نرم افزار COBRA III-C (خاص تحلیل حرارتی نیروگاه های هسته ای) در آنالیز حرارتی یک میله سوخت، توزیع درجه حرارت در اجزاء تشکیل دهنده میله سوخت و همچنین تاثیر جریان سیال از کانالهای مجاور آن، توسط این نرم افزار محاسبه شده است. جوابهای بدست آمده از آن با نتایج تجربی، حل تحلیلی و همچنین با جوابهای بدست آمده از نرم افزار FLUENT که دارای دقت بالایی برای محاسبات در یک میله سوخت می باشد، در حالت بدون نگهدارنده میله سوخت مقایسه شده است. با توجه به همخوانی خوب جوابهای بدست آمده از نرم افزار COBRA III-C برای حالت بدون نگهدارنده و نظر به اینکه برای میله سوخت با نگهدارنده حل تحلیلی و نتایج تجربی وجود ندارد، در این حالت، مقایسه نتایج به دست آمده از دو نرم افزار فوق نشان می دهد که از نرم افزار COBRA III - C که به زمان محاسباتی خیلی کمتری نیاز دارد، می توان برای محاسبه توزیع درجه حرارت در اجزاء تشکیل دهنده میله سوخت استفاده کرد. کلمات کلیدی: انتقال حرارت، مجتمع میله های سوخت، میله سوخت، سیال خنک کننده، کانال جریان.

Heat Transfer Analysis in the Nuclear Reactor Fuel Rod

H. Aminfar and M. Mohammadpourfard

Department of Mechanical Engineering University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The presence of fission and intense radioactivity due to fission fragment decay and to neutron activation of clad, structure, moderator, coolant, etc., causes intense heating. This heat must be converted to a useful form of energy as effectively as possible. The amount of produced heat and eventually power, depends on the magnitude of the heat transfer which can take place in the core without damaging the structure material or the fuel elements. In order to ensure safe conversion of heat to power, the thermal analysis (temperature distribution and its heat transfer rate) of the reactor core must be performed. Thermal analysis of the core is as important as neutronic considerations and in fact is an integral part of reactor design. In this paper temperature distribution and subchannel effect of a fuel rod are studied using the COBRA III-C code. Steady state, single-phase flow using cosine heat flux is assumed and thermal analysis is done for both with and without gridspacer cases. The obtained thermal analysis results compared well with the results of the analytical and the experimental data, in without gridspacer case, and the results obtained from the FLUENT code, for both cases. The good agreement observed in both cases.

Key words: Heat transfer, Fuel assembly, Fuel rod, Coolant, Subchannel.

۱- مقدمه

قلب یک راکتور هسته‌ای مطابق شکل ۱ متشکل از تعدادی مجتمع سوخت (Fuel assembly) می‌باشد که هر کدام از آنها، از تعدادی میله سوخت، نگهدارنده‌ها و کانال‌های عبور سیال خنک کننده تشکیل شده‌اند. از نظر تئوری، قلب راکتور منبع تولید انرژی در دمای نامحدود است و هر چه حرارت در دمایی بالا، به سیال خنک کننده منتقل شود حرارت انتقال یافته از میله‌های سوخت بیشتر خواهد بود. در عین حال ماکزیمم درجه حرارت در قلب راکتور می‌بایست کمتر از نقطه ذوب فلزات موجود در ساختار آن بوده، و در راکتورهائی با خنک کننده مایع (به غیر از راکتورهای آب جوشان) کمتر از نقطه جوش خنک کننده باشد [۱].

از کارهایی که در زمینه تحلیل حرارتی قلب راکتور انجام شده است، می‌توان بعنوان نمونه به کارهای Gulsevin et al. از مرکز تحقیقات انرژی هسته‌ای آمریکا (ANS) [۲]، A. Tapucu et al. از مرکز تحقیقات انرژی هسته‌ای کانادا (CANDU) [۳] و J. W. Jackson et al. از دانشگاه MIT [۴] اشاره کرد. در کار حاضر، اقدام به آنالیز انتقال حرارت در یک میله سوخت مطابق شکل ۲ و تعیین ماکزیمم درجه حرارت در دو حالت بدون نگهدارنده و با نگهدارنده میله سوخت شده است. با توجه به این که نرم افزار COBRA III-C قابلیت تحلیل کلی قلب

راکتور را نیز دارا می‌باشد، برای حصول اطمینان از دقت جواب‌های آن در تحلیل میله سوخت به هنگام تحلیل کلی قلب راکتور، جواب‌های بدست آمده از آن برای یک میله سوخت با جواب‌های بدست آمده از نرم افزار FLUENT که دارای دقت بالائی برای محاسبات در یک میله سوخت می‌باشد و همچنین با نتایج تجربی و تحلیلی در حالت بدون نگهدارنده میله سوخت و در حالت با نگهدارنده صرفاً با نرم افزار FLUENT مقایسه شده است [۵].

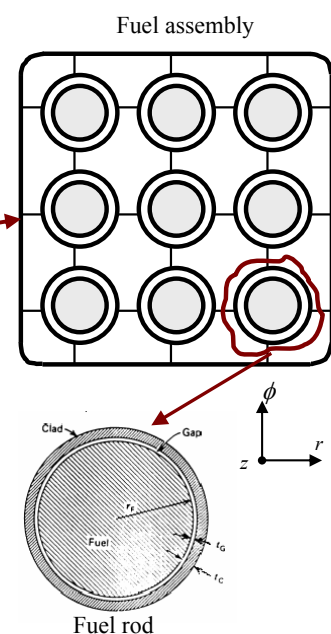
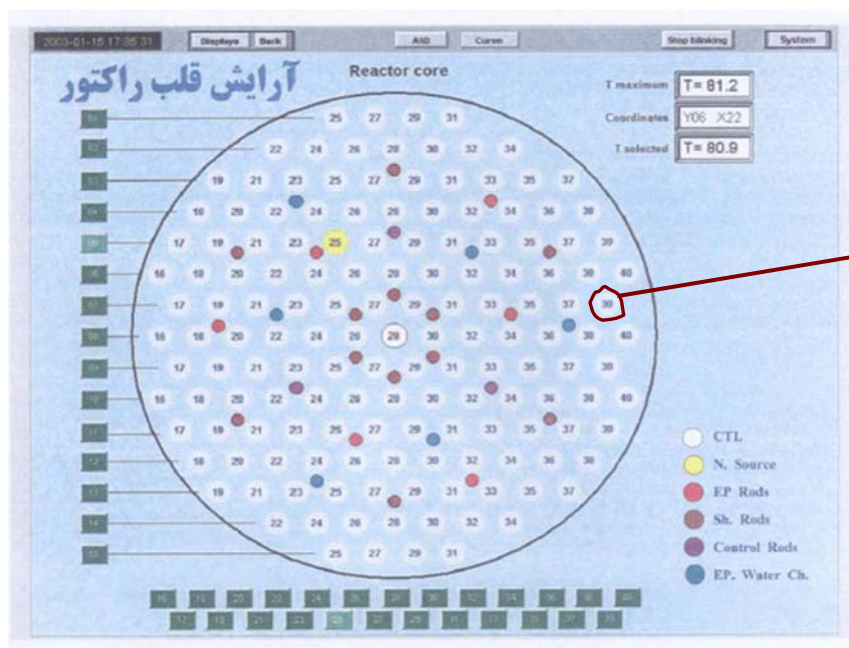
۲- حل تحلیلی برای حالت بدون نگهدارنده

اولین مرحله برای آنالیز انتقال حرارت، انجام حل تحلیلی است که برای یک میله سوخت مطابق شکل ۲ در حالت بدون نگهدارنده می‌بایست معادلات حاکم به صورت تحلیلی حل، تا توزیع درجه حرارت در سطوح مورد نیاز معلوم گردند.

۲-۱- معادلات حاکم

به منظور حل تحلیلی از توازن انرژی برای انتقال حرارت در اجزاء یک میله سوخت، می‌توان نوشت:

$$Q_{total} = Q_{cond} + Q_{rad} \quad (1)$$



شکل ۱- اجزاء تشکیل دهنده قلب راکتور [۵]

قرص‌های سوخت صرفنظر شده است، که صحت این فرض و همچنین فرض قابل صرفنظر بودن جمله تشعشع در مقابل جمله هدایت برای گپ گازی، در بخش (۴-۱) مورد بررسی گرفته است.

با استفاده از رابطه (۴) میزان شار گرمایی انتقالی از غلاف به سیال خنک کننده مشخص می‌گردد [۷]:

$$q'' = h_S (T_S - T_{FL}) \quad (4)$$

که در آن T_{FL} دمای حجمی سیال، T_S دمای سطح غلاف و h_S ضریب جابجائی سیال خنک کننده می‌باشد که از رابطه دیتوس-بولتر^(۱)، معادله (۵)، محاسبه می‌گردد [۸]:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5)$$

مقدار Re و Pr هم از روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$Re = \frac{V \rho D_h}{\mu} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{V}{\alpha} \quad (7)$$

ضریب هدایت حرارتی قرص‌های سوخت نیز با استفاده از رابطه (۸) در هر نقطه، که با توجه به یک سری از ضرائب هدایتی در گستره دمای مناسب به دست آمده است، محاسبه می‌گردد [۹]:

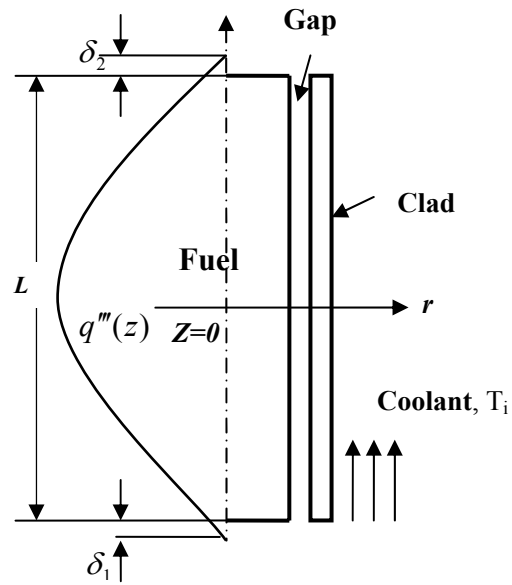
$$K_F = -(1e-8) \times T_F(j)^3 + (2e-5) \times T_F(j)^2 - 0.0175 \times T_F(j) + 8.6868 \quad (8)$$

که $T_F(j)$ دمای هر نقطه در راستای طولی سوخت می‌باشد.

۲-۲- روش حل

با استفاده از مشخصات و شرایط مرزی داده شده در جداول ۱، ۲، ۳ و ۴ و در نظر گرفتن شار حرارتی به صورت:

$$q''(z) = q''_{max} \cos\left(\frac{\pi}{H} z\right) \quad (9)$$



شکل ۲- یک میله سوخت با شار حرارتی کسینوسی بریده

که در آن Q_{cond} انتقال حرارت به شکل هدایت و Q_{rad} انتقال حرارت به شکل تشعشع می‌باشند. لازم به ذکر است که با توجه به پایین بودن مقدار درجه حرارت از سهم انتقال حرارت به شکل تشعشع (اختلاف σT^4 ، که فقط در قسمت گپ گازی مطرح است). صرفنظر شده و برای محاسبه انتقال حرارت به شکل هدایت از معادله هدایت سه بعدی گرما در دستگاه مختصات استوانه‌ای (r, ϕ, z) به صورت زیر استفاده شده است [۶]:

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

که در آن $q'''(z)$ تولید گرما در واحد حجم می‌باشد. با در نظر گرفتن حالت پایا و همچنین توجه به این نکته که توزیع دما نسبت به پارامتر ϕ متقارن است، می‌توان معادله (۲) را به شکل معادله (۳) ساده کرد:

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

ساده‌سازی دیگری که به منظور حل تحلیلی صورت گرفته است، از جمله $\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$ در مقابل جمله $\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$

جدول ۴- شرایط مرزی [۵]

شرایط مرزی	
توان تولیدی هر میله سوخت (W)	۱۳۹۲۵/۹۲۶
شار جرمی (kg/s)	۰/۱۴۶۵۵۵۱۰۳
جمله تولید در سوخت (W/m ³)	$q_{max}'' \cos\left(\frac{\pi}{H}z\right)$
فشار سیال خنک کننده در خروج $(bar)_{abs}$	۳/۸۹

که در آن با توجه به شکل ۲، $H = L + \delta_1 + \delta_2$ بوده و L همان طول موثر است، (شار حرارتی اشاره شده در رابطه (۹) ناشی از جمله تولید حرارت اشاره شده در جدول ۴ می‌باشد)، با توجه به معلوم بودن A_F ، سطح مقطع قرص سوخت جدول ۱ و توان تولیدی هر میله سوخت Q که در جدول ۴ آمده، q_{max}'' را محاسبه و سپس توزیع درجه حرارت در هر جزء محاسبه شده است [۵].

$$q_{max}'' = 269703.897 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

لازم به ذکر است به منظور محاسبه توزیع دما در سطوح اجزاء یک میله سوخت، محاسبات باید با محاسبه دمای سیال خنک کننده شروع و به سمت داخل میله سوخت ادامه پیدا کنند، که پس از حل معادلات مربوط و اعمال شرایط مرزی خواهیم داشت [۵]:

$$T_{fluid} = T_{inlet} + \frac{q_{max}'' A_C H}{\pi c_p \dot{m}} \left(\sin \frac{\pi z}{H} + \sin \frac{\pi L}{2H} \right) \quad (10)$$

$$\Delta T_C = (T_C - T_{fluid}) = \frac{q''(z)}{2\pi K_C} \ln\left(\frac{r_F + t_G + t_C}{r_F + t_G}\right) \quad (11)$$

$$\Delta T_G = (T_{F.surface} - T_C) = \frac{q''(z)}{2\pi K_G} \ln\left(\frac{r_F + t_G}{r_F}\right) \quad (12)$$

$$\Delta T_F = (T_{F.center} - T_{F.surface}) = -\frac{r_F^2}{4K_F} q''(z) = -\frac{q''(z)}{4K_F \pi} \quad (13)$$

اندیس F برای سوخت، G برای گپ و C برای غلاف می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات هندسی اجزا [۵]

$$(\delta_1 = \delta_2 = 0.23m)$$

مشخصات هندسی	
تعداد میله های سوخت	۱
ابعاد کانال سوخت (cm)	۴/۱
قطر میله سوخت (cm)	۳۶۳/۱
قطر قرص سوخت (cm)	۱۴۸/۱
ضخامت غلاف (cm)	۰.۹۷۵/۰
قطر داخلی غلاف (cm)	۱۶۸/۱
طول موثر میله سوخت (cm)	۳۴۳

δ_1, δ_2 مطابق شکل ۲ طول های هستند که اگر به طول میله سوخت اضافه شوند، شار حرارتی کسینوسی کامل می‌گردد.

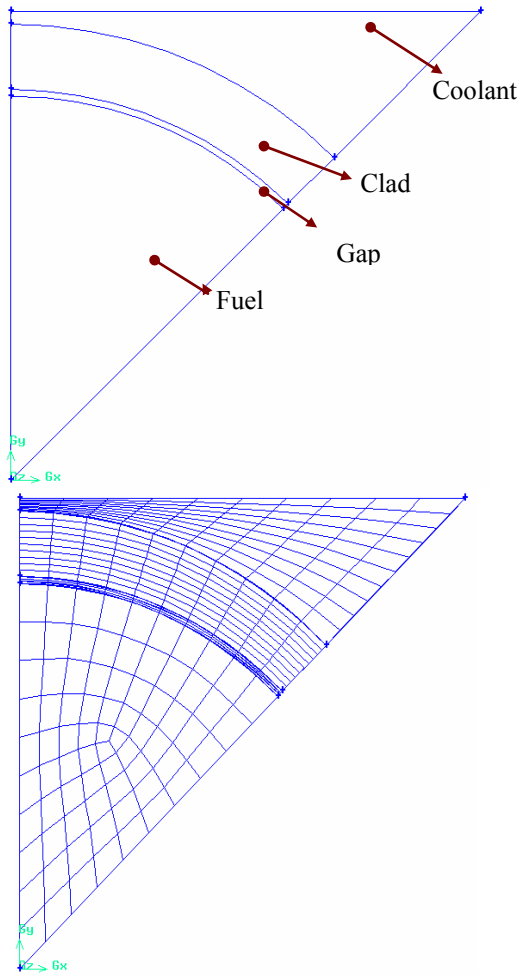
جدول ۲- مشخصات مواد مورد استفاده

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

جدول ۳- خواص فیزیکی مواد در دستگاه SI

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

گپ گازی : ۱۸۰۰ گره
 غلاف: ۶۰۰۰ گره
 کانال جریان: ۶۰۰۰ گره



شکل ۳- نحوه مدل سازی و شبکه بندی یک هشتم میله

ساخت در Gambit [۵]

که تعداد گره‌ها در راستای طولی میله سوخت برای این حالت ۶۰ نقطه در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مورد نیاز برای استفاده در نرم افزار FLUENT، یکی تعریف جمله تولید حرارت کسینوسی در سوخت و دیگری شار جرمی سیال خنک کننده می‌باشد. شرط دوم به آسانی قابل تعریف بوده ولی برای اعمال شرط اول یعنی جمله تولید حرارت کسینوسی با توجه به اینکه نرم افزار FLUENT به صورت پیش فرض فقط قابلیت اعمال جمله‌های تولید حرارت یکنواخت را دارد، یک زیرروال^(۱)

۳- حل عددی برای حالت بدون نگهدارنده

پس از انجام حل تحلیلی مرحله بعدی، حل عددی می‌باشد که با روش توسط نرم افزارهای COBRA III-C و FLUENT انجام گردیده است.

۳-۱- روشهای مورد استفاده برای حل عددی

به منظور حل عددی از دو روش حجم محدود و روش تفاضل محدود استفاده شده است. در استفاده از روش حجم محدود از نرم افزار FLUENT و در روش تفاضل محدود از نرم افزار COBRA III-C بهره گرفته شده است.

۳-۱-۱- حل عددی به روش حجم محدود با نرم افزار

FLUENT

روش مورد استفاده در نرم افزار FLUENT برای گسسته‌سازی معادلات حاکم، روش حجم محدود است. روش حجم محدود یک روش انتگرالی می‌باشد، یعنی اینکه از معادله‌های دیفرانسیل اولیه در فضای فیزیکی انتگرال گرفته می‌شود و در مرحله بعدی آنها را به روش عددی حل می‌کنند. این روش، در روش حجم محدود شبکه نقاط مستقیماً در فضای فیزیکی ایجاد می‌گردد [۱۰]. نرم افزار FLUENT با زبان برنامه نویسی ++C نوشته شده است و از تمامی توان و قابلیت انعطاف این زبان بهره می‌برد. نتیجتاً این نرم افزار با استفاده از حافظه دینامیک، ساختار مناسب داده‌ها و اطلاعات، کنترل و انعطاف‌پذیری محاسبات را ممکن می‌سازد. توضیحات کاملتر درباره معادلات مورد استفاده و نحوه گسسته‌سازی آنها در این نرم افزار در مرجع [۱۱]، آمده است.

۳-۱-۱-۱- روش شبکه‌بندی و حل معادلات

به منظور حل عددی معادلات با نرم افزار FLUENT مسأله مطابق شکل ۳ به صورت سه بعدی با توجه به داده‌های جدول ۱ توسط نرم افزار GAMBIT مدل شده است [۵]. با توجه به تقارن موجود در میله سوخت تنها یک هشتم آن در نظر گرفته شده، که اطلاعات مربوط به شبکه‌بندی آن در ذیل آورده شده است. لازم به ذکر است که اطلاعات مربوط به شبکه‌بندی مربوط به حالت بهینه می‌شوند (حالتی که جوابها مستقل از شبکه‌بندی شده‌اند [۵]). تعداد گره در هر کدام از حجم‌ها به شرح ذیل است [۵]:

قرصهای سوخت : ۴۵۰۰ گره

محدودیت پایداری برای مراحل زمانی و یا مکانی (با توجه به نحوه گسسته‌سازی معادلات حاکم) می‌باشد [۵]. یکی دیگر از مزایای مهم این نوع نرم افزارها مدت زمان صرف شده برای مدل‌سازی و گرفتن جواب برای مسئله مورد مطالعه است. برای مدل‌سازی یک کانال سوخت با تمامی تجهیزات نگهدارنده آن با استفاده از نرم افزاری چون FLUENT و... (که این مدل‌سازی انجام شده است [۱۶])، چندین ماه وقت صرف می‌شود، در حالیکه این مدت برای همان مسئله با COBRA III-C در حد یک یا دو روز می‌باشد [۵].

۳-۱-۲-۱- معادلات حاکم

الف. معادله پیوستگی

در صورتیکه تعداد کانالهای مجاور با کانال (i)، برابر N باشد [۵]:

$$\frac{dm_i}{dx} = -\sum_{j=1}^N W_{ij} \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (14)$$

ب- معادله مومنتوم [۵]

ب-۱- مومنتوم محوری

$$\begin{aligned} & -\left(1 + \frac{1}{g_c} \left(\frac{m_i}{A_i}\right)^2 \cdot \frac{\partial v'_i}{\partial p}\right) \cdot \frac{dp_i}{dx} \\ & + \frac{1}{g_c} \left(\frac{m_i}{A_i}\right)^2 \cdot \left(\frac{f_i \cdot \lambda_i}{2g_c \rho_f D_{hi}} + \frac{\partial v'_i}{\partial h} \cdot \frac{dh_i}{dx}\right) \\ & + \frac{1}{g_c} A_i \sum_{j=1}^N F_T W'^D_{ij} (u_i - u_j) + \frac{1}{g_c A_i} \sum_{j=1}^N W_{ij} k^* \\ & + \rho_i \cos \phi \end{aligned} \quad (15)$$

که k^* در رابطه فوق برابر است با:

$$k^* = \begin{cases} u_i (F_D - 2) & ; \quad W_{ij} > 0 \\ (F_D u_j - 2u_i) & ; \quad W_{ij} < 0 \end{cases} \quad (16)$$

ب-۲- مومنتوم عرضی

$$P_i - P_j = C_{ij} \cdot W_{ij} |W_{ij}| \quad (17)$$

ج- معادله انرژی [۵]

$$\begin{aligned} m_i \frac{dh_i}{dx} & = q''_i + \sum_{j=1}^N W_{ij} h_j - \sum_{j=1}^N W_{ij} h_i - \sum_{j=1}^N W_{ij} \cdot h^* \\ & - \sum_{j=1}^N (T_i - T_j) \cdot C_{ij} \end{aligned} \quad (18)$$

به زبان ویژوال^(۱) C++ نوشته و سپس توسط نرم افزار FLUENT پردازش و خوانده^(۲) شده است، که اطلاعات بیشتر در مورد نحوه نوشتن و پردازش زیروال مذکور در مرجع [۵] آمده است.

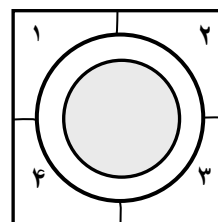
دومین شرط مرزی مقدار شار جرمی می باشد که با توجه به اطلاعات موجود برای یک هشتم میله سوخت برابر است با [۵]:

$$m = 0.146555 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

۳-۱-۲- حل عددی به روش تفاضل محدود با نرم افزار

COBRA III-C

روش مورد استفاده در COBRA III-C روش تفاضل محدود می‌باشد. در روش‌های تفاضل محدود مجهولاتی نظیر ψ را با استفاده از همسایه‌های هر نقطه در نقاط گره مربوط به تقاطع خطوط شبکه‌بندی، تعیین می‌کنند. اغلب از بسط‌های سری تیلور منقطع برای بدست آوردن تقریب‌های تفاضل محدود مشتقات ψ در عبارات همسایه نقطه ψ در هر گره شبکه و در همسایه‌های آن استفاده می‌شود. بنابراین مشتقات ظاهر شده در معادلات حاکم توسط تفاضل محدود جایگذاری شده و یک معادله جبری برای مقادیر ψ در هر نقطه از شبکه را می‌دهند [۱۰]. اساس کار COBRA III-C تشکیل کانال‌های جریان^(۳) مطابق شکل ۴، به منظور انجام محاسبات می‌باشد و دارای قابلیت‌های است که در این زمینه موجب برتری این نرم افزار بر نرم افزاری چون FLUENT و ... می‌شود.

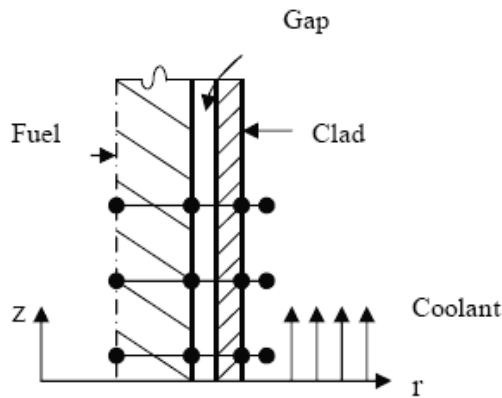


شکل ۴- نحوه آرایش کانال‌های جریان در اطراف میله سوخت

از مواردی که می توان به عنوان امتیاز از آنها نام برد، امکان بررسی تاثیر کانال‌های جریان سیال بر یکدیگر، امکان بررسی رفتار هیدرولیکی ناهمگن در کانال‌های سوخت و عدم وجود

- 1- Visual
- 2- Link
- 3- Subchannels

سوخت محاسبه می‌شوند، ولیکن می‌توان با توجه به نیاز مسئله در داخل قرص سوخت هم (حد فاصل مرکز سوخت تا سطح سوخت) گره‌های دیگری تعریف کرد و در راستای طولی هم با توجه به طول هندسه می‌توان به تعداد نیاز گره تعریف کرد، که این موضوع در شکل ۵ نشان داده شده است [۱۲]. تعداد گره‌ها در این حل ۶۰ نقطه در راستای طولی میله سوخت، ۱۰ نقطه در راستای شعاعی و در جهت ϕ هم با توجه به تعداد کانال‌های جریان تشکیل شده (که در کار حاضر چهار عدد می‌باشد). شبکه‌بندی تکرار شده است.



شکل ۵- نحوه شبکه‌بندی در راستای شعاعی و طولی

۴- نتایج حل برای حالت بدون نگهدارنده

۴-۱- نتایج حل تحلیلی

به منظور بدست آوردن جواب‌های حل تحلیلی نرم افزاری متشکل از روابط قسمت ۲-۱ به زبان FORTRAN 90 نوشته شده است، که دارای قابلیت محاسبه توزیع درجه حرارت در اجزاء مختلف یک میله سوخت، برای سه نوع شار حرارتی یکنواخت، کسینوسی بریده و کسینوسی کامل می‌باشد [۵]. مشخصات هندسی، شرایط مرزی از مرجع [۵]، مواد مورد استفاده و خواص فیزیکی آنها از مراجع [۱۳ و ۱۴]، در کار حاضر به ترتیب در جداول ۱، ۲، ۳ و ۴ ذکر گردیده است.

شکل ۶ منحنی‌های توزیع دما در اجزاء یک میله سوخت را نشان می‌دهد که با توجه به عدم خطی بودن شار حرارتی موجود منحنی‌های دما نیز حالت کسینوسی دارند. با توجه به اینکه اختلاف درجه حرارت سطوح در وسط راستای طولی میله بیشینه است و در همین محل شار حرارتی هم بیشترین مقدار

که h^* در رابطه فوق برابر است با :

$$h^* = \begin{cases} 0 & ; W_{ij} \geq 0 \\ (h_j - h_i) & ; W_{ij} < 0 \end{cases} \quad (19)$$

۳-۲-۲- روش حل

به منظور حل عددی با نرم افزار COBRA III-C می‌بایست اطلاعات جداول ۱ تا ۶ به انضمام بخشی از جدول ترمودینامیکی برای آب اشباع، در قالب چند گروه، به صورت یک فایل به نرم افزار داده شوند.

جدول ۵- مشخصات کانال‌ها

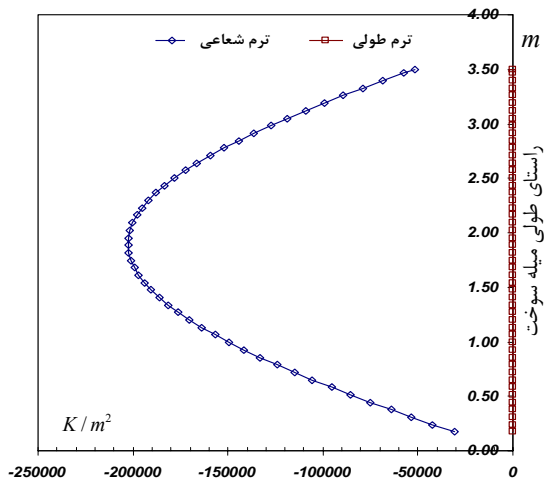
شماره کانال	سطح جریان (m^2)	محیط تر شده (m)	محیط گرم شده (m)	سهم از میله سوخت
۱	0.348×10^{-4}	۰/۰۲۵۷	۰/۰۱۱	۰/۲۵
۲	0.348×10^{-4}	۰/۰۲۵۷	۰/۰۱۱	۰/۲۵
۳	0.348×10^{-4}	۰/۰۲۵۷	۰/۰۱۱	۰/۲۵
۴	0.348×10^{-4}	۰/۰۲۵۷	۰/۰۱۱	۰/۲۵

جدول ۶- نسبت شار حرارتی (به صورت کسینوسی)

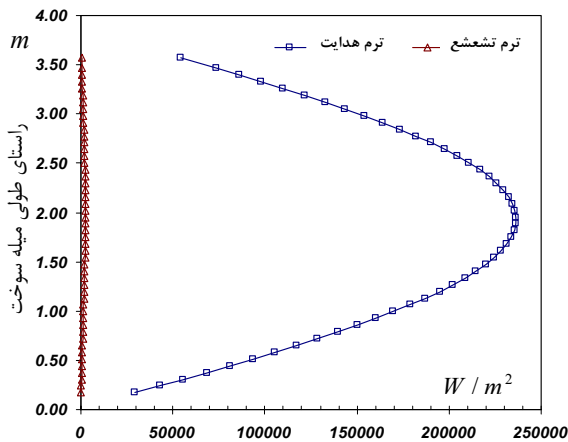
z / L	q'' / q''_{av}
۰	۰/۲۷۳
۰/۱	۰/۶۳۶
۰/۲	۰/۹۵۱
۰/۳	۱/۱۹۵
۰/۴	۱/۳۴۹
۰/۵	۱/۴۰۱
۰/۶	۱/۳۴۹
۰/۷	۱/۱۹۵
۰/۸	۰/۹۵۱
۰/۹	۰/۶۳۶
۱	۰/۲۷۳

شکل ۴ نحوه مدل‌سازی و آرایش کانال‌های جریان را در اطراف میله سوخت نشان می‌دهد. نحوه شبکه‌بندی در COBRA III-C به این شکل می‌باشد که در راستای شعاعی همواره دمای سیال خنک کننده، سطح خارجی غلاف، سطح سوخت و خط مرکزی

میزان شار حرارتی می‌شود. و سطح قرص‌های سوخت مطابق شکل ۶، با استفاده از قانون استفان-بولتزمن^(۱) [۷] مقدار انتقال حرارت به شکل تشعشع محاسبه و در شکل ۸ با مقدار انتقال حرارت به شکل هدایت در ناحیه گپ گازی، مقایسه شده است.



شکل ۷- مقایسه جمله‌های هدایت شعاعی و طولی معادله انرژی

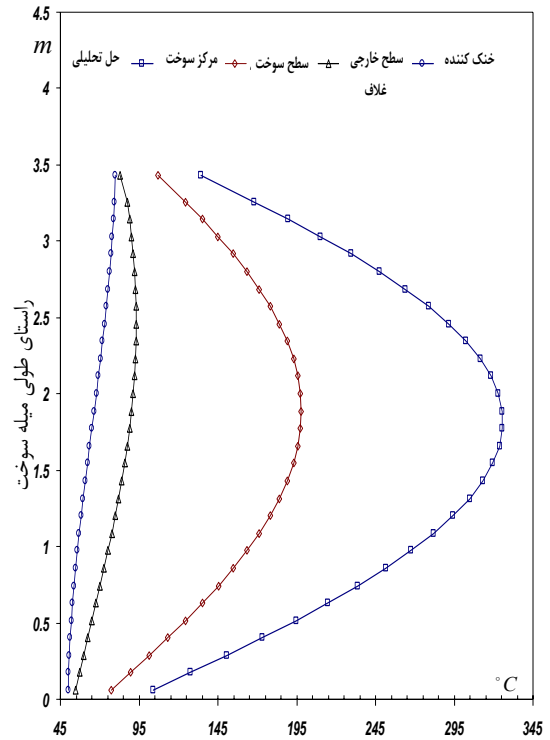


شکل ۸- مقایسه مقدار هدایت با تشعشع در گپ گازی

۴-۲- نتایج حل عددی با نرم افزار FLUENT

با حل مسئله مدل‌سازی شده در نرم افزار GAMBIT و تکرار آن برای رسیدن به جواب‌های بهینه (حالت مستقل از شبکه‌بندی)، منحنی‌های توزیع درجه حرارت در اجزاء میله سوخت مطابق شکل ۹ خواهند بود، که با جواب‌های بدست آمده از حل تحلیلی نیز مقایسه شده است [۵].

خود را دارد، بنابراین می‌بایست دمای سطوح و خط مرکزی سوخت در کمی دورتر از وسط راستای طولی میله سوخت بیشترین مقدار خود را داشته باشند، که این موضوع به وضوح در منحنی‌های رسم شده قابل مشاهده هستند.

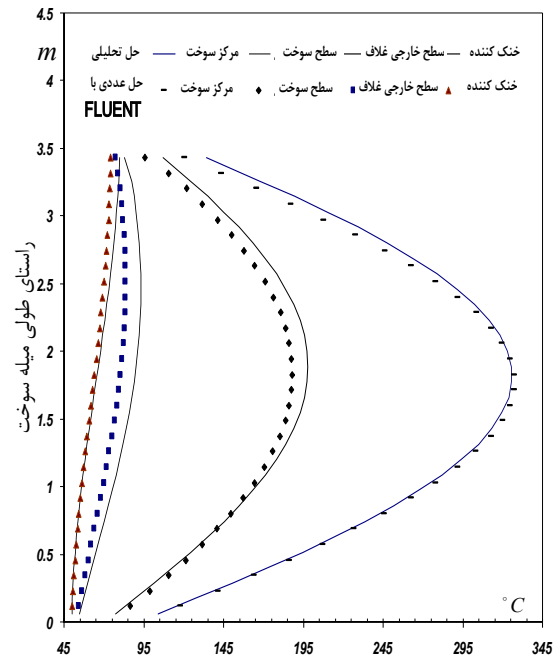


شکل ۹- توزیع درجه حرارت در اجزاء میله سوخت بدست آمده از حل تحلیلی

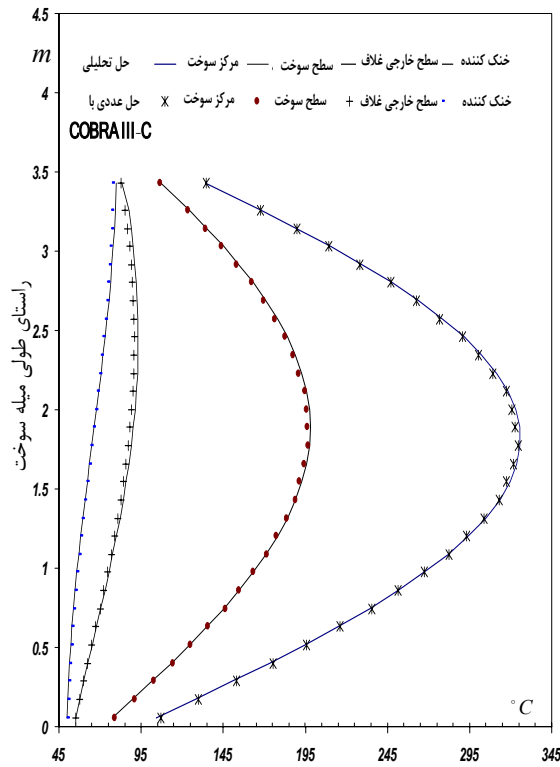
حال با انجام حل تحلیلی و معلوم شدن توزیع درجه حرارت، صحت مواردی که به منظور ساده‌سازی معادلات حاکم در قسمت ۱-۲ در نظر گرفته شده بودند، اثبات می‌گردد [۵]. برای اثبات اولین مورد، در شکل ۷ مقایسه منحنی‌های تغییرات جمله‌های $\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)$ و $\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$ ، معادله (۳) در راستای

طولی نشان داده شده است که منحنی جمله $\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$ تقریباً بر روی محور قائم منطبق شده است (ناچیز می‌باشد). در دومین مورد، از سهم انتقال حرارت به شکل تشعشع در مقابل انتقال حرارت به شکل هدایت در قسمت گپ گازی صرف‌نظر شده بود، با مشخص شدن دمای سطح خارجی غلاف (که منجر به محاسبه دمای داخلی غلاف با توجه به معلوم بودن ضریب هدایت غلاف و

دمای کانال‌های شماره (۱، ۳ و ۴) در این حالت با توزیع دما در حالت عادی در شکل ۱۱ با استفاده از COBRA III-C نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود مطابق شکل ۱۱ دمای سیال خروجی کانال (۲) در اثر تبادل حرارتی (به سبب وجود جریان‌های عرضی) با کانال‌های (۱ و ۳) کمی افزایش یافته است، که در اثر این تبادل حرارتی دمای سیال خروجی کانال‌های (۱ و ۳) نسبت به حالت عادی خود اندکی کاهش یافته‌اند. با توجه به آرایش کانال‌های جریان حول میله سوخت می‌توان انتظار داشت که دمای سیال خروجی کانال (۴) خیلی کم نسبت به حالت عادی خود تغییر کند، که این موضوع هم به وضوح در شکل ۱۱ نشان داده شده است [۵].



شکل ۹ - توزیع درجه حرارت در اجزاء میله سوخت بدست آمده از FLUENT



شکل ۱۰ - توزیع درجه حرارت در اجزاء میله سوخت بدست آمده از COBRA III-C

۴-۴ - مقایسه جوابهای عددی و تحلیلی

با توجه به شکل ۱۲، منحنی‌ها، اولاً دارای تطابق خیلی خوبی هستند، بطوریکه تقریباً بر هم منطبق شده‌اند و ثانیاً مقدار بیشینه توزیع‌ها با هم برابر است که یکی از پارامتر مهم در طراحی قلب راکتور است.

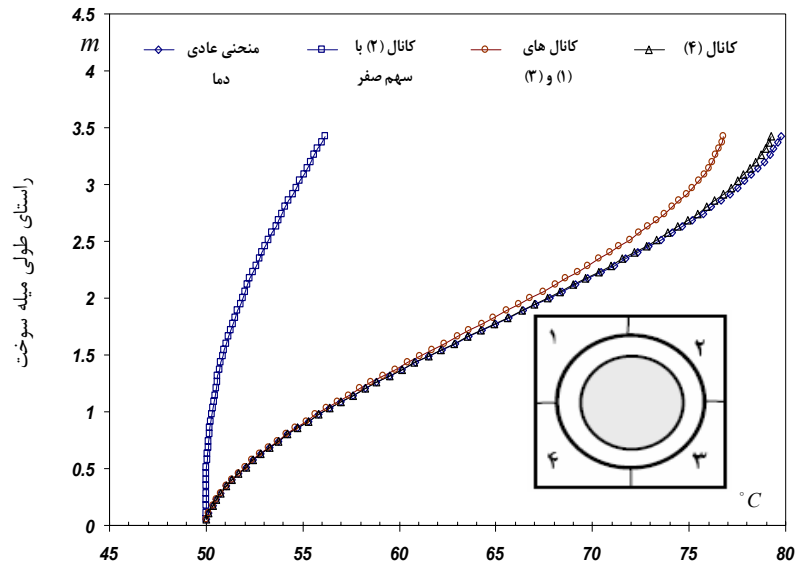
۴-۳ - نتایج حل عددی با نرم افزار COBRA III-C

با حل معادلات حاکم توسط نرم افزار COBRA III-C برای یک میله سوخت با استفاده از اطلاعات جداول ۱ تا ۶، منحنی‌های توزیع درجه حرارت در اجزاء میله سوخت مطابق شکل ۱۰ خواهند بود، که با جوابهای بدست آمده از حل تحلیلی نیز مقایسه شده است [۵].

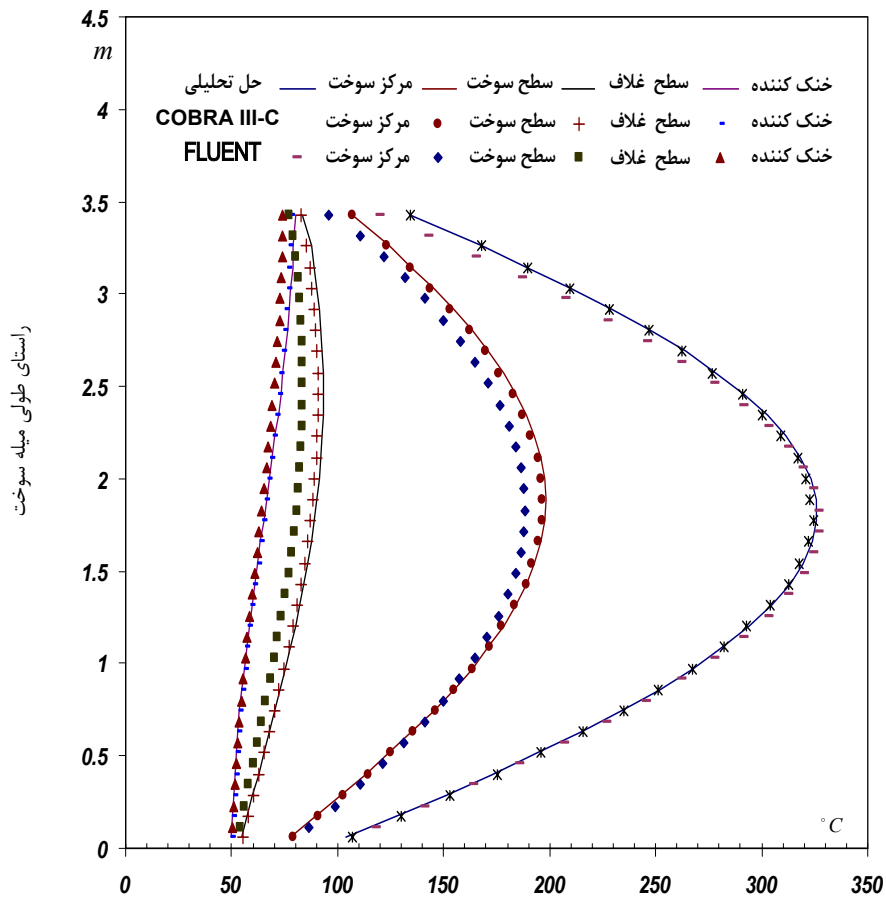
۴-۳-۱ - بررسی تاثیر جریان‌های عرضی در دمای سیال

خنک کننده کانال‌ها با نرم افزار COBRA III-C

یکی از قابلیت‌های COBRA III-C در مقایسه با نرم افزارهای چون FLUENT که در تحلیل حرارتی مجتمع میله‌های سوخت^(۱) مهم است امکان بررسی جریان‌های عرضی موجود بین کانال‌های جریان سیال است. برای انجام این بررسی در یک میله سوخت (نحوه تاثیر کانال‌های جریان بر توزیع درجه حرارت یکدیگر) با انتخاب چهار کانال مطابق شکل ۴ و با صفر قرار دادن میزان حرارت دریافتی در یکی از کانال‌ها (بعنوان مثال کانال شماره ۲) چگونگی تاثیر جریان‌های عرضی بر توزیع درجه حرارت در راستای طولی مطالعه شده است، که مقایسه توزیع



شکل ۱۱- نحوه تاثیر جریان های عرضی بر توزیع درجه حرارت کانال ها (همان تاثیر کانال های جریان بر یکدیگر)



شکل ۱۲- مقایسه جواب های تحلیلی با جواب های عددی

۴-۵- مقایسه جوابها با نتایج تجربی

در این قسمت با توجه به وجود نتایج تجربی فقط برای بیشینه دماها در اجزاء میله سوخت، دماهای بیشینه اجزاء میله سوخت در حالت بدون نگهدارنده، مطابق جدول ۷ با داده‌های تجربی [۱۶]، مقایسه شده‌اند. خطای موجود بین حل تحلیلی و نتایج تجربی به خاطر فرضیاتی است که برای ساده‌سازی مسأله انجام شده است. درصد خطای موجود بین نتایج حل‌های مختلف نسبت به حل تحلیلی در جدول ۸ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تطابق جوابها با توجه مقدار خطای داده شده، در حد قابل قبولی می‌باشد.

۵- حل عددی برای حالت با نگهدارنده

با توجه به عدم وجود نتایج تجربی و عدم امکان حل تحلیلی به سبب پیچیدگی معادلات حاکم، برای این حالت فقط حل عددی توسط نرم افزار FLUENT که دارای دقت بالایی برای محاسبات در یک میله سوخت می‌باشد، برای مقایسه با جوابهای نرم افزار COBRA III-C انجام شده است.

جدول ۷- مقایسه با نتایج تجربی [۱۶]

نتایج تجربی (°C)	نتایج COBRA (°C)	نتایج FLUENT (°C)	نتایج تحلیلی (°C)
۸۰	۷۹/۸۱	۷۶/۳	۷۹/۸۸
۱۰۴/۲۳	۹۱/۹۹	۸۵/۱۹	۹۳/۱۹
۲۲۸/۰۱	۱۹۷/۰۷	۱۹۰/۲	۱۹۸/۱
۳۳۹/۵۶	۳۲۵/۲۹	۳۲۶/۸۲	۳۲۵/۸۸

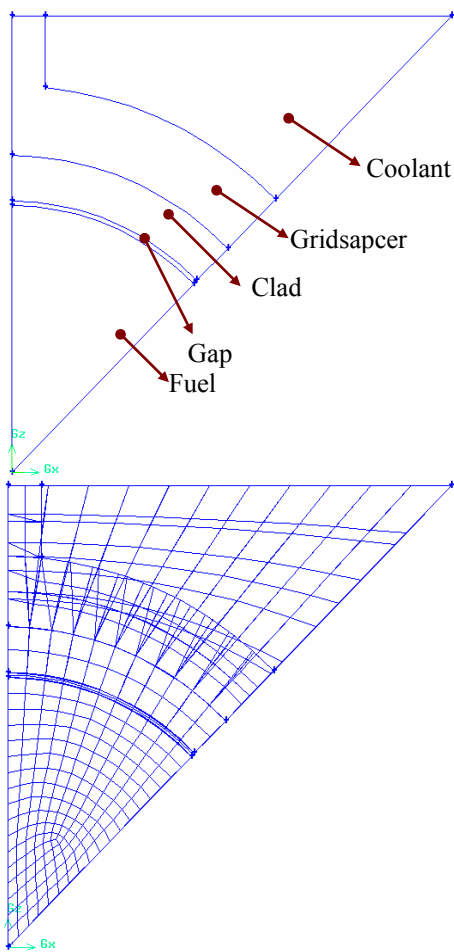
۵-۱- حل عددی با نرم افزار FLUENT

۵-۱-۱- روش حل

برای حل عددی این حالت با نرم افزار FLUENT مسأله مطابق شکل ۱۳ به صورت سه بعدی در GAMBIT مدل شده است.

جدول ۸- درصد خطای نتایج نسبت به حل تحلیلی

درصد خطای FLUENT نسبت به تحلیلی	درصد خطای COBRA نسبت به تحلیلی	درصد خطای تجربی نسبت به تحلیلی
۴	۰/۰۸	۰/۱۵
۸	۱/۳	۱۰/۶
۳/۹	۰/۵۲	۱۳/۱
۲/۹	۰/۱۸	۴



شکل ۱۳- نحوه مدل‌سازی و شبکه‌بندی یک هشتم میله

سوخت با نگهدارنده‌ها در Gambit [۵]

به مانند بخش ۱-۳-۱، با توجه به تقارن موجود در شکل میله سوخت، تنها یک هشتم آن در نظر گرفته شده است که اطلاعات مربوط به شبکه‌بندی آن در ذیل ذکر شده است. تعداد گره در هر کدام از حجم‌ها در حالت بهینه (حالت مستقل از شبکه‌بندی) [۵]:

قرص‌های سوخت:	گره ۴۶۶۸۶
گپ گازی:	گره ۹۰۳۶
غلاف و نگهدارنده‌ها:	گره ۹۴۸۸
کانال جریان:	گره ۱۵۲۱۶

نگهدارنده‌های مدل شده دارای طول ۱/۵ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۱۵ سانتی‌متر می‌باشند. لازم به ذکر است که برای بررسی تاثیر نگهدارنده‌ها بر توزیع درجه حرارت ۲۵۰ گره در راستای طولی در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مورد نیاز برای حل در نرم افزار FLUENT همان شرایط اشاره شده در بخش ۱-۳-۱ می‌باشد.

۵-۲- حل عددی با نرم افزار COBRA III-C

کلیت نرم افزار COBRA III-C به گونه‌ای است که می‌تواند انواع مختلف نگهدارنده‌ها را که به منظورهای مختلف در قلب راکتور مورد استفاده قرار می‌گیرند، تجزیه و تحلیل کند [۵].

۵-۲-۱- روش حل

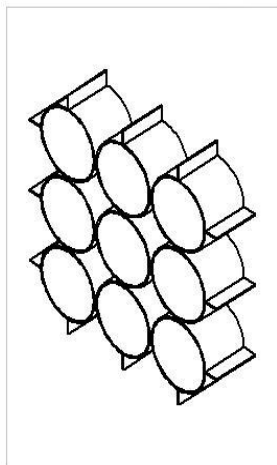
در این قسمت علاوه بر اطلاعات داده شده در بخش ۱-۳-۲، اطلاعاتی مربوط به موقعیت نسبی نگهدارنده‌ها و ضریب افت فشار مربوط به آنها (به صورت تجربی اندازه‌گیری شده است [۱۶])، که این ضریب می‌تواند به منظور بررسی رفتار ترموهیدرولیکی ناهمگن برای هر کانال مقدار متفاوتی باشد، مطابق جداول ۹ و ۱۰ برای ۱۰ عدد نگهدارنده داده می‌شود. همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود نگهدارنده مورد استفاده در این بررسی از نوع شبکه‌ای می‌باشد.

جدول ۹- ضرایب افت فشار کانال‌ها [۱۶]

شماره کانال	ضریب افت
۱	۱/۴
۲	۱/۴
۳	۱/۴
۴	۱/۴

جدول ۱۰- موقعیت نسبی نگهدارنده ها

شماره نگهدارنده ها	موقعیت نسبی
۱	۰/۰۵
۲	۰/۱۵
۳	۰/۲۵
۴	۰/۳۵
۵	۰/۴۵
۶	۰/۵۵
۷	۰/۶۵
۸	۰/۷۵
۹	۰/۸۵
۱۰	۰/۹۵



شکل ۱۴- طرح حواره‌ای از نگهدارنده های مورد استفاده در کانال سوخت [۵]

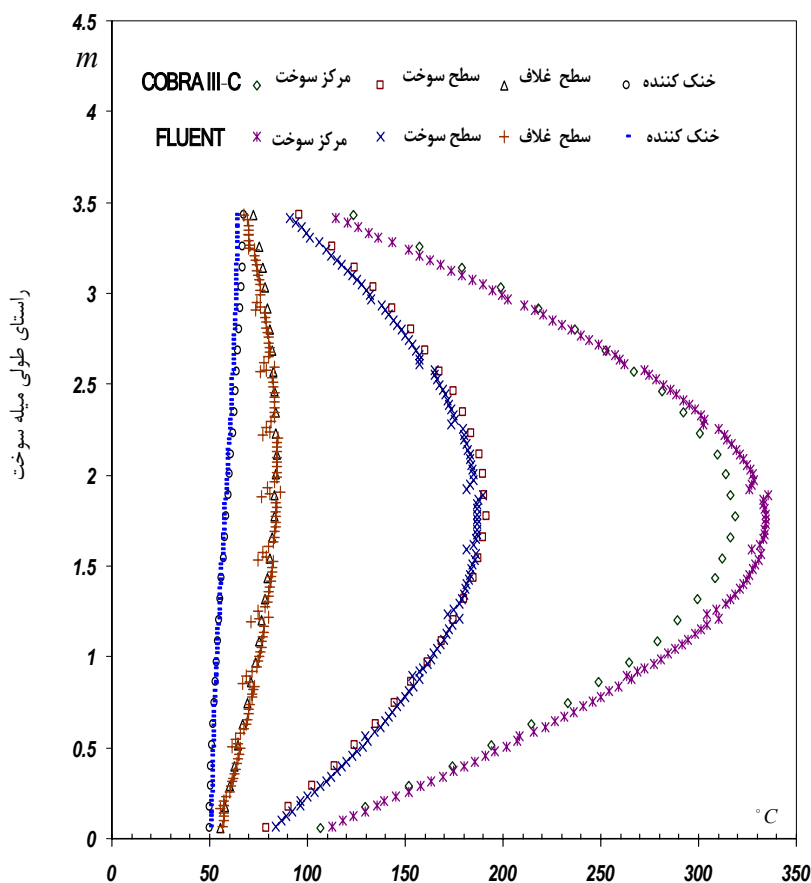
۶- مقایسه حل‌های عددی COBRA III-C و FLUENT برای حالت با نگهدارنده

با توجه به شکل ۱۵ تاثیر نگهدارنده‌ها، به تعداد ۱۰ عدد که مطابق جدول ۱۰ قرار داده شده‌اند، در جواب‌های بدست آمده از نرم افزار FLUENT (با توجه به اینکه تعداد ۲۵۰ گره در راستای طولی در نظر گرفته شده است)، کاملاً مشخص هستند ولی در جواب‌های بدست آمده از نرم افزار COBRA III-C تاثیر نگهدارنده‌ها به وضوح مشخص نمی‌باشند، که دلیل آن عدم

با توجه به منحنی‌ها توزیع درجه حرارت، درجه حرارت سیال خنک کننده در مسیر عبوری پیوسته افزایش می‌یابد، ثانیاً با توجه به اینکه اختلاف درجه حرارت سطوح در وسط راستای طولی میله بیشینه است و در همین محل شار حرارتی هم بیشترین مقدار خود را دارد، بنابراین انتظار می‌رفت که دمای سطوح و خط مرکزی سوخت در کمی دور تر از وسط راستای طولی میله سوخت بیشترین مقدار خود را داشته باشند، که این موضوع به وضوح در شکل ۱۲ برای میله سوخت بدون نگهدارنده و در شکل ۱۵ برای میله سوخت با نگهدارنده قابل مشاهده است. و همچنین نقطه بیشینه مقدار درجه حرارت که از نظر ترموهیدرولیکی در طراحی راکتور خیلی مهم است در این بررسی برای راکتور مورد نظر بخوبی مشخص شده است.

امکان در نظر گرفتن بیش از ۶۰ نقطه در راستای طولی (با توجه به ساختار نرم افزار) می‌باشد. البته منحنی‌ها درجه حرارت در این مورد هم دارای تطابق خوبی می‌باشند بطوریکه منحنی‌های درجه حرارت در سطح سوخت، سطح خارجی غلاف و سیال خنک کننده تقریباً بر هم منطبق‌اند، ولی در حالت کلی اگر ضخامت و پهنای نگهدارنده زیاد باشد بطوریکه سهم هدایت شعاعی و طولی آن قابل صرف‌نظر کردن نباشد (با توجه به اینکه از این جمله‌ها در COBRA III-C صرف‌نظر شده است [۵])، جواب‌های COBRA III-C دارای خطای بیشتری خواهند بود.

۷- نتیجه‌گیری



شکل ۱۵- مقایسه توزیع درجه حرارت در اجزاء میله سوخت بدست آمده از COBRA III-C و FLUENT برای میله سوخت با نگهدارنده

تولید حرارتی سوخت	q'''	علاوه بر نتایج فوق با توجه به تطابق نتایج حاصله و مورد
طول موثر	L	قبول بودن میزان خطای موجود بین جواب‌های دو نرم افزار و
طولهای برون‌یابی شده	δ_1, δ_2	اینکه مدت زمان صرف شده برای مدل‌سازی با نرم افزار
شماره کانالهای جریان	i, j, k	COBRA III-C نسبت به نرم افزار FLUENT و یا سایر
دبی جرمی	m	نرم افزارهای از این قبیل خیلی کمتر است، لذا استفاده از
فلوی عرضی انحرافی	W_{ij}	COBRA III-C علاوه بر تحلیل حرارتی قلب راکتور برای
فشار	P	تحلیل حرارتی میله و کانال سوخت پیشنهاد می‌گردد. به عنوان
دما	T	مثال به طور متوسط مدت زمان صرف شده برای مدل‌سازی و
ضرائب تصحیح توربولانت و مومنوم فلوی عرضی	F_D, F_T	حل در نرم افزار FLUENT با در نظر گرفتن زمان لازم برای
ضریب تبدیل واحد	g_c	رسیدن به جواب‌های بهینه (مستقل از شبکه‌بندی) در این مورد
حجم مخصوص	v'	(یک هشتم میله سوخت) در حدود حداقل ۱۲ نفر ساعت بوده
طول دیواره کانال‌ها	λ	(البته برای یک کاربر حرفه‌ای آشنا به تمامی ابزارهای نرم افزار)،
ضریب افت جریان عرضی و ضریب هدایت حرارتی	C_{ij}	در حالیکه این زمان برای یک کاربر حرفه‌ای COBRA III-C در
آنتالپی	h	حدود ۰/۵ نفر ساعت می‌باشد (CPU=2400 ; Ram=256) [۵].
انرژی داخلی	u	همچنین، زمانیکه بررسی انتقال حرارت مجتمعی از میله‌های
تعداد کانال‌ها	N	سوخت در کنار هم، با تمامی تجهیزات نگهدارنده آنها
ضریب اصطکاکی کانال‌ها	f_i	مدنظر باشد (تحلیل حرارتی قلب راکتور)، در صورت استفاده
دمای کانال‌ها	T_i	از نرم افزارهایی چون FLUENT با توجه به محدودیت حافظه

کامپیوترهای مورد استفاده، می‌بایست از سیستم پردازش موازی استفاده شود که موجب بالا رفتن شدید هزینه و مدت زمان لازم برای مدل‌سازی و حل خواهد شد، بطوریکه ممکن است چندین ماه طول بکشد [۵ و ۱۶]، بهره گرفتن از COBRA III-C که در مدت زمان یک یا دو روز همان تحلیل را انجام می‌دهد با توجه به دقت جواب‌های بدست آمده، مقرون به صرفه و منطقی‌تر خواهد بود.

مراجع

[1] WM.J-GARLAND, 1996 "Nuclear Reactor Process Systems : Thermal Hydraulic Analysis" 1st Edition, McMaster University, Canada

[2] Gulsevin et al., 1981 "The Thermal hydraulic Codes COBRA III-C and TERHID, An Analytical and Comparison", ANS, USA

[3] A. Tapucu et al., 1983 "Comparison of Subchannel Codes COBRA III-C and COBRA IV with Experimental Data obtained on Two Lateral Interconnected Flows", Canada

[4] J.W. Jackson et al., 1981 "COBRA III-C2 a Digital Computer Program for Steady State and Transient Thermal Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements" MIT, USA

[۵] موسی محمدپورفرد، آذر ماه ۱۳۸۳، " آنالیز انتقال حرارت در کانال سوخت راکتور هسته‌ای" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

[6] ECKERT, E.R.G, and R. M. DRAKE, 1959 "Heat and Mass Transfer" 2nd Edition , McGraw-Hill Book Company

[7] J.P-HOLMAN, 1997 "Heat Transfer" 8th Edition, McGraw-Hill Book Company, USA

نمادها

ضریب هدایت حرارتی	K
عدد پرانتل	Pr
عدد رینولدز	Re
قطر هیدرولیکی	D_h
چگالی	ρ
سرعت سیال	V
لزجت سینماتیک	ν
پخشندگی حرارتی	α
ثابت استفان- بولتزمن	σ
شار حرارتی سوخت	q''

- [13] NEIL E.TODREAS, MUJID S.KAZIMI, 1990 "Nuclear System II" Hemisphere Publishing Corporation
- [14] TUNCER CBECI, PETER BRADSHAW, 1988 "Physical and Computational Aspects of Convective Heat Transfer" Springer-Verlag New York Inc
- [15] JOHN. DONALD-BENET, 1955 "The Elements of Nuclear Power" 3rd Edition, Strat Claider University, USA
- [۱۶] مرکز تحقیقات سازمان انرژی اتمی ایران
- [8] M.M.EL-WAKIL, 1981 "Nuclear Heat Transport" 3rd Edition, The American Nuclear Society
- [9] TOHN R.LAMARSH, 1973 "Introduction to Nuclear Engineering" Polytechnic Institute of New York
- [10] HOFFMANN, KLAUS A. 1993 "Computational fluid dynamics for engineers" A publication of engineering education system
- [11] Manual of Fluent Version 6.0.12
- [12] D.S-ROW, 1977 "COBRA III-C a Digital Computer Program for Steady State and Transient Thermal Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements" MIT, USA