

توسعه نرم افزار THFAM بمنظور ارزیابی پارامترهای ترموهیدرولیکی ستون سوخت

راکتور گازی دمابالای منشوری HTTR

مرتضی خسروی میرزایی^(۱) - محمدباقر غفرانی*^(۱) - جلیل جعفری^(۲)

۱-دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده انرژی، گروه مهندسی هسته‌ای

۲-سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده تحقیقات و توسعه راکتورها و شتابدهنده‌ها

چکیده:

راکتورهای گازی دما بالا یکی از گزینه‌های مناسب در توسعه راکتورهای نسل چهارم می‌باشند. در این پروژه یک نرم‌افزار ترموهیدرولیکی (THFAM) بمنظور محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیکی ستون سوخت راکتور HTTR در حالت پایا گسترش داده شده است. معادلات بقای جرم و بقای ممتوم محوری بمنظور محاسبه توزیع فشار و دبی و معادلات بقای انرژی، بمنظور بدست آوردن توزیع‌های دمایی استفاده شده است. روش استفاده شده در گسترش معادلات، روش تفاضل محدود می‌باشد. بمنظور اعتباربخشی نتایج از داده‌های تجربی مربوط به امکانات آزمایشگاهی HENDEL استفاده شده است.

کلمات کلیدی: نرم‌افزار ترموهیدرولیکی، روش تفاضل محدود، راکتورهای گازی دمابالا، HTTR، HENDEL

مقدمه :

راکتورهای با خنک‌کننده گازی دمابالا یکی از مهمترین راکتورهای نسل چهارم می‌باشند. در این راکتورها که بعنوان راکتورهای قدرت در نظر گرفته شده‌اند، به موازات تولید الکتریسیته به دلیل دستیابی به دماهای بالا (تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) قابلیت‌های دیگری نیز در نظر گرفته شده است؛ از جمله این موارد می‌توان به تولید هیدروژن، نمک زدایی از آب دریا و کاربردهای حرارتی دما بالا در صنایع شیمیایی، پتروشیمی و تولید آهن اشاره نمود. استفاده از سوخت ذره‌ای و پایین بودن چگالی قدرت سوخت، ایمنی ذاتی این نوع راکتورها را بسیار بالا برده و از این جهت نیز راکتورهای گازی دما بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

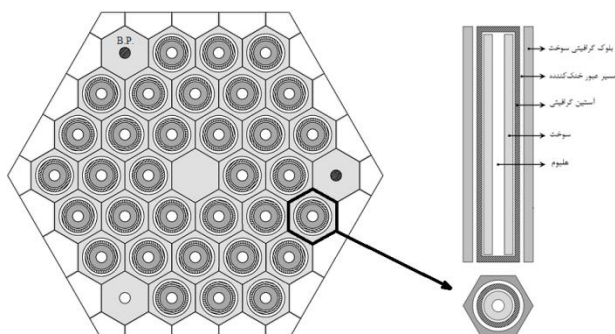
در زمینه شبیه سازی ترموهیدرولیک راکتورهای دما بالای گازی منشوری تحقیق جامعی در داخل کشور انجام نشده است؛ امادر مرجع [۱] نرم‌افزاری توسعه داده شده که فقط برای محاسبات ترموهیدرولیک یک عنصر سوخت با مرزهای عایق می‌باشد (THAC). در مرجع [۲] نیز نرم‌افزار THCM برای بررسی قلب راکتور HTTR توسعه داده شده است. بعلاوه پژوهش حاضر نیز بخش دیگری از کار انجام شده در مرجع [۲] می‌باشد. همچنین کد MATRA-GCR در مرجع [۳] و کد LOTE در مرجع [۴] بمنظور بررسی ترموهیدرولیک راکتورهای دمابالای منشوری گسترش داده شده‌اند.

در این پروژه یک ستون سوخت نمونه از قلب HTTR انتخاب شده و با طراحی یک مدل ترموهیدرولیکی مناسب، نرم‌افزار THFAM بمنظور محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیکی در یک ستون سوخت گسترش داده شده است. از ورودی‌های اصلی نرم‌افزار می‌توان به ابعاد هندسی، توزیع چگالی قدرت تولیدی در سوخت و

دما، فشار و دبی سیال ورودی به ستون سوخت اشاره کرد. خروجی‌های اصلی نرم‌افزار، دبی و توزیع فشار سیال و توزیع‌های دمایی در هرکانال سوخت می‌باشند.

روش کار :

همان گونه که در شکل شماره (۱) نشان داده شده است، بمنظور مدل‌سازی ترموهیدرولیکی ستون سوخت در ابتدا یک الگوی شش‌ضلعی بر روی بلوک گرافیتی در نظر گرفته شده است. در سلول سوخت انتخاب شده، ابتدا و انتهای سوخت حلقوی بوسیله غلاف بسته شده و خنک‌کننده تنها از پیرامون غلاف جریان دارد. مورد دیواره‌های خارجی سلولهای سوخت پیرامونی ستون سوخت شرط مرزی آدیاباتیک در نظر گرفته شده است.



شکل شماره (۱): نمایش ستون سوخت HTTR و سلول انتخاب شده از آن

در مراحل حل فرض اولیه این است که تمام حرارت تولیدشده در سوخت در حالت پایدار به سیال خنک‌کننده داده شده است و با این فرض مجموعه معادلات (۱) در هر مقطع از شبکه‌بندی محوری هر یک از سلول‌ها تشکیل شده است.

$$\begin{cases} A_{cls} h_{cls} (T_{cls} - T_c) + A_{bc} U_{bc} (T_b - T_c) = q''' V_f \\ A_{cls} \sigma \varepsilon (T_{cls}^4 - T_b^4) + x \times q''' V_f = A_{bc} U_{bc} (T_b - T_c) \\ T_c = T_{cin} + \frac{q''' V_f}{\dot{m} c_p} \end{cases} \quad (1)$$

در مراحل بعد با در نظر گرفتن مقاومت‌های حرارتی بین سلول‌ها فرض دیواره‌های عایق و معادلات اصلاح شده‌اند. همچنین بمنظور بدست آوردن توزیع فشار محوری در کانال‌ها دو معادله پیوستگی و بقای ممنتوم محوری در هر مقطع محوری بکار گرفته شده است.

$$\begin{cases} \rho_j u_j = \rho_{j-1} u_{j-1} = \rho_m u_m = \frac{\dot{m}}{A_{ch}} \\ (\rho_{j-1} u_{j-1}) \frac{u_j - u_{j-1}}{\Delta z} = \frac{P_{j-1} - P_j}{\Delta z} - \frac{f_j \rho_j u_j^2}{2D_e} + \rho_j g \end{cases} \quad (2)$$

از جمله مربوط به وزن سیال به دلیل کوچک بودن صرف نظر شده است.

ضریب اصطکاک f از رابطه شماره (۳) بدست آمده است [۳].



$$f = 0.376 \text{Re}^{-0.25} \quad (2000 < \text{Re} < 20000) \quad (3)$$

ضریب انتقال حرارت هدایتی تجربی برای یک کانال جریان حلقوی در یک راکتور گازی از رابطه شماره (۴) بدست آورده شده است [۳].

$$h = 0.0215 \left(\frac{k_c}{D_e} \right) \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2000 \leq \text{Re} < 18000) \quad (4)$$

با فرض انتقال حرارت یک بعدی در مورد دمای سطح داخلی غلاف و دمای سطح خارجی سوخت داریم:

$$T_{cl,i}(z) = T_{cl,o}(z) + \frac{(1-x) \times q''(z) \times A_{sc}}{2\pi k_{cl}} \ln(d_{co}/d_{ci}) \quad (5)$$

$$T_{fs}(z) = T_{cl}(z) + \frac{(1-x) \times q''(z) \times A_{sc} t_g}{\pi d_{gas} k_{gas}} \quad (6)$$

در داخل سوخت نیز در جهت شعاعی داریم:

$$\int_{T_{fs}(z)}^{T_{fc}(z)} k_f(T) dT = \frac{(1-x) \times q''(z)}{2} \left(r_{fc}^2 \ln \left(\frac{r_{fc}}{r_{fs}} \right) - \frac{r_{fc}^2 - r_{fs}^2}{2} \right) \quad (7)$$

که با استفاده از تقریب مرتبه اول در بسط تیلور رابطه زیر بدست آمده است.

$$\Delta T_i = T_{i+1} - T_i = \frac{df}{dr}(r_i) \Delta r + O(\Delta r^2) \quad (8)$$

$$\frac{df}{dr}(r_i) = \frac{q''}{2} \left(\frac{r_{fs}^2}{r_i} - r_i \right)$$

فلوچارت حل مدل ارائه شده در شکل ۲ آورده شده است. برای شروع محاسبات ترموهیدرولیکی، بعلاوه شرایط آدیاباتیک در سلولها، دبی همه کانالها نیز بصورت زیر مساوی فرض شده است.

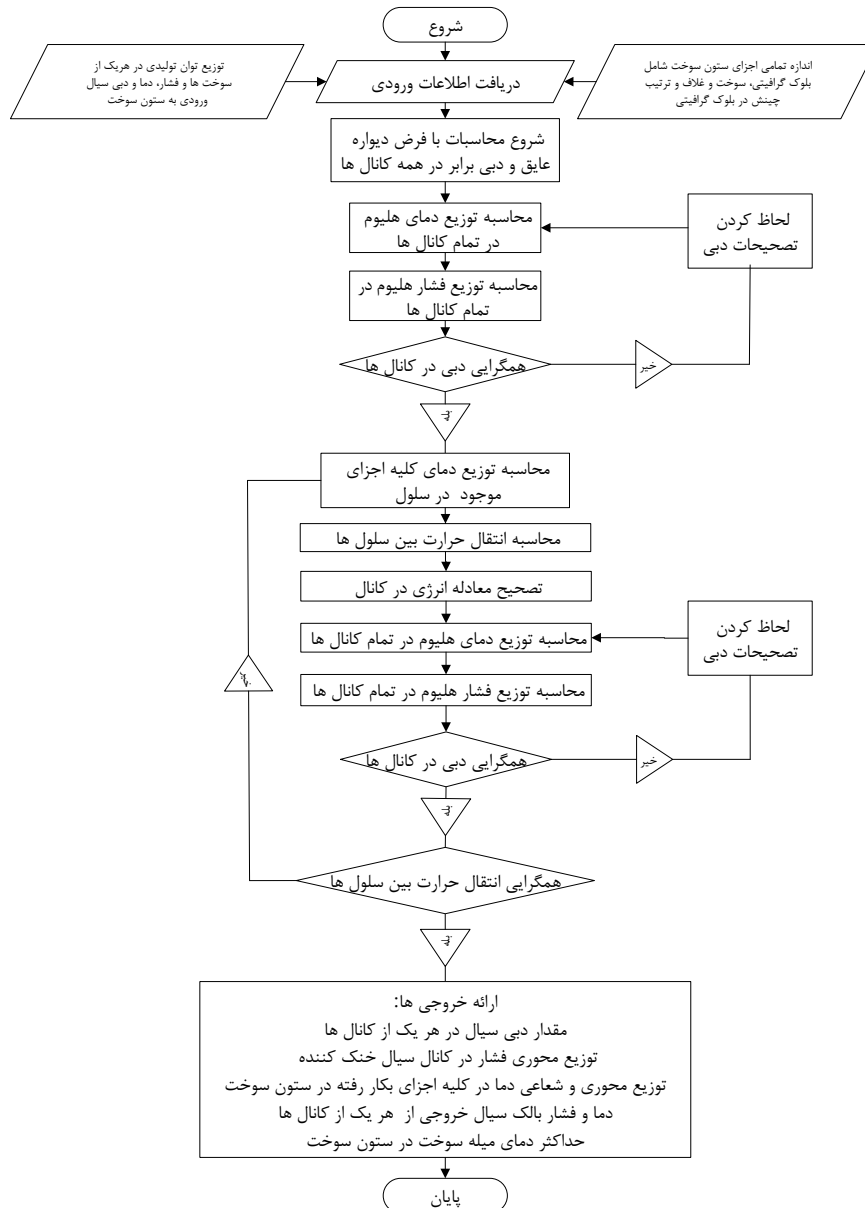
$$\sum_{i=1}^N \dot{m}_i^k = \dot{m}_{total} \Rightarrow \dot{m}_1^k = \dot{m}_2^k = \dot{m}_3^k = \dots = \dot{m}_N^k = \frac{\dot{m}_{total}}{N} \quad (9)$$

که در آن N تعداد کانالها و بالاوند k مرحله تصحیح در دبی کانالهاست. اما از آنجا که باید افت فشار همه کانالها با هم برابر باشد، تصحیح زیر لحاظ شده و مراحل قبلی مجدداً با دبیهای جدید تکرار می شود.

$$\dot{m}_i^{k+1} = \dot{m}_i^k \times \frac{P_i^k}{P_{ave}^k} \quad (10)$$

که در آن P_i فشار در خروجی کانال i و P_{ave} میانگین فشار خروجی کانالها است. مراحل تکراری فوق آن قدر ادامه می یابد تا تغییرات در مقدار دبیها به حد دقت مورد نظر (۰/۰۱ درصد) کاهش یابد. در مرحله بعد و در شرایط بقای فرض عایق بودن دیوارهها دما در قسمت های مختلف سلول بدست آورده می شود.

در مرحله آخر با حذف فرض سلول آدیاباتیک، انتقال حرارت از سلولهای مجاور به یکدیگر محاسبه شده و

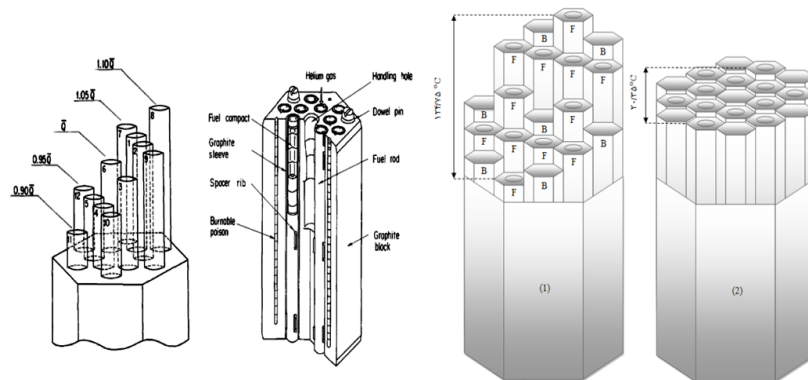


شکل شماره (۲): فلوچارت چگونگی انجام محاسبات در نرم افزار THFAM

تصحیحات بر روی تمامی معادلات صورت گرفته و دماهای جدید بدست می آیند. دمای بلوک سلول های معادل بلوک های میله کنترل، در هر مرحله از محاسبات نرم افزار برابر میانگین دمای بلوک گرافیتی سلول های سوخت جانبی است. نهایتاً در یک حلقه داخلی با استفاده از معادلات اصلاح شده توزیع دبی تصحیح می شود و در یک حلقه خارجی انتقال حرارت ناشی از حذف دیواره های عایق تا همگرایی کامل اصلاح می شود.

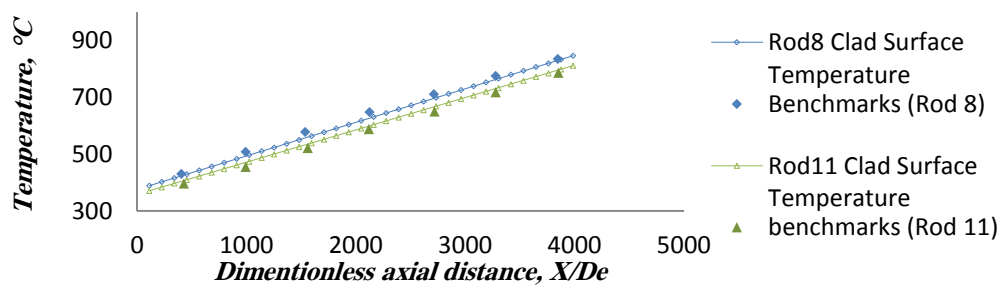
نتایج :

ورودی‌های مربوط به مشخصات ابعادی ستون سوخت آزمایشگاهی HENDEL و مقادیر کمی توزیع قدرت پله‌ای داده شده به آن، با استفاده از اطلاعات مرجع [۵] به نرم‌افزار داده شده است. در شکل ۳ مقایسه بین حالت دیواره‌های عایق سلولی و دیواره‌های هدایتی نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود هدایت حرارتی بالا در گرافیت از ایجاد افزایش دمای موضعی جلوگیری کرده است.



شکل شماره (۳): چگالی قدرت داده شده نسبی و اختلاف دمای حداکثر بین بلوک‌های سوخت در خروجی: (۱) با دیواره‌های عایق (۲) با دیواره‌های هدایتی

در امکانات آزمایشگاهی HENDEL بجای سوخت از المان الکتریکی استفاده شده است؛ لذا دمای سطح غلاف بدست آمده از نرم‌افزار در شکل ۴ با مقادیر مرجع بدست آمده آزمایش مقایسه شده‌اند.



شکل شماره (۴): مقایسه دمای سطح غلاف در میله سوخت شماره ۸ و ۱۱

جمع بندی :

نرم‌افزار محاسباتی THFAM بمنظور تحلیل پارامترهای ترموهیدرولیکی ستون سوخت راکتور گازی دما بالای منشوری HTTR توسعه داده شد. معادله بقای جرم و ممتوم محوری بمنظور بدست آوردن توزیع فشار در کانال و معادلات بقای انرژی بمنظور دستیابی به توزیع دما در بخش‌های مختلف به کار گرفته شده‌اند. نهایتاً از مقایسه نتایج خروجی نرم‌افزار THFAM با نتایج تجربی امکانات آزمایشگاهی HENDEL همخوانی خوبی مشاهده شد. دلیل اصلی اختلاف‌های جزئی مشاهده شده ساده‌سازی‌های انجام شده در مدل و صرف‌نظر کردن از جریان‌های نشتی و عرضی است.

علامت	توضیحات	واحد
A _{cls}	سطح خارجی غلاف در مش مزبور	m ²
A _{bc}	سطح در تماس با خنک کننده از بلوک گرافیتی	m ²
h _{cls}	ضریب انتقال حرارت جابجایی از سطح غلاف به سیال خنک کننده	W/m ² K
U _{bc}	ضریب انتقال حرارت کلی از بلوک گرافیتی به سیال خنک کننده	W/m ² K
σ	ضریب استفان بولتزمن = 5.6704×10^{-8}	W/m ² K ⁴
ϵ	گسیلمندی سطح غلاف نسبت به سطح بلوک	-
T _c	دمای بالک سیال خنک کننده	°C
T _{ein}	دمای بالک سیال خنک کننده ورودی از مش محوری قبلی	°C
T _{cls}	دمای سطح غلاف	°C
T _b	دمای بلوک گرافیتی	°C
q'''	تولید حرارت حجمی در سوخت	W/m ³
V _f	حجم المان سوخت سلول در نظر گرفته شده	m ³
\dot{m}	دبی جرمی سیال خنک کننده در سلول	kg/s
c _p	ظرفیت گرمایی سیال خنک کننده در سلول	J/kgK
x	سهم حرارت تولیدی در کند کننده	-
ρ_j	چگالی سیال خنک کننده در مقطع محوری زام	kg/m ³
u _j	سرعت سیال خنک کننده در مقطع محوری زام	m/s ²
P _j	فشار سیال خنک کننده در مقطع محوری زام	Pa
f _j	ضریب اصطکاک در مقطع محوری زام	-
g	شتاب گرانش	m/s ²

مراجع :

- [۱] نادری محمدحسین، غفرانی محمدباقر، جعفری جلیل، "توسعه یک کد کامپیوتری برای محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیکی راکتورهای گازی دما بالا"، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۸.
- [۲] خسروی میرزایی مرتضی، غفرانی محمدباقر، جعفری جلیل، "توسعه کد کامپیوتری برای طراحی ترموهیدرولیک قلب راکتورهای خنک شونده گازی دما بالا (HTGR)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۰.
- [۳] Han K.-hyun, Seo K.-won, Dae-Hyun Hwang, Soon Chang, "Development of a thermal hydraulic analysis code for gas-cooled reactors with annular fuels", Nuclear Engineering and Design, ۲۳۶, pp. ۱۶۴-۱۷۸, ۲۰۰۶.
- [۴] Boutard, F., Carvallo, G., Chevalier, G., "French Experience in Thermo hydraulics Calculation of Gas Cooled Reactors", conference on high temperature reactor, Vienna Austria, ۲۰۰۴.
- [۵] Maruyama, S., Takase, K., Hino, R., Izawa, N., Kawamura, H., Shimomura, H., "Experimental studies on the thermal and hydraulic performance of the fuel stack of the VHTR— Part II: HENDEL multi-channel test rig with twelve fuel rods" Nuclear Engineering and Design, ۱۰۲, pp. ۱۱-۲۰, ۱۹۸۷.
- [۶] Shinzo Saito, Toshiyuki Tanaka, Yukio Sudo, "Present Status of the High Temperature Engineering Test Reactor", Nuclear Engineering and Design. ۱۳۲, ۸۵-۹۳, ۱۹۹۱.