نشریه تحقیقاتی فنی ـ مهندسی استقلال، دانشگاه صنعتی اصفهان شماره ۱۱ مهرماه ۷۱

شبیه‌سازی عددی پروسه‌های انتقال درقلب رآکتورهای هسته‌ای

ابراهیم شیرانی* ـ اصغر اسماعیلی**

چکیده

هدف ازاین مقاله ارائه روش وتدوین یک برنامه کامپیوتری‌است که پروسه‌های انتقال (جرم، ممنتم وانرژی) را درقلب یک راکتورهسته‌ای که باسوخت میله‌ای کارمی‌کند، شبیه سازی نماید. برای تحلیل جریان پیچیدهٔ مغشوش ودوفازی درقلب رآکتور، ابتدا آن رابه کانالهایی که توسط میله‌های سوخت محصورشده‌اندتقسیم کرده، سپس یک مدل ریاضی ازهندسه مسئله رامعرفی می‌کنیم. آنگاه معادلات حاکم برجریان رابااستفاده ازفرضیاتی نظیردایم، یکنواخت وهمگن بودن سیال درهرمقطع ونیزمدلهایی برای ضریب انتقال حرارت وهداصطکاکی درجریان دوفازی مغشوش ساده کرده ونهایتاً ازروش توسعه یافته اویلرو روش قدم به قدم به طریق عددی حل می‌کنیم.

برمبنای معادلات جریان، فرضیات ساده کننده، مدلهای معرفی شده وروش عددی مذکوربرنامه‌ای کامپیوتری تدوین شده‌است. این برنامه قادراست جریان یک فازی ودوفازی راموردتحلیل قراردهدوبرای یک هندسه مشخص اعمال شده ونتایج قابل قبولی به دست دهد.

مقدمه

استفاده ازانرژی هسته‌ای به‌علت قابلیت بالای آزادسازی انرژی درواکنش هسته‌ای ونیزمحدودیت منابع سوخت فسیلی ازاهمیت زیادی برخورداراست. انرژی حاصل ازشکافت یک پونداورانیم معادل سوختن ۱۲۵۰ تن ذغال سنگ است. نوع متداول رآکتورهای هسته‌ای که دراین جانیزموردنظراست، رآکتوزباسوخت میله‌ای است. میله‌های باریک وبلندسوخت درمحفظه‌ای به نام قلب رآکتورقراردارندودراثرشکافت، انرژی زیادی ازخودآزادمی‌کنند. این انرژی به وسیله جریان سیال خنک کننده که بامیله‌های سوخت درتماس است، دریافت ومنتقل

---

* دانشیاردانشکده مهندسی مکانیک ـ دانشگاه صنعتی اصفهان

** فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک ـ دانشگاه صنعتی اصفهان

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

می‌شود. درحین حرکت سیال درامتدادمیله‌های سوخت، جوشش موضعی سیال صورت می‌گیرد. ازطرفی برای افزایش انتقال حرارت وکاهش دمای میله‌های سوخت، حرکت سیال صرفاً" درامتداداین میله‌هانبوده بلکه باقراردادن زایده‌هایی برسرراه آن حرکتهای جانبی مصنوعی به سیال واردمی‌شود.

باتوجه به جریان مغشوش درمسیرهای پیچیده بین میله‌هاودوفازی بودن جریان، بررسی وتحلیل چنین جریانی بسیارپیچیده خواهدبود. ازطرفی ازنظرطراحی وکنترل، نیازفوری به دردست داشتن اطلاعات صحیح ازخصوصیات جریان وپارامترهای مختلف ترموهیدرولیکی درطول مسیرجریان وجوددارد. حل این مسئله معمولاً" ازدوطریق تحلیلی وتجربی صورت می‌گیردکه دراین جاروش تحلیلی بااستفاده ازحل عددی معادلات مدل شده جریان مدنظراست. برای حل مسئله ازاین روش، معادلات ساده شده حاکم برجریان سیال شامل معادلات بقای جرم، ممنتم وانرژی حل می‌شوند. مقاله حاضربرمبنای ایده‌های موجود درکدهای کامپیوتری کبرای I و II(به‌ترتیب درمراجع [۱] و [۲]) تدوین شده است. البته استفاده مستقیم ازکدهای موجودبه علت کمبوداطلاعات امکان پذیرنبوده ولذابررسی حاضربرمبنای اطلاعات موجود وتئوری حاکم برکدهاصورت گرفته است. ولی جزئیات برنامه کامپیوتری وروش محاسبات متفاوت است. کدتوسعه یافته دراین مقاله برخی ازمحدودیتهای موجوددرکدهای کبرا راندارد وکلّی‌تر ازاین دوکد است .

راکتورهای هسته‌ای

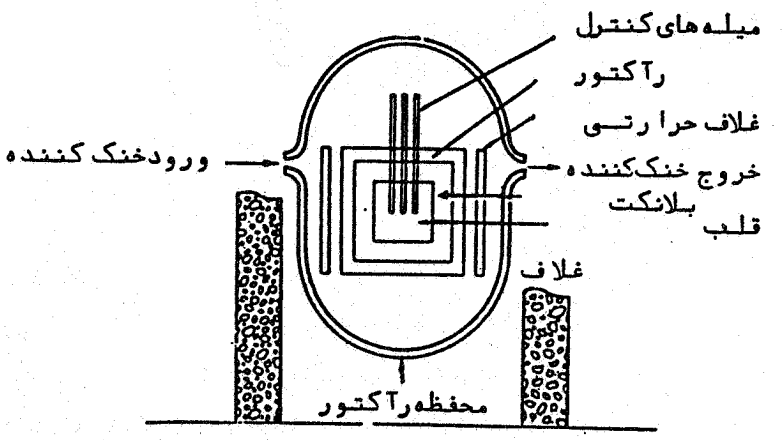
اساس راکتورهای هسته‌ای برمبنای برخورد نوترون به هسته‌های عناصرسنگین نظیراورانیوم ۲۳۵ یاپلوتونیوم ۲۳۹ است که سبب تشکیل هسته جدیدی می‌گردد. پس ازدریافت نوترون، هسته حاصل درحالت تحریک شده بالایی قرارگرفته وبسیارناپایدارمی‌شود؛ لذااین هسته به هسته‌های کوچکتری تقسیم می‌گردد. دراثراین تقسیم انرژی زیادی آزادمی‌شود. تقسیم هسته بزرگ به هسته‌های کوچک باآزادسازی تعدادی نوترون نیزهمراه است که خودسبب تداوم این تحولات خواهدشد. مثلاً" اورانیوم ۲۳۵ دراثردریافت یک نوترون تبدیل به گزنون (Xe^{140})، استرانسیوم (Sr^{94}) وآزادی دونوترون می‌شود [۳].

انرژی حرارتی آزادشده درقلب راکتوررابه وسایل مختلف مثل باطری هسته‌ای، ترموالکتریسیته یاترمویونیک ویاتوربین بخاروژنراتوربه انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. دراین

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

جامعمولترین روش موردبحث قرارمی‌گیرد.

توان حرارتی آزادشده درقلب رآکتورمی‌تواندبیش از۳ میلیون وات ودبی سیال خنک کننده بیش از۱۰۰ گالون بردقیقه باشد. شکل ۱ شماتیک یک رآکتور هسته‌ای رانشان می‌دهد. سیال خنک کننده می‌تواندآب، آب سنگین ویاگازهای باظرفیت حرارتی بالامثل هلیوم باشد. درشکل مذکورمیله‌های کنترل وبلانکت نشان داده شده است. نقش میله‌های کنترل جذب نوترون است. میله‌های کنترل قابل تنظیم بوده ودرموقع لزوم واردقلب رآکتورشده ونوترونهای موجوددر فضارابه خودجذب می‌کنند. این عمل سبب کاهش انرژی حرارتی تولیدی یاقطع آن می‌شود. بلانکت‌ها نقش منعکس کننده رابرعهده داشته و ازفرارنوترونهاازقلب رآکتور جلوگیری می‌کنند. شکل ۲، ساختمان قلب یک رآکتور رانمایش می‌دهدکه درآن نحوه قرارگرفتن میله‌های سوخت ومحل میله‌های کنترل نمایش داده شده است. سیال خنک کننده ازلابلای میله‌هاعبورمی‌کند.

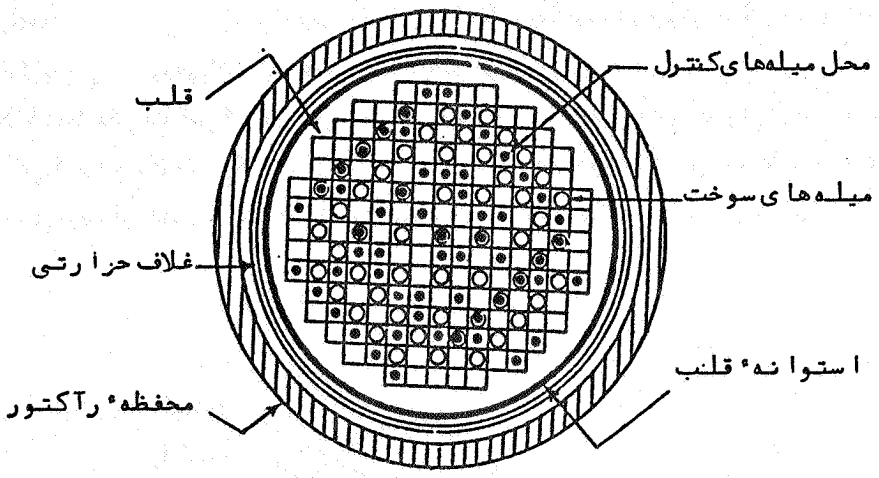


شکل ۱- اجزای اصلی یک راکتورهسته‌ای به همراه غلاف حرارتی

سیال خنک کننده بایددارای ضریب انتقال حرارت هدایتی بالا، ظرفیت حجمی زیاد،

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

خاصیت کندکردن نوترونهابرای افزایش احتمال برخوردآنهابه هسته‌های سوخت، پایین بودن فشاربخاراشباع دردمای قلب رآکتور، حداقل خورندگی وتمایل به واکنش شیمیایی بامحیط اطراف، پایداری ومقاومت دربرابرتجزیه شدن دردمای کاررآکتورباشد.

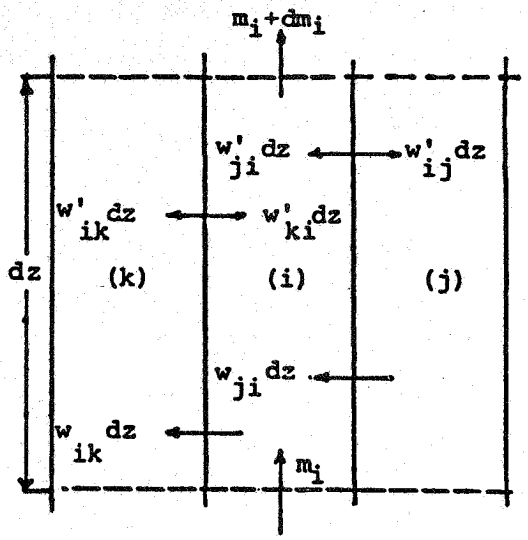


شکل ۲- سطح مقطع افقی راکتور

توصیف کانالهای جریان

نحوه آرایش میله‌های سوخت، غیریکنواخت بودن انتقال حرارت به سیال درنقاط مختلف مقطع عبورجریان ووجودحرکتهای جانبی سیال، سبب پیچیدگیهای جریان درطول میله‌های سوخت می‌شود. شکل ۳ مسیرحرکت سیال رادرکانالهای بین میله‌های سوخت نمایش می‌دهد. حرکت کلی سیال ازپایین به بالاست وحرکتهای جنبی سیال به صورت فلش‌های افقی نمایش داده شده است. این حرکات دراثرمغشوش بودن جریان (W′) ونیزجذب غیریکنواخت حرارت وافت فشارغیریکسان (W) درمسیرهای مختلف ایجادمی‌شود. همچنین حرکتهای جنبی سیال (W) می‌تواندراثروجودوسایل مکانیکی ازقبیل مخلوط کننده‌های مارپیچی که برسرراه جریان قراردارند، به وجودآید.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]



شکل ۳- نمایش کانالهای جریان

برای سادگی درتحلیل مسئله، میدان جریان رامی‌توان به نواحی مختلفی تقسیم کرد. به این ناحیه‌هاکه توسط میله‌های سوخت محصورشده‌اند، کانال جریان می‌گوییم. درشکل مذکوردوکانال i و j نمایش داده شده است. دبی عبوری ازکانال i، m_i وازکانال j، m_j است. همچنین دبی دراثرحرکت جانبی سیال دربین کانالهابا w (برای جریانهای عرضی انحرافی) و w′ (برای جریانهای عرضی دراثراغتشاشات جریان) نمایش داده می‌شود. اختلاط سیال بین کانالها تأثیرمهمی درانتقال ممنتم وانرژی دارد. انتخاب کانالهای جریان به صورتی که دربالا تشریح شدبرای تحلیل جریان دریک مجموعهٔ چندین میله‌ای انتخاب مناسبی است، زیرانحوهٔ قرارگرفتن میله‌هاطوری است که معمولاً باعث تشکیل کانالهای تقریباً مجزا می‌شود. البته بین کانالها، انتقال جرم ، ممنتم وانرژی صورت می‌گیرد. درتحلیل مسئله مهمترین فرضیات عبارت‌اند از: جریان دوفازی سیال، دایم ولغزشی بودن جریان درهرکانال ویکنواخت بودن آن در هر مقطع از هر کانال .

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

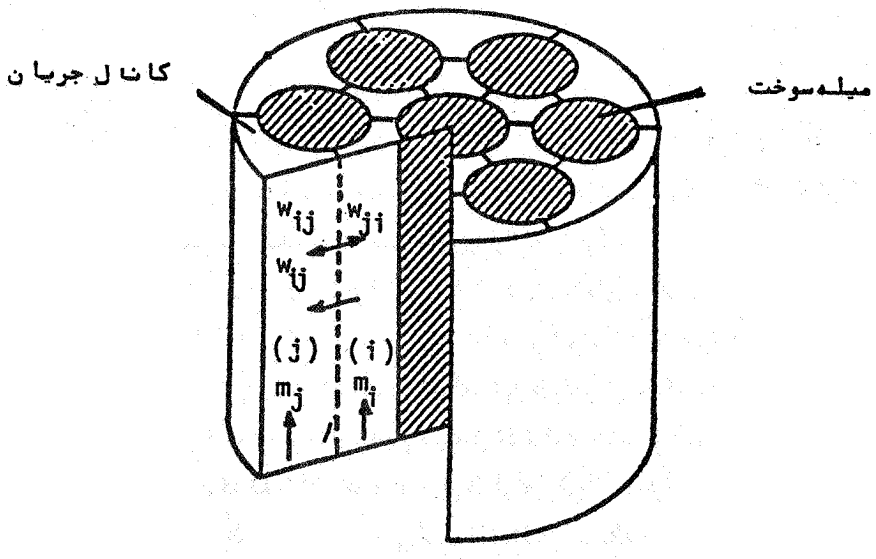
معادلات حاکم

درشکل ۴، مقطعی ازکانال i به طول dz همراه بادوکانال مجاور j و k نشان داده شده است. معادله پیوستگی برای کانال i به صورت زیراست :

$$\frac{dm_i}{dz} = w_{ji} - w_{ik} \rightarrow \frac{dm_i}{dz} = -(w_{ij} + w_{ik}) \qquad (۱)$$

این رابطه باتوجه به کوچک بودن اشل زمانی اغتشاشات جریان ، ودرنتیجه برقراری روابط $w'_{ik}=w'_{ki}$ و $w'_{ji}=w'_{ij}$ به دست آمده است . درصورتی که کانال i باN کانال مجاورباشد، داریم:

$$\frac{dm_i}{dz} = -\sum_{j=1}^{N} w_{ij} \quad , \quad i=1,2,\ldots,M \qquad (۲)$$



شکل ۴- تبادل جرم کانال i باکانالهای مجاور

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

که درآن M تعدادکل کانالهادرمیدان جریان است .

به روشی مشابه می‌توان معادله انرژی رابرای کانال i که درمجاورت دوکانال j و k است، به صورت زیرنوشت:

$$\frac{dh_i}{dz}=\frac{q'_i}{m_i}+\frac{w_{ji}}{m_i}(h_j-h_i)+\frac{w'_{ij}}{m_i}(h_j-h_i)+\frac{w'_{ik}}{m_i}(h_k-h_i) \qquad (۳)$$

h معرف انتالپی سیال است. درصورتی که N کانال درمجاورت کانال i ام قرارداشته‌باشد، معادله انرژی به صورت زیردرمی‌آید:

$$m_i\frac{dh_i}{dz}=q'_i+\sum_{j=1}^{N} w'_{ij}(h_j-h_i)-\sum_{j=1}^{N} w_{ij}h^{*} \quad , \quad i=1,2,.....,M \qquad (۴)$$

که درآن q'_i نرخ انتقال حرارت برواحدطول کانال است و h^{*} ازتعریف زیرمحاسبه می‌شود:

$$h^{*}=\begin{cases} 0 & ; \quad \text{if} W_{ij}>0 \\ (h_j-h_i) & ; \quad \text{if} W_{ij}<0 \end{cases} \qquad (۵)$$

حال، معادله ممنتم درامتدادمحورمیله‌های سوخت رابه‌دست می‌آوریم. برای این منظور، باتوجه به دوفازی بودن جریان وبراساس ایده مایر[۴]، ابتدایک حجم مخصوص مؤثر (v') تعریف می‌کنیم:

$$\frac{1}{\rho_{eff}}=v'=\frac{(1-x)^2 v_f}{(1-\alpha)}+\frac{x^2 y_g}{\alpha} \qquad (۶)$$

که درآن x کیفیت و α نسبت حجمی گازها، وزیرنویسهای f و g به‌ترتیب معرف مایع وگاز است. معادله ممنتم به شرح زیراست:

$$-\frac{dp_i}{dz}=\frac{f_i\phi_i}{2g_c\rho_f D_{hi}}(m_i/A_i)^2+\rho_i\cos\theta+\frac{f_T w'_{ij}}{g_c A_i}(u_i-u_j)+\frac{f_T w'_{ik}}{g_c A_i}(u_i-u_k) \qquad (۷)$$

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

$$+\frac{w_{ji}}{A_i g_c}(2u_i - f_D u_j) + \frac{w_{ik} u_i}{g_c A_i}(f_D - 2) + (m_i/A_i)^2 \frac{1}{g_c}\left[\frac{\partial v'_i}{\partial h}\frac{dh_i}{dz} + \frac{\partial v'_i}{\partial p}\frac{dp_i}{dz}\right]$$

دراین رابطه، u معرف سرعت مؤثرمحوری سیال، p فشار، f ضریب اصطکاک مایع خالص درکانال، g_i ضریب تبدیل واحد، A سطح مقطع، v حجم مخصوص، D_h قطرهیدرولیکی، θ زاویه محورکانال باخط قائم و f_D و f_T ضرایب تصحیح غیریکنواختی سرعت به علت جریانهای جانبی واغتشاشات جریان است. همچنین اولین عبارت سمت راست معرف نیروی اصطکاک درجریان دوفازی و ϕ ضریب تصحیح اصطکاک جریان دوفازی است.

درصورتی که N کانال درمجاورت کانال i ام باشد، معادله ممنتم درامتدادمحورمیله‌ها به صورت زیردرمی‌آید:

$$-\left[1+1/g_c(m_i/A_i)^2\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial p}\right]\frac{dp_i}{dz} = 1/g_c(m_i/A_i)^2\left[\frac{f_i\phi_i}{2\rho_f D_{h_i}} + \frac{\partial v'_i}{\partial h}\frac{dh_i}{dz}\right] + \qquad (۸)$$

$$\rho_i \cos\theta + 1/g_c A_i \sum_{j=1}^{N} f_T w'_{ij}(u_i - u_j) + \frac{1}{g_c A_i}\sum_{j=1}^{N} w_{ij} k^* \qquad i=1,2,...,M$$

که درآن

$$k^* = \begin{cases} u_i(f_D - 2) & \text{if } w_{ij} > 0 \\ (f_D u_j - 2u_i) & \text{if } w_{ij} < 0 \end{cases} \qquad (۹)$$

معادله ممنتم درامتدادعمودبرمحورهای میله‌های سوخت راکه معرف تغییرات ممنتم جریانهای عرضی است، می‌توان به صورت زیرنوشت:

$$p_i - p_i = c_{ij} w_{ij} \mid w_{ij} \mid \qquad (۱۰)$$

که درآن c_{ij} ضریب افت است وازرابطهٔ زیربه دست می‌آید:

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

$$c_{ij}=\frac{f.l}{4g_c s_{ij}^3 \rho^*} \qquad (۱۱)$$

دراین رابطه s_{ij} فاصله فضای خالی بین دومیله سوخت و l معادل قطرمیله است و ρ^* دانسیته جریان دوفازی است وبرابردانسیته سیال درکانالی است که سیال ازآن خارج می‌شود. اگرتعداد مرزهای بین کانالهای موجوددرمیدان جریان k باشد،به همین تعدادمعادله به شکل (۱۰) می‌توان نوشت . بنابراین روابط (۲)و(۴)،(۸)و(۱۰) شامل 3M معادله (بقای جرم، ممنتم محوری وانرژی) وk معادله (ممنتم عرضی) است . معادلات فوق بسته نبوده وتعدادآنهاازتعداد مجهولات کمتراست. برای بستن معادلات لازم است روابط دیگری برای ضریب اصطکاک درجریان دوفازی ، مدل کردن جریانهای مغشوش عرضی، روابط بین خواص ترمودینامیکی سیال (جداول بخار)، تعیین کمیت واقعی سیال دوفازی به معادلات فوق اضافه کرد. دراینجابه اختصاربه تشریح این روابط می‌پردازیم .

ابتدامدل به کاررفته درمحاسبه جریان عرضی دراثراغتشاشات رابررسی می‌کنیم. دبی جریانهای عرضی دراثراغتشاشات درحالت کلی مضربی ازدبی جریان محوری به صورت زیراست:

$$w'_{ij}=\frac{1}{2}\beta s_{ij}(m_i/A_i+m_j/A_j) \qquad (۱۲)$$

که درآن β ضریب تناسب وتابعی ازعددرینولدزجریان و مقدارآن مساوی است با:

$$\beta=\frac{4}{s_{ij}}\ \frac{A_i+A_j}{P_{w_i}+P_{w_i}}aRe^b \qquad (۱۳)$$

دررابطه اخیر a و b مقادیرثابت اند وRe عددرینولدزاست وازرابطه زیربه دست می‌آید:

$$Re=\frac{8(m_i+m_j)}{(P_{w_i}+P_{w_j})(\mu_i+\mu_j)} \qquad (۱۴)$$

ضریب اصطکاک جریان تک فازی مایع رامی‌توان ازرابطه

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

$$f_i = aRe_i^b + c \qquad (۱۵)$$

به دست آوردکه درآن $a = 0.05$ ، $b = -0.32$ و $c = 0.0056$ است. ضریب تصحیح اصطکاک درجریان دوفازی (ϕ) رابااستفاده ازمدل آرماند به دست می‌آوریم[۴]:

$$\begin{aligned}
&\phi = 1 && h \le h_f \\
&\phi = \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)^{1.42}} && 0.39 < (1-\alpha) \le 1 \\
&\phi = 0.478\frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)^{2.2}} && 0.1 < (1-\alpha) \le 0.39 \\
&\phi = 1.73\frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)^{1.64}} && 0. < (1-\alpha) \le 0.1
\end{aligned} \qquad (۱۶)$$

درروابط فوق ، α نسبت حجمی گازاست وازرابطه زیربه دست می‌آید:

$$\begin{aligned}
&\alpha = 0 && ; && h < h_f \\
&\alpha = \frac{(0.833+0.167x)xv_g}{(1-x)v_f + xv_g} && ; && h > h_f
\end{aligned} \qquad (۱۷)$$

ضریب کیفیت موضعی درنزدیکی میله‌های سوخت رامی‌توان بااستفاده ازمدل لوی [۴] به دست آورد. برای این کارتغییرات واقعی کیفیت (x') رابرحسب تابعی ازطول محاسبه می‌کنیم. سپس باقراردادن کیفیت واقعی به جای کیفیت ترمودینامیکی (x)، تغییرات حجمی گازرادر طول کانال به دست می‌آوریم. بااستفاده ازمدل لوی داریم:

$$x'(z) = x(z) - x_d(z)\exp\left(\frac{x(z)}{x_d(z)} - 1\right) \qquad (۱۸)$$

که درآن x_d کیفیت درنقطه جداشدن حبابهای بخارازسطح درناحیه جوشش هسته‌ای وبرابراست

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

با:

$$x_d(z)=-\frac{c_{p_f}\Delta T_{sub)_d}}{h_{f_g}} \qquad (۱۹)$$

و C_{p_f} گرمای ویژه مایع اشباع و $\Delta T_{sub)d}$ اختلاف دمای اشباع ودمای سیال درنقطه جداشدن حباب است. $X_d(z)$ و $\Delta T_{sub)d}$ به طورجداگانه محاسبه می‌شوند. $\Delta T_{sub)d}$ رابااستفاده ازموازنه نیروهای واردبریک حباب درنزدیکی میله‌های سوخت وتوزیع دمای سیال تک فازی اطراف دیواره محاسبه می‌کنیم. بافرض اینکه شتاب حباب ونیزنیروی شناوری حباب ناچیزاست، جمع نیروهای درگ وکشش سطحی درحالت تعادل بایدصفربشودوبه این ترتیب فاصله نوک حباب تادیواره (y_B) که متناسب باشعاع حباب است، ازرابطه زیرمحاسبه می‌شود:

$$y_B^+=\frac{y_B u^* \rho_f}{\mu_f}=c\frac{(\sigma D_h \rho_f)^{\frac{1}{2}}}{\mu_f}\left[1+c'\left(\frac{\rho_g(\rho_f-\rho_g)D_h}{\tau_w}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \qquad (۲۰)$$

که درآن $c=0.015$ ، $u^*=\tau_w/\rho_f$ و $\tau_w=f(m/A)^2 v_f/2$ است وبافرض زبری نسبی، $\varepsilon/D_h=10^{-4}$ ازرابطه فنینگ [۴] به دست می‌آید. ازطرفی دمای نوک حباب بااستفاده ازمدل لوی برمبنای فرض مساوی بودن بادمای اشباع مایع وبراساس توزیع سه مرحله‌ای درجه حرارت درجریان مغشوش (مدل مارتینلی)، به صورت زیربیان می‌شود:

$$T_B^+=5 \quad pr_f \quad y_B^+ \qquad 0\le y_B^+\le 5$$

$$T_B^+=5\left[pr_f+1n(1+pr_f(\frac{y_B^+}{5}-1)\right] \qquad 5\le y_B^+\le 30 \qquad (۲۱)$$

$$T_B^+=5\left[pr_f+1n(1+5pr_f)+0.5\ 1n(\frac{y_B^+}{30})\right] \qquad y_B^+>30$$

که درآن T_B^+ دمای بدون بعددرنوک حباب است وازرابطه زیربه دست می‌آید:

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

$$T_B^+ = \frac{c_{p_f} \rho_f u^*}{q''} \Delta T_{Sat)d} \qquad (۲۲)$$

ازطرفی براساس مدل لوی درمحل جداشدن حباب ازسطح داریم:

$$\Delta T_{sub)d} = q'' \left[\frac{1}{h_{f_o}} - \frac{T_B^+}{c_{p_f} \rho_f u^*} \right] \qquad (۲۳)$$

به این ترتیب می‌توان کیفیت واقعی یا x' راباداشتن $\Delta T_{sub)d}$ که ازرابطه فوق به دست می‌آید، حساب کرد.

اطلاعات وشرایط مرزی

اطلاعات موردنیازجهت حل معادلات عبارتنداز: هندسه مسئله شامل ابعادوآرایش میله‌های سوخت، سطح مقطع کانالها، تغییرات طولی ومحیطی فلاکس حرارتی میله‌های سوخت، ثابتهای ترموهیدرولیکی به کاررفته درروابط تجربی، خواص ترمودینامیکی آب اشباع شامل h_g ، h_f ، v_g ، v_f ، ویسکوزیته μ_f ، فشار و دمای آب، انتالپی متوسط ورودی به هرکانال، دبی جرمی ورودی به هرکانال، جریان عرضی انحرافی ورودی وفشارخروجی ازانتهای کانالها.

مجهولات به دست آمده پس ازحل معادلات عبارت‌انداز: فشار $P(z)$، انتالپی سیال h_i ، کیفیت $x_i(z)$ ، شدت دبی جرمی $G_i(z)$ ، دبی جرمی $m_i(z)$ وفلاکس حرارتی وارده q_i/ρ_{hi} درهرکانال. علاوه‌براین، جریانهای عرضی انحرافی واغتشاشات بین هردوکانال مجاورنیزبه دست می‌آید.

روش حل عددی

روابط پیوستگی (۲) انرژی (۴) وممنتم محوری (۸) تشکیل 3M معادله دیفرانسیل مرتبه اول خطی می‌دهند. رابطهٔ (۱۰) معرف k معادله جبری است. این معادلات همراه باروابط تجربی مذکوردرقسمت قبل حل می‌شوند. معادلات بقاازنوع مقداراولیه است ومی‌توان آنهارابه کمک روش قدم به قدم حل کرد [۵]. انتالپی ورودی، فشارخروجی، افت فشارورودی، دبی جرمی ورودی وجریان عرضی انحرافی درورودبه کانالها، اطلاعات اولیه هستند. هربارمعادلات

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

دیفرانسیل راباستفاده ازروش توسعه یافته اویلر درفاصله Δz حل می‌کنیم. رابطه (۱۰) شامل k معادله جبری است که بایدبه طورهمزمان حل شوند. این معادلات بااستفاده ازروش گووس - جردن حل می‌شوند. درحل عددی قدمهای زیربرداشته می‌شود:

۱- طول کانال به فواصل مساوی Δz تقسیم می‌شود.

۲- درمقطع $z=0$، مقادیردبی جرمی هرکانال m_i، انتالپی هرکانال h_i وجریان عرضی انحرافی بین کانالهای مجاور w_{ij} معلوم است. همچنین باتوجه به اینکه افت فشاردرطول میله‌ها ناچیزاست، خواص ترمودینامیکی سیال درهرمرحله رابرمبنای فشارخروجی حساب می‌کنیم. برای این کارباستفاده ازجداول خواص آب وبخارو‌داشتن فشاروانتالپی درمقطع z، خواص ترمودینامیکی زیررابه دست می‌آوریم:

$$v_i\ ,\ T_i\ ,\rho_i\ ,\alpha_i\ ,\mu_{f_i}\ ,\ x_i\ ,\ \partial v_i/\partial p)_h\ ,\ \partial v_i/\partial h)_p\ ,\ \phi'_i\ ,\ u_i$$

۳- باداشتن $m_i(z)$ و $\rho_i(z)$مقادیر $w'_{ij}(z)$ و $c_{ij}(z)$ازروابط (۱۱) و(۱۲) به دست می‌آید.

۴- ازرابطه (۲)، dm_i محاسبه می‌شود.

۵- ازرابطه (۴)، $(dh_i/dz)(z)$ به دست می‌آید.

۶- بااستفاده ازمعادله ممنتم محوری (۸)، $(dp/dz)(z)$ به دست می‌آید.

۷- بااستفاده ازروش توسعه یافته اویلروازطریق سعی وخطامقادیر $m_i(z+\Delta z)$، $h_i(z+\Delta z)$ و $p_i(z+\Delta z)$ به دست می‌آید. به این ترتیب که ابتداباحدس زدن مقادیرمشتق سه پارامترفوق در $(z+\Delta z)$، این پارامترهارامحاسبه وسپس مطابق بند ۸ درزیرآنهاراصلاح می‌کنیم.

۸- خواص سیال رامطابق بند۲ در$z+\Delta z$ حساب می‌کنیم وبااستفاده ازنتایج حاصل، $w'_{ij}(z+\Delta z)$ و $C_{ij}(z+\Delta z)$ رامطابق بند ۳ و $(\partial h_i/\partial z)(z+\Delta z)$ رامطابق بند ۵ به دست می‌آوریم. وبالاخره مطابق بند ۶،بدون احتساب جریانهای عرضی انحرافی $(\partial p/\partial z)(z+\Delta z)$ را حساب می‌کنیم. سپس بااستفاده ازمعادلات (۱۰) جریانهای عرضی انحرافی رابه دست می‌آوریم. معادلات (۱۰) غیرخطی بوده وآنهارابه صورت خطی حل می‌کنیم؛ به این ترتیب که هربارمقادیر $|w_{ij}|$ رابا استفاده ازمقادیرقبلی دانسته فرض می‌کنیم. حال $(dm_i/dz)(z+\Delta z)$ راازرابطه (۲) ومقدارجدید $(dh_i/dz)(z+\Delta z)$ راازرابطه (۴) به دست می‌آوریم.

ازروش توسعه یافته اویلر، مقادیرجدید $h_i(z+\Delta z)$ و $m_i(z+\Delta z)$ محاسبه می‌شود. درصورتی که اختلاف مقادیر $h_i(z+\Delta z)$ ونیز $m_i(z+\Delta z)$ دردومرحله آخرازحدموردنظربیشتر بود، بند ۸ راتکرارمی‌کنیم. درنهایت بااستفاده ازمعادله (۱۴)، $(\partial p_i/\partial z)(z+\Delta z)$ رابه دست

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

می‌آوریم وازآنجا $p_i(z+\Delta z)$ رامحاسبه می‌نماییم.

۱۰- مقادیرحاصل ازبندهای فوق راکه درمقطع $(z+\Delta z)$ به دست آمده است، به عنوان شرط اولیه برای محاسبات بعدی درنظرمی‌گیریم وبندهای ۷ به بعدراتکرارمی‌نماییم تاباافزایش z به انتهای طول کانالهابرسیم. روندنمای برنامه کامپیوتری درضمیمه ارائه شده است.

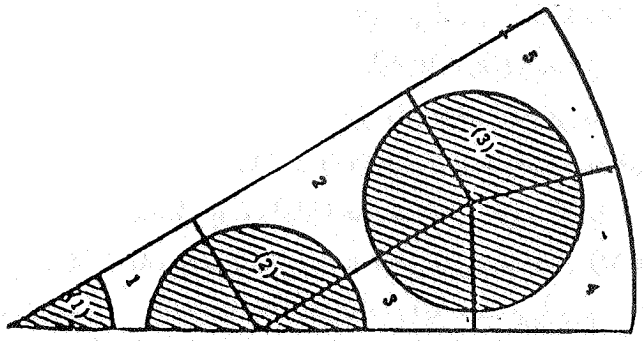
نتایج عددی

حال به نتایج حاصل ازبررسی یک مسئله به عنوان نمونه پرداخته می‌شود. دراین مسئله یک مجموعه ۱۹ میله‌ای سوخت درنظرگرفته می‌شود. به علت تقارن، $\frac{1}{12}$ این مجموعه موردبررسی قرارمی‌گیرد. شکل ۵ نشان دهنده $\frac{1}{12}$ مقطع قلب راکتوراست. دراین شکل، مقطع سه میله سوخت، پنج کانال جریان وپنج مرزمشترک بین کانالهانشان داده شده است. اطلاعات ورودی مسئله به شرح زیرانتخاب شده اند:

۱- ابعادهندسی شامل طول کانال 60 in، قطرمیله‌ها 0.563 in، فضای خالی بین میله‌ها 0.08 in وفاصله میله مجاوردیواره تادیواره 0.08 in.

۲- شرایط کارکردشامل فلاکس حرارتی 0.4×10^6 Btu/hr. ft^2، شدت دبی جرمی متوسط 1×10^6 lbm/hr ft^2، فشارسیستم 1000 psi وانتالپی ورودی 400 Btu/lbm.

۳- مقادیرثابت شامل پارامتراختلاط $\beta=0.04$، مقاومت جریان فرضی انحرافی، $f_1=0.001$ ft،



شکل ۵- $\frac{1}{12}$ مقطع قلب راکتور

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

ضریب تصحیح ممنتم جریان عرضی $f_D=1.00$، وضریب تصحیح ممنتم جریان عرضی اغتشاشات $f_t=1.00$.

برای سادگی، توزیع فلوی حرارتی محوری میله‌ها رایکنواخت وتوزیع قدرت حرارتی نسبی میله هارایکسان فرض می‌کنیم. برای مقایسه اثرمدلهای مختلف توصیه شده دراین مقاله، مسئله درچهارحالت مختلف حل ونتایج حاصل بایکدیگرمقایسه شده‌است. فرضیات مترتب به هریک ازچهارحالت مذکوردرزیرآورده شده است.

حالت اول - دراین حالت باتوجه به سه فرض زیربرنامه کامپیوتری اجراشده است :

۱- ازانتقال حرارت تحت اشباع صرف نظرشده است.

۲- برای تعیین ضرایب α و ϕ ازمدل آرمانداستفاده شده‌است.

۳- ضریب اصطکاک تک فازی برای کلیه کانالهایکسان فرض شده‌است واثردمای دیواره در محاسبات منظورنشده است .

حالت دوم - انتقال حرارت تحت اشباع بااستفاده ازمدل لوی درمحاسبات منظورشده است - سایرفرضیات حالت اول به قوت خودباقی است.

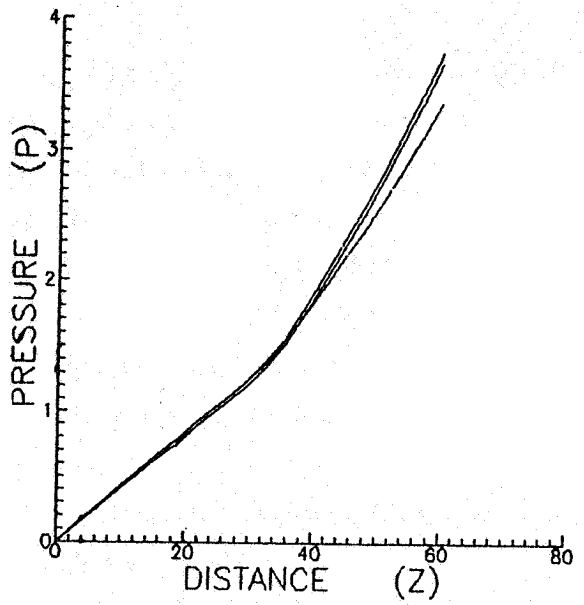
حالت سوم - ازمدل دوفازی همگن برای محاسبه α و ϕ استفاده شده است - سایرفرضیات حالت اول به قوت خودباقی است.

حالت چهارم - هیچیک ازفرضیات حالت اول اعمال نشده است. به عبارت دیگرانتقال حرارت تحت اشباع بااستفاده ازمدل لوی درمحاسبات منظورشده است. ازمدل دوفازی همگن برای محاسبه α و ϕ استفاده گردیده است وضریب اصطکاک تک فازی برحسب شکل کانال به طورجداگانه حساب شده است.

دراینجانتایج حاصل ازاجرای چهارحالت فوق رادرموردسه پارامترافت فشاردرطول کانال به بحث می‌گذاریم. شکل ۶ افت فشاردرطول کانال شماره ۱ رابرای چهارحالت نشان می‌دهد. باتوجه به اینکه سیال درابتدای کانال تک فازی است، چهارحالت فوق درz های کوچک نتایج مشابهی رابه دست می‌دهد. باافزایش z ، تولیدبخاردرجریان زیادشده واختلافات ظاهرمی‌گردد. درجدول ۱ افت فشارهای کلی درکانال ۱ درچهارحالت مقایسه شده ودرصداختلاف نسبت به حالت چهارم که کاملترین حالت است، نشان داده شده است. بامقایسه درصدخطای حالات ۱ و ۳ می توان نتیجه گرفت که مدل دوفازی برای محاسبه α و ϕ، خطای افت فشاررابه مقدارقابل توجهی کاهش می دهد. به طورکلی مدلهای سه گانه استفاده شده جمعاً" می‌تواندبیش از ۱۱

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

درصدازخطای محاسبات بکاهد.



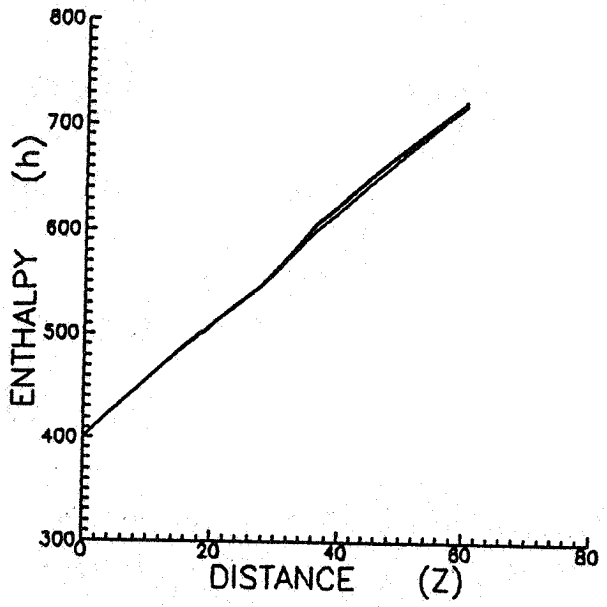
شکل ۶- افت فشاردرطول کانال شماره ۱

جدول ۱- افت فشارکل درکانال ۱ درچهارحالت مختلف ومقایسه آنها

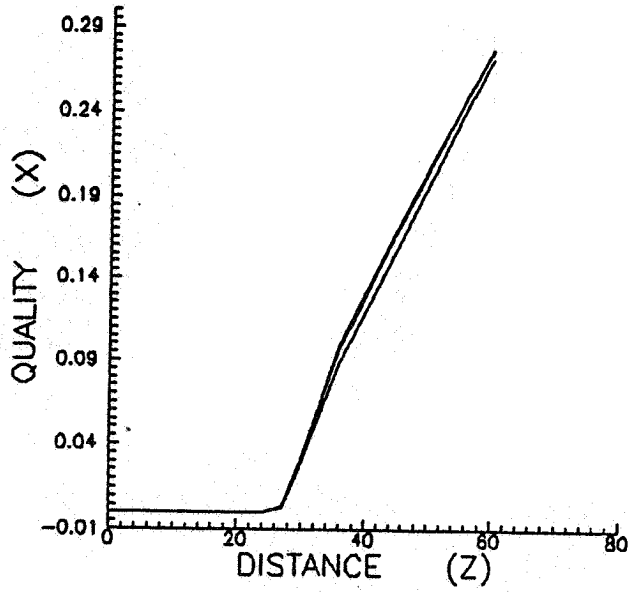
حالت	اختلاف فشارکل درکانال۱	درصد اختلاف
۱	۳/۲۵۸	۱۱/۱
۲	۳/۳۷۰	۷/۹
۳	۳/۷۴۴	۲
۴	۳/۶۶۶	۰

شکل ۷ تغییرات انتالپی سیال وشکل ۸ تغییرات کیفیت سیال درطول کانال ۱ رابرای چهارحالت مختلف نمایش می‌دهد. همان طوری که مشخص است، انتالپی درطول کانال تقریباً به طورخطی افزایش می‌یابد. علت این امرآن است که فلوی حرارتی درطول میله‌هارا خطی فرض کرده‌ایم (حالت

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]



شکل ۷- تغییرات انتالپی درطول کانال ۱



شکل ۸- تغییرات کیفیت درطول کانال ۱

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

واقعی فلوی حرارتی شکلی شبیه سهمی دارد). مجدداً متذکرمی‌شویم که اختلاف نتایج درچهارحالت عمدتاً درz های بزرگ یعنی وقتی جریان دوفازی می‌شود، نمایان می‌گردد. اطلاعات بیشترازنتایج حاصل ازحل حالات فوق درمرجع [۶] آورده شده است.

نتیجه گیری

دراین مقاله، جریان سیال درقلب یک راکتورهسته‌ای ازطریق حل عددی معادلات جریان وبه کمک کامپیوترشبیه سازی شده است. باتوجه به اینکه جریان درقلب راکتوردوفازی ومغشوش است، حل آن ازطریق مدل کردن پروسه های انتقال حرارت دوفازی، اصطکاک بین سیال دوفازی ودیواره‌هاوجریانهای عرضی انجام پذیرفته است. دراین مقاله مقطع جریان به بخشهایی تقسیم وهربخش به صورت یکنواخت درنظرگرفته شده است. این فرض سبب می‌شود که معادلات بسیارساده شده وشبیه جریان یک بعدی حل شوند. البته جریانهای عرضی ناشی ازاختلاف فشاربین هرکانال وزوایدموجوددرمسیرونیزجریانهای ناشی ازاغتشاشات به طورجداگانه مدل شده واثرات آنهادرحل مسئله منظورشده است.

جوابهای حاصل ازحل مسئله معقول است، زیراکلیه پارامترهای مهم درجریان سیال ازقبیل جریانهای عرضی، اثرات دوفازی بودن جریان درضریب اصطکاک، خواص سیال وانتقال حرارت درحل مسئله منظورشده است ونتایج حاصل رامی‌توان به عنوان تقریبی مناسب برای طراحی اولیه قلب راکتوربه کاربرد. قدم بعدی برای بهبودبخشیدن به روش فوق حذف مدلهای استفاده شده درجریانهای عرضی واستفاده ازمعادلات کامل ممنتم درجهت عرضی است. البته این تغییرموجب پیچیدگی شدیدمسئله شده ونیازبه حل سیستم معادلات پاره‌ای غیرخطی دارد. پیشنهاددیگربرای بهبودروش ارائه شده، کاربرروی مدلهای ارائه شده وتکمیل این مدلهاست.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]

مراجع

1. Row, D. S., "Cross-Flow Mixing Between Parallel Flow Channels During Boiling (COBRA-I)", *Battel Memorial Institute*, 1976.

2. Row, D. S., "A Digital Computer Program for Thermal - Hydraulic Subchannels Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements (COBRA - II)", 1970.

3. Lamarsh, John R., *Introduction to Nuclear Engineering*, McGraw -HillBook Co., New York, 1974.

4. Coller, John G., *Convective Boiling and Condensation*, McGraw-Hill Book Co., London, 1972.

5. Ferziger, Joel H., *Numerical Methods for Engineering Application*, John Wiley & Sons,, New York, 1981.

۶- اصغراسماعیلی ، شبیه سازی کامپیوتری پروسه‌های انتقال درقلب یک راکتورهسته‌ای، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۶۷.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1371.11.1.4.6]