

## شبیه‌سازی عددی پروسه‌های انتقال در قلب رآکتورهای هسته‌ای

ابراهیم شیرانی\* - اصغر اسماعیلی\*\*

### چکیده

هدف از این مقاله ارائه روش و تدوین یک برنامه کامپیوتری است که پروسه‌های انتقال (جرم، ممتنم و انرژی) را در قلب یک رآکتور هسته‌ای که با سوخت میله‌ای کار می‌کند، شبیه‌سازی نماید. برای تحلیل جریان پیچیده مغشوش و دوفازی در قلب رآکتور، ابتدا آن را به کانالهایی که توسط میله‌های سوخت محصور شده اند تقسیم کرده، سپس یک مدل ریاضی از هندسه مسئله را معرفی می‌کنیم. آنگاه معادلات حاکم بر جریان را با استفاده از فرضیاتی نظیر دایم، یکنواخت و همگن بودن سیال در هر مقطع و نیز مدل‌هایی برای ضریب انتقال حرارت و هداسطکاکسی در جریان دوفازی مغشوش ساده کرده و نهایتاً از روش توسعه یافته اویلر و روش قدم به قدم به طریق عددی حل می‌کنیم.

بر مبنای معادلات جریان، فرضیات ساده‌کننده، مدل‌های معرفی شده و روش عددی مذکور برنامه‌ای کامپیوتری تدوین شده است. این برنامه قادر است جریان یک فازی و دوفازی را مورد تحلیل قرار دهد و برای یک هندسه مشخص اعمال شده و نتایج قابل قبولی به دست دهد.

### مقدمه

استفاده از انرژی هسته‌ای به علت قابلیت بالای آزادسازی انرژی در واکنش هسته‌ای و نیز محدودیت منابع سوخت فسیلی از اهمیت زیادی برخوردار است. انرژی حاصل از شکافت یک پوند اورانیوم معادل سوختن ۱۲۵۰ تن ذغال سنگ است. نوع متداول رآکتورهای هسته‌ای که در این جانیز مورد نظر است، رآکتور با سوخت میله‌ای است. میله‌های باریک و بلند سوخت در محفظه‌ای به نام قلب رآکتور قرار دارند و در اثر شکافت، انرژی زیادی از خود آزاد می‌کنند. این انرژی به وسیله جریان سیال خنک‌کننده که با میله‌های سوخت در تماس است، دریافت و منتقل

\* دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی اصفهان

\*\* فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی اصفهان

می‌شود. درحین حرکت سیال درامتداد میله‌های سوخت، جوشش موضعی سیال صورت می‌گیرد. ازطرفی برای افزایش انتقال حرارت و کاهش دمای میله‌های سوخت، حرکت سیال صرفاً درامتداد این میله‌ها نبوده بلکه باقراردادن زائده‌هایی برسر راه آن حرکت‌های جانبی مصنوعی به سیال وارد می‌شود.

باتوجه به جریان مغشوش در مسیرهای پیچیده بین میله‌ها و دوفازی بودن جریان، بررسی و تحلیل چنین جریانی بسیار پیچیده خواهد بود. ازطرفی از نظر طراحی و کنترل، نیاز فوری به در دست داشتن اطلاعات صحیح از خصوصیات جریان و پارامترهای مختلف ترمو هیدرولیکی در طول مسیر جریان وجود دارد. حل این مسئله معمولاً از دو طریق تحلیلی و تجربی صورت می‌گیرد که در این جا روش تحلیلی با استفاده از حل عددی معادلات مدل شده جریان مدنظر است. برای حل مسئله از این روش، معادلات ساده شده حاکم بر جریان سیال شامل معادلات بقای جرم، ممنتوم و انرژی حل می‌شوند. مقاله حاضر بر مبنای ایده‌های موجود در کدهای کامپیوتری کبرای I و II (به ترتیب در مراجع [۱] و [۲]) تدوین شده است. البته استفاده مستقیم از کدهای موجود به علت کمبود اطلاعات امکان پذیر نبوده و لذا بررسی حاضر بر مبنای اطلاعات موجود و تئوری حاکم بر کدها صورت گرفته است. ولی جزئیات برنامه کامپیوتری و روش محاسبات متفاوت است. کد توسعه یافته در این مقاله برخی از محدودیت‌های موجود در کدهای کبرا را ندارد و کلی‌تر از این دو کد است.

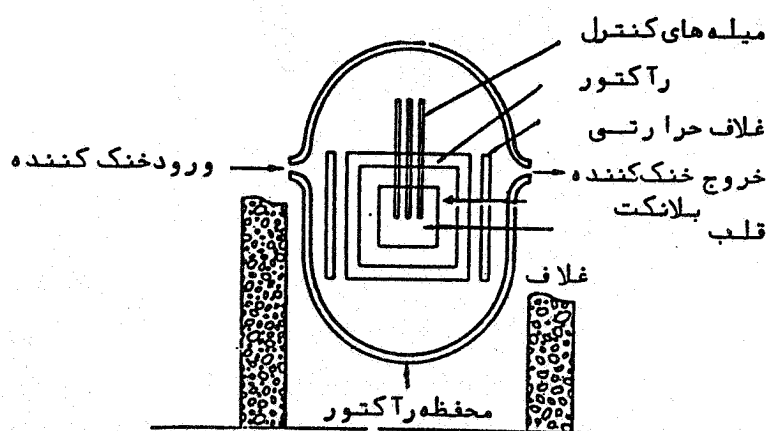
### راکتورهای هسته‌ای

اساس راکتورهای هسته‌ای بر مبنای برخورد نوترون به هسته‌های عناصر سنگین نظیر اورانیوم  $^{235}\text{U}$  یا پلوتونیوم  $^{239}\text{Pu}$  است که سبب تشکیل هسته جدیدی می‌گردد. پس از دریافت نوترون، هسته حاصل در حالت تحریک شده بالایی قرار گرفته و بسیار نا پایدار می‌شود؛ لذا این هسته به هسته‌های کوچکتری تقسیم می‌گردد. در اثر این تقسیم انرژی زیادی آزاد می‌شود. تقسیم هسته بزرگ به هسته‌های کوچک با آزادسازی تعدادی نوترون نیز همراه است که خود سبب تداوم این تحولات خواهد شد. مثلاً اورانیوم  $^{235}\text{U}$  در اثر دریافت یک نوترون تبدیل به گزنون ( $^{140}\text{Xe}$ )، استرانسیوم ( $^{94}\text{Sr}$ ) و آزادی دو نوترون می‌شود [۳].

انرژی حرارتی آزاد شده در قلب راکتور را به وسایل مختلف مثل باطری هسته‌ای، ترموالکتریسیته یا ترمیونیک و یا توربین بخار و ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. در این

جامع‌مؤثرترین روش مورد بحث قرار می‌گیرد.

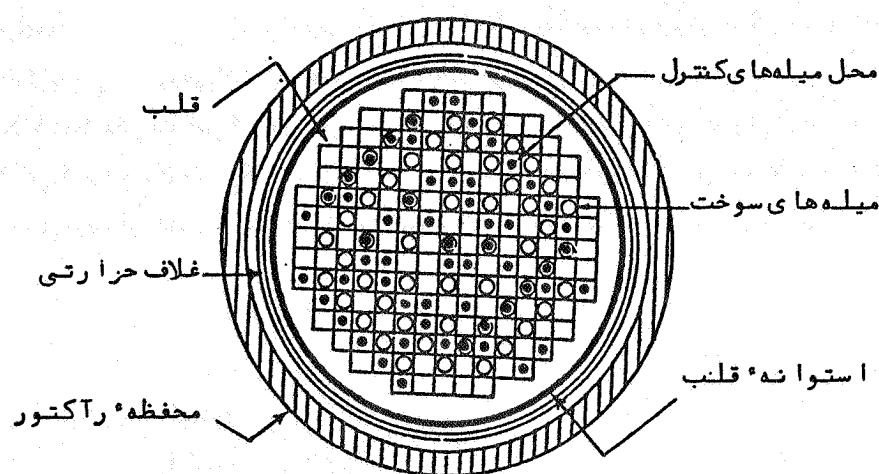
توان حرارتی آزاد شده در قلب رآکتور می‌تواند بیش از ۳ میلیون وات و دبی سیال خنک‌کننده بیش از ۱۰۰ گالون بر دقیقه باشد. شکل ۱ شماتیک یک رآکتور هسته‌ای را نشان می‌دهد. سیال خنک‌کننده می‌تواند آب، آب سنگین و یا گازهای با ظرفیت حرارتی بالا مثل هلیوم باشد. در شکل مذکور میله‌های کنترل و بلانکت نشان داده شده است. نقش میله‌های کنترل جذب نوترون است. میله‌های کنترل قابل تنظیم بوده و در موقع لزوم وارد قلب رآکتور شده و نوترون‌های موجود در فضا را به خود جذب می‌کنند. این عمل سبب کاهش انرژی حرارتی تولیدی یا قطع آن می‌شود. بلانکت‌ها نقش منعکس‌کننده را بر عهده داشته و از فرار نوترون‌ها از قلب رآکتور جلوگیری می‌کنند. شکل ۲، ساختمان قلب یک رآکتور را نمایش می‌دهد که در آن نحوه قرار گرفتن میله‌های سوخت و محل میله‌های کنترل نمایش داده شده است. سیال خنک‌کننده از لایه‌های میله‌ها عبور می‌کند.



شکل ۱- اجزای اصلی یک رآکتور هسته‌ای به همراه غلاف حرارتی

سیال خنک‌کننده باید دارای ضریب انتقال حرارت هدایتی بالا، ظرفیت حجمی زیاد،

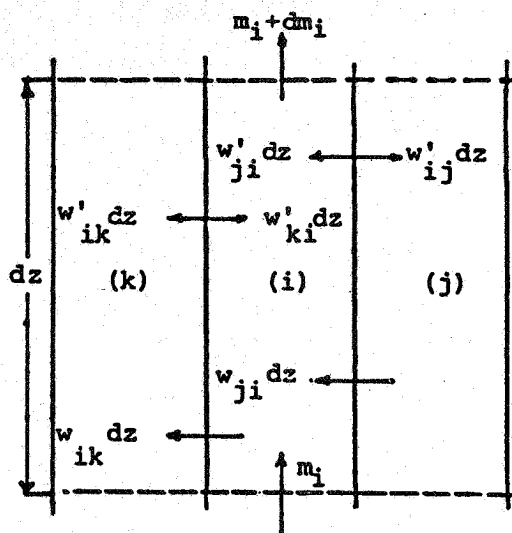
خاصیت کندکردن نوترونها برای افزایش احتمال برخورد آنها به هسته‌های سوخت، پایین بودن فشار بخار اشباع دردمای قلب راکتور، حداقل خوردگی و تمایل به واکنش شیمیایی با محیط اطراف، پایداری و مقاومت در برابر تجزیه شدن دردمای کار راکتور باشد.



شکل ۲- سطح مقطع افقی راکتور

#### توصیف کانالهای جریان

نحوه آرایش میله‌های سوخت، غیر یکنواخت بودن انتقال حرارت به سیال در نقاط مختلف مقطع عبور جریان و وجود حرکت‌های جانبی سیال، سبب پیچیدگی‌های جریان در طول میله‌های سوخت می‌شود. شکل ۳ مسیر حرکت سیال را در کانال‌های بین میله‌های سوخت نمایش می‌دهد. حرکت کلی سیال از پایین به بالاست و حرکت‌های جنبی سیال به صورت فلش‌های افقی نمایش داده شده است. این حرکات در اثر مغشوش بودن جریان ( $W'$ ) و نیز جذب غیر یکنواخت حرارت و افت فشار غیر یکسان ( $W$ ) در مسیرهای مختلف ایجاد می‌شود. همچنین حرکت‌های جنبی سیال ( $W$ ) می‌تواند در اثر وجود وسایل مکانیکی از قبیل مخلوط‌کننده‌های مارپیچی که بر سر راه جریان قرار دارند، به وجود آید.



شکل ۳- نمایش کانالهای جریان

برای سادگی در تحلیل مسئله، میدان جریان رامی توان به نواحی مختلفی تقسیم کرد. به این ناحیه‌ها که توسط میله‌های سوخت محصور شده‌اند، کانال جریان می‌گوییم. در شکل مذکور دو کانال  $i$  و  $j$  نمایش داده شده است. دبی عبوری از کانال  $i$ ،  $m_i$  و از کانال  $j$ ،  $m_j$  است. همچنین دبی در اثر حرکت جانبی سیال در بین کانالها با  $w$  (برای جریانهای عرضی انحرافی) و  $w'$  (برای جریانهای عرضی در اثر اغتشاشات جریان) نمایش داده می‌شود. اختلاط سیال بین کانالها تأثیر مهمی در انتقال ممتهم و انرژی دارد. انتخاب کانالهای جریان به صورتی که در بالا تشریح شد برای تحلیل جریان در یک مجموعه چندین میله‌ای انتخاب مناسبی است، زیرا نحوه قرار گرفتن میله‌ها طوری است که معمولاً باعث تشکیل کانالهای تقریباً مجزا می‌شود. البته بین کانالها، انتقال جرم، ممتهم و انرژی صورت می‌گیرد. در تحلیل مسئله مهمترین فرضیات عبارت‌اند از: جریان دوفازی سیال، دایم و لغزشی بودن جریان در هر کانال و یکنواخت بودن آن در هر مقطع از هر کانال.

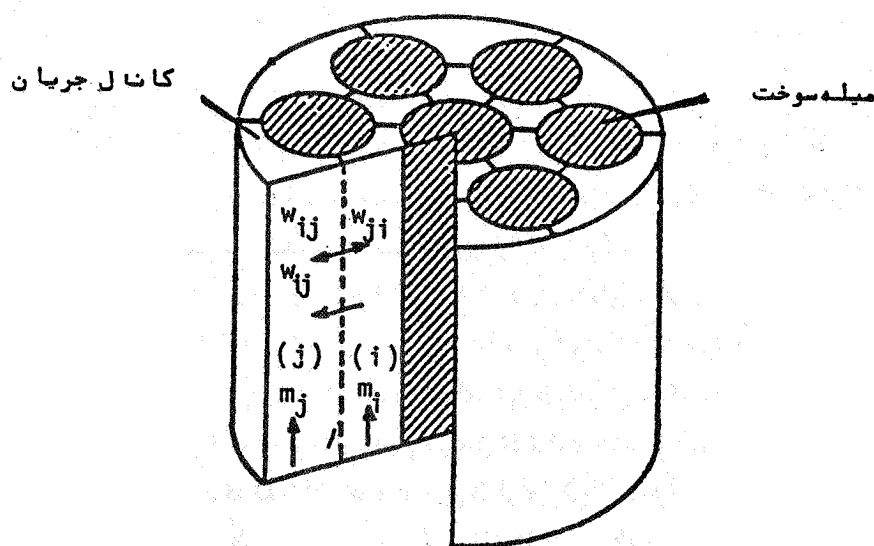
## معادلات حاکم

در شکل ۴، مقطعی از کانال  $i$  به طول  $dz$  همراه بادو کانال مجاور  $j$  و  $k$  نشان داده شده است. معادله پیوستگی برای کانال  $i$  به صورت زیر است:

$$\frac{dm_i}{dz} = w_{ji} - w_{ik} \rightarrow \frac{dm_i}{dz} = -(w_{ij} + w_{ik}) \quad (1)$$

این رابطه باتوجه به کوچک بودن اشل زمانی اغتشاشات جریان، و در نتیجه برقراری روابط  $w'_{ji} = w'_{ij}$  و  $w'_{ik} = w'_{ki}$  به دست آمده است. در صورتی که کانال  $i$  با  $N$  کانال مجاور باشد، داریم:

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



شکل ۴- تبادل جرم کانال  $i$  با کانالهای مجاور

که در آن  $M$  تعداد کل کانال‌ها در میدان جریان است. به روشی مشابه می‌توان معادله انرژی را برای کانال  $i$  که در مجاورت دو کانال  $j$  و  $k$  است، به صورت زیر نوشت:

$$\frac{dh_i}{dz} = \frac{q'_i}{m_i} + \frac{w'_{ji}}{m_i} (h_j - h_i) + \frac{w'_{ik}}{m_i} (h_k - h_i) \quad (3)$$

$h$  معرف انتالپی سیال است. در صورتی که  $N$  کانال در مجاورت کانال  $i$  قرار داشته باشد، معادله انرژی به صورت زیر درمی‌آید:

$$m_i \frac{dh_i}{dz} = q'_i + \sum_{j=1}^N w'_{ij} (h_j - h_i) - \sum_{j=1}^N w_{ij} h^* \quad , \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

که در آن  $q'_i$  نرخ انتقال حرارت بر واحد طول کانال است و  $h^*$  از تعریف زیر محاسبه می‌شود:

$$h^* = \begin{cases} 0 & ; \text{ if } W_{ij} > 0 \\ (h_j - h_i) & ; \text{ if } W_{ij} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

حال، معادله ممتنم در امتداد محور میله‌های سوخت را به دست می‌آوریم. برای این منظور، با توجه به دوفازی بودن جریان و براساس ایده مایر [۴]، ابتدا یک حجم مخصوص مؤثر ( $v'$ ) تعریف می‌کنیم:

$$\frac{1}{\rho_{eff}} = v' = \frac{(1-x)^2 v_f}{(1-\alpha)} + \frac{x^2 v_g}{\alpha} \quad (6)$$

که در آن  $x$  کیفیت و  $\alpha$  نسبت حجمی گازها، و زیرنویسهای  $f$  و  $g$  به ترتیب معرف مایع و گاز است. معادله ممتنم به شرح زیر است:

$$-\frac{dp_i}{dz} = \frac{f_i \phi_i}{2g_c \rho_f D_{hi}} (m_i / A_i)^2 + \rho_i \cos \theta + \frac{f_T w'_{ij}}{g_c A_i} (u_i - u_j) + \frac{f_T w'_{ik}}{g_c A_i} (u_i - u_k) \quad (7)$$

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

در این رابطه،  $u$  معرف سرعت مؤثر محوری سیال،  $p$  فشار،  $f$  ضریب اصطکاک مایع خالص در کانال،  $g_c$  ضریب تبدیل واحد،  $A$  سطح مقطع،  $v$  حجم مخصوص،  $D_h$  قطر هیدرولیکی،  $\theta$  زاویه محور کانال با خط قائم و  $f_D$  و  $f_T$  ضرایب تصحیح غیریکنواختی سرعت به علت جریانهای جانبی و اغتشاشات جریان است. همچنین اولین عبارت سمت راست معرف نیروی اصطکاک در جریان دوفازی و  $\phi$  ضریب تصحیح اصطکاک جریان دوفازی است.

در صورتی که  $N$  کانال در مجاورت کانال  $i$  ام باشد، معادله ممتنم در امتداد محور میله‌ها به صورت زیر درمی‌آید:

$$- \left[ 1 + \frac{1}{g_c} \left( \frac{m_i}{A_i} \right)^2 \frac{\partial v'_i}{\partial p} \right] \frac{dp_i}{dz} = \frac{1}{g_c} \left( \frac{m_i}{A_i} \right)^2 \left[ \frac{f_i \phi_i}{2 \rho_f D_{h_i}} + \frac{\partial v'_i}{\partial h} \frac{dh_i}{dz} \right] + \quad (8)$$

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

که در آن

$$k^* = \begin{cases} u_i (f_D - 2) & \text{if } w_{ij} > 0 \\ (f_D u_j - 2u_i) & \text{if } w_{ij} < 0 \end{cases} \quad (9)$$

معادله ممتنم در امتداد عمود بر محورهای میله‌های سوخت را که معرف تغییرات ممتنم جریانهای عرضی است، می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$p_i - p_j = c_{ij} w_{ij} |w_{ij}| \quad (10)$$

که در آن  $c_{ij}$  ضریب افت است و از رابطه زیر به دست می‌آید:



$$c_{ij} = \frac{f.l}{4gcs_{ij}^3 \rho^*} \quad (11)$$

در این رابطه  $s_{ij}$  فاصله فضای خالی بین دو میله سوخت و  $l$  معادل قطر میله است و  $\rho^*$  دانسیته جریان دوفازی است و برابر دانسیته سیال درکانالی است که سیال از آن خارج می‌شود. اگر تعداد مرزهای بین کانالهای موجود در میدان جریان  $k$  باشد، به همین تعداد معادله به شکل (۱۰) می‌توان نوشت. بنابراین روابط (۲) و (۴)، (۸) و (۱۰) شامل  $3M$  معادله (بقای جرم، ممتم محوری و انرژی) و  $k$  معادله (ممتم عرضی) است. معادلات فوق بسته نبوده و تعداد آنها از تعداد مجهولات کمتر است. برای بستن معادلات لازم است روابط دیگری برای ضریب اصطکاک در جریان دوفازی، مدل کردن جریانهای مغشوش عرضی، روابط بین خواص ترمودینامیکی سیال (جداول بخار)، تعیین کمیت واقعی سیال دوفازی به معادلات فوق اضافه کرد. در اینجا به اختصار به تشریح این روابط می‌پردازیم.

ابتدا مدل به کاررفته در محاسبه جریان عرضی در اثر اغتشاشات را بررسی می‌کنیم. دبی جریانهای عرضی در اثر اغتشاشات در حالت کلی مضربی از دبی جریان محوری به صورت زیر است:

$$w'_{ij} = \frac{1}{2} \beta s_{ij} (m_i/A_i + m_j/A_j) \quad (12)$$

که در آن  $\beta$  ضریب تناسب و تابعی از عدد رینولدز جریان و مقدار آن مساوی است با:

$$\beta = \frac{4}{s_{ij}} \frac{A_1 + A_2}{P_{w_1} + P_{w_2}} a Re^b \quad (13)$$

در رابطه اخیر  $a$  و  $b$  مقادیر ثابت اند و  $Re$  عدد رینولدز است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Re = \frac{8(m_1 + m_2)}{(P_{w_1} + P_{w_2})(\mu_1 + \mu_2)} \quad (14)$$

ضریب اصطکاک جریان تک فازی مایع رامی‌توان از رابطه

استقلال

$$f_i = aRe_i^b + c \quad (15)$$

به دست آورده که در آن  $a = 0.05$ ،  $b = -0.32$  و  $c = 0.0056$  است. ضریب تصحیح اصطکاک در جریان دوفازی ( $\phi$ ) را با استفاده از مدل آرماند به دست می آوریم [۴]:

$$\begin{aligned} \phi = 1 & & h \leq h_f \\ \phi = \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)^{1.42}} & & 0.39 < (1-\alpha) \leq 1 \\ \phi = 0.478 \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)^{2.2}} & & 0.1 < (1-\alpha) \leq 0.39 \\ \phi = 1.73 \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)^{1.64}} & & 0 < (1-\alpha) \leq 0.1 \end{aligned} \quad (16)$$

در روابط فوق،  $\alpha$  نسبت حجمی گاز است و از رابطه زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} \alpha = 0 & & ; & & h < h_f \\ \alpha = \frac{(0.833 + 0.167x)xv_g}{(1-x)v_f + xv_g} & & ; & & h > h_f \end{aligned} \quad (17)$$

ضریب کیفیت موضعی در نزدیکی میله های سوخت رامی توان با استفاده از مدل لوی [۴] به دست آورد. برای این کار تغییرات واقعی کیفیت ( $x'$ ) را بر حسب تابعی از طول محاسبه می کنیم. سپس با قراردادن کیفیت واقعی به جای کیفیت ترمودینامیکی ( $x$ )، تغییرات حجمی گاز را در طول کانال به دست می آوریم. با استفاده از مدل لوی داریم:

$$x'(z) = x(z) - x_d(z) \exp\left(\frac{x(z)}{x_d(z)} - 1\right) \quad (18)$$

که در آن  $x_d$  کیفیت در نقطه جدا شدن حبابهای بخار از سطح در ناحیه جوش هسته ای و برابر است

با:

$$x_d(z) = - \frac{c p_f \Delta T_{sub} d}{h_{fg}} \quad (19)$$

و  $c p_f$  گرمای ویژه مایع اشباع و  $\Delta T_{sub} d$  اختلاف دمای اشباع و دمای سیال در نقطه جدا شدن حباب است.  $x_d(z)$  و  $\Delta T_{sub} d$  به طور جداگانه محاسبه می‌شوند.  $\Delta T_{sub} d$  را با استفاده از موازنه نیروهای وارد بر یک حباب در نزدیکی میله‌های سوخت و توزیع دمای سیال تک فازی اطراف دیواره محاسبه می‌کنیم. با فرض اینکه شتاب حباب و نیز نیروی شناوری حباب ناچیز است، جمع نیروهای درگ و کشش سطحی در حالت تعادل باید صفر شود و به این ترتیب فاصله نوک حباب تا دیواره ( $y_B$ ) که متناسب با شعاع حباب است، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\ddot{y}_B^+ = \frac{y_B u^* \rho_f}{\mu_f} = c \frac{(\sigma D_h \rho_f)^{\frac{1}{2}}}{\mu_f} \left[ 1 + c' \left( \frac{\rho_g (\rho_f - \rho_g) D_h}{\tau_w} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (20)$$

که در آن  $c = 0.015$ ،  $u^* = \tau_w / \rho_f$  و  $\tau_w = f(m/A)^2 v_f / 2$  است و با فرض زبری نسبی،  $\varepsilon / D_h = 10^{-4}$  از رابطه فنینگ [۴] به دست می‌آید. از طرفی دمای نوک حباب با استفاده از مدل لوی بر مبنای فرض مساوی بودن بادمای اشباع مایع و براساس توزیع سه مرحله‌ای درجه حرارت در جریان مغشوش (مدل مارتینلی)، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$T_B^+ = 5 \quad \text{pr}_f \quad y_B^+ \quad 0 \leq y_B^+ \leq 5$$

$$T_B^+ = 5 \left[ \text{pr}_f + 1 \ln \left( 1 + \text{pr}_f \left( \frac{y_B^+}{5} - 1 \right) \right) \right] \quad 5 \leq y_B^+ \leq 30 \quad (21)$$

$$T_B^+ = 5 \left[ \text{pr}_f + 1 \ln \left( 1 + 5 \text{pr}_f \right) + 0.5 \ln \left( \frac{y_B^+}{30} \right) \right] \quad y_B^+ > 30$$

که در آن  $T_B^+$  دمای بدون بعد در نوک حباب است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_B^+ = \frac{c_{pf} A_t u^*}{q''} \Delta T_{\text{Sat}d} \quad (22)$$

از طرفی براساس مدل لوی درمحل جداشدن حباب از سطح داریم:

$$\Delta T_{\text{sub}d} = q'' \left[ \frac{1}{h_{fo}} - \frac{T_B^+}{c_{pf} \rho_f u^*} \right] \quad (23)$$

به این ترتیب می‌توان کیفیت واقعی یا  $x'$  را با داشتن  $\Delta T_{\text{sub}d}$  که از رابطه فوق به دست می‌آید، حساب کرد.

#### اطلاعات و شرایط مرزی

اطلاعات مورد نیاز جهت حل معادلات عبارتند از: هندسه مسئله شامل ابعاد و آرایش میله‌های سوخت، سطح مقطع کانالها، تغییرات طولی و محیطی فلاکس حرارتی میله‌های سوخت، ثابتهای ترموهیدرولیکی به کاررفته در روابط تجربی، خواص ترمودینامیکی آب اشباع شامل  $h_f$ ،  $h_g$ ،  $v_f$ ،  $v_g$ ، ویسکوزیته  $\mu_f$ ، فشار و دمای آب، انتالپی متوسط ورودی به هرکانال، دبی جرمی ورودی به هرکانال، جریان عرضی انحرافی ورودی و فشارخروجی از انتهای کانالها. مجهولات به دست آمده پس از حل معادلات عبارت‌اند از: فشار  $P(z)$ ، انتالپی سیال  $h_f$ ، کیفیت  $x_f(z)$ ، شدت دبی جرمی  $G_f(z)$ ، دبی جرمی  $m_f(z)$  و فلاکس حرارتی وارده  $q_f/\rho_{fii}$  در هرکانال. علاوه بر این، جریانهای عرضی انحرافی واغتشاشات بین هر دو کانال مجاور نیز به دست می‌آید.

#### روش حل عددی

روابط پیوستگی (۲) انرژی (۴) و ممتنم محوری (۸) تشکیل 3M معادله دیفرانسیل مرتبه اول خطی می‌دهند. رابطه (۱۰) معرف  $k$  معادله جبری است. این معادلات همراه با روابط تجربی مذکور در قسمت قبل حل می‌شوند. معادلات بقا از نوع مقدار اولیه است و می‌توان آنها را به کمک روش قدم به قدم حل کرد [۵]. انتالپی ورودی، فشارخروجی، افت فشار ورودی، دبی جرمی ورودی و جریان عرضی انحرافی در ورودیه کانالها، اطلاعات اولیه هستند. هر بار معادلات

دیفرانسیل رابا استفاده از روش توسعه یافته اویلر در فاصله  $\Delta z$  حل می‌کنیم. رابطه (۱۰) شامل  $k$  معادله جبری است که باید به طور همزمان حل شوند. این معادلات با استفاده از روش گروس - جردن حل می‌شوند. در حل عددی قدمهای زیر برداشته می‌شود:

۱- طول کانال به فواصل مساوی  $\Delta z$  تقسیم می‌شود.

۲- در مقطع  $z=0$ ، مقادیر جرمی هر کانال  $m_i$ ، انتالی هر کانال  $h_i$  و جریان عرضی انحرافی بین کانالهای مجاور  $w_{ij}$  معلوم است. همچنین با توجه به اینکه افت فشار در طول میله‌ها ناچیز است، خواص ترمودینامیکی سیال در هر مرحله را بر مبنای فشار خروجی حساب می‌کنیم. برای این کار با استفاده از جداول خواص آب و بخار و داشتن فشار و انتالی در مقطع  $z$ ، خواص ترمودینامیکی زیر را به دست می‌آوریم:

$$v_i, T_i, \rho_i, \alpha_i, \mu_i, x_i, \partial v_i / \partial p, \partial v_i / \partial h, \phi'_i, u_i$$

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

۴- از رابطه (۲)،  $dm_i$  محاسبه می‌شود.

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

۶- با استفاده از معادله ممتن محوری (۸)،  $(dp/dz)(z)$  به دست می‌آید.

۷- با استفاده از روش توسعه یافته اویلر و از طریق سعی و خطا مقادیر  $h_i(z+\Delta z)$  و  $m_i(z+\Delta z)$  را به دست می‌آید. به این ترتیب که ابتدا با حدس زدن مقادیر مشتق سه پارامتر فوق در  $(z+\Delta z)$ ، این پارامترها را محاسبه و سپس مطابق بند ۸ در زیر آنها را اصلاح می‌کنیم.

۸- خواص سیال را مطابق بند ۲ در  $z+\Delta z$  حساب می‌کنیم و با استفاده از نتایج حاصل،  $w'_{ij}(z+\Delta z)$  و  $c_{ij}(z+\Delta z)$  را مطابق بند ۳ و  $(\partial h_i/\partial z)(z+\Delta z)$  را مطابق بند ۵ به دست می‌آوریم. و بالاخره مطابق بند ۶، بدون احتساب جریانهای عرضی انحرافی  $(\partial p/\partial z)(z+\Delta z)$  را حساب می‌کنیم. سپس با استفاده از معادلات (۱۰) جریانهای عرضی انحرافی را به دست می‌آوریم. معادلات (۱۰) غیر خطی بوده و آنها را به صورت خطی حل می‌کنیم؛ به این ترتیب که هر بار مقادیر  $|w_{ij}|$  را با استفاده از مقادیر قبلی دانسته فرض می‌کنیم. حال  $(dm_i/dz)(z+\Delta z)$  را از رابطه (۲) و مقدار جدید  $(dh_i/dz)(z+\Delta z)$  را از رابطه (۴) به دست می‌آوریم.

از روش توسعه یافته اویلر، مقادیر جدید  $h_i(z+\Delta z)$  و  $m_i(z+\Delta z)$  محاسبه می‌شود. در صورتی که اختلاف مقادیر  $h_i(z+\Delta z)$  و نیز  $m_i(z+\Delta z)$  در دو مرحله آخر از حد مورد نظر بیشتر بود، بند ۸ را تکرار می‌کنیم. در نهایت با استفاده از معادله (۱۴)،  $(\partial p/\partial z)(z+\Delta z)$  را به دست

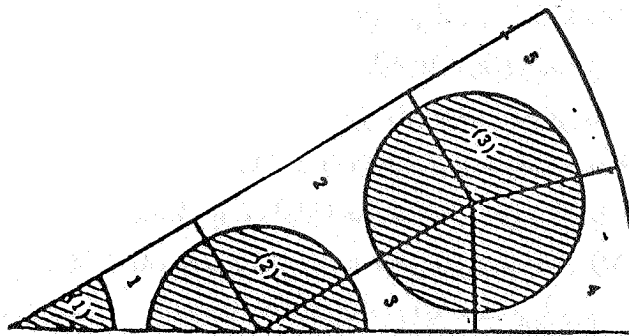
می آوریم و از آنجا  $p_i(z+\Delta z)$  را محاسبه می نماییم.

۱۰- مقادیر حاصل از بندهای فوق راکه در مقطع  $(z+\Delta z)$  به دست آمده است، به عنوان شرط اولیه برای محاسبات بعدی در نظر می گیریم و بندهای ۷ به بعد را تکرار می نماییم تا با افزایش  $z$  به انتهای طول کانالها برسیم. روندنمای برنامه کامپیوتری در ضمیمه ارائه شده است.

### نتایج عددی

حال به نتایج حاصل از بررسی یک مسئله به عنوان نمونه پرداخته می شود. در این مسئله یک مجموعه ۱۹ میله ای سوخت در نظر گرفته می شود. به علت تقارن،  $\frac{1}{12}$  این مجموعه مورد بررسی قرار می گیرد. شکل ۵ نشان دهنده  $\frac{1}{12}$  مقطع قلب راکتور است. در این شکل، مقطع سه میله سوخت، پنج کانال جریان و پنج مرز مشترک بین کانالها نشان داده شده است. اطلاعات ورودی مسئله به شرح زیر انتخاب شده اند:

- ۱- ابعاد هندسی شامل طول کانال 60 in، قطر میله ها 0.563 in، فضای خالی بین میله ها 0.08 in و فاصله میله مجاور دیواره تادیواره 0.08 in.
- ۲- شرایط کارکرد شامل فلاکس حرارتی  $0.4 \times 10^6$  Btu/hr. ft<sup>2</sup>، شدت دبی جرمی متوسط  $1 \times 10^6$  lbm/hr ft<sup>2</sup>، فشار سیستم 1000 psi و انتالپی ورودی 400 Btu/lbm.
- ۳- مقادیر ثابت شامل پارامتر اختلاط  $\beta = 0.04$ ، مقاومت جریان فرضی انحرافی،  $f_i = 0.001$  ft



شکل ۵-  $\frac{1}{12}$  مقطع قلب راکتور

ضریب تصحیح ممتنم جریان عرضی  $f_D=1.00$ ، و ضریب تصحیح ممتنم جریان عرضی اغتشاشات  $f_t=1.00$ .

برای سادگی، توزیع فلوی حرارتی محوری میله‌ها رایکنواخت و توزیع قدرت حرارتی نسبی میله‌ها رایکسان فرض می‌کنیم. برای مقایسه اثرمدلهای مختلف توصیه شده دراین مقاله، مسئله درچهارحالت مختلف حل و نتایج حاصل بایکدیگرمقایسه شده‌است. فرضیات مترتب به هریک ازچهارحالت مذکوردر زیر آورده شده‌است.

حالت اول - دراین حالت باتوجه به سه فرض زیریرنامه کامپیوتری اجراشده‌است :

۱- ازانتقال حرارت تحت اشباع صرف نظرشده‌است.

۲- برای تعیین ضرایب  $\alpha$  و  $\phi$  ازمدل آرمانداستفاده شده‌است.

۳- ضریب اصطکاک تک فازی برای کلیه کانالهایکسان فرض شده‌است و اثردمای دیواره در

محاسبات منظورنشده‌است .

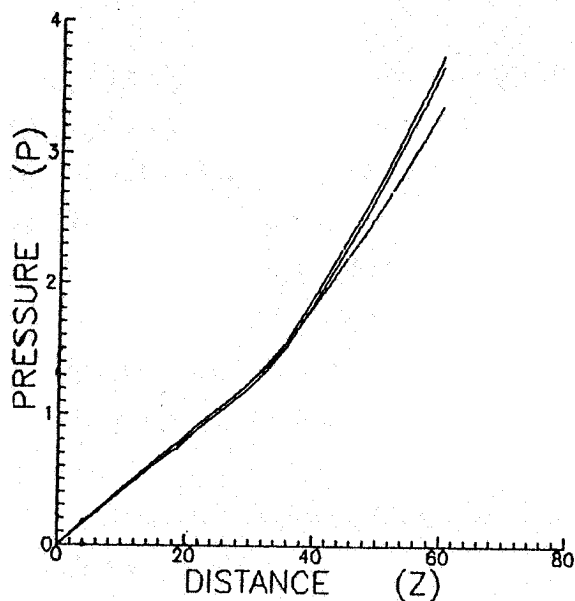
حالت دوم - انتقال حرارت تحت اشباع بااستفاده ازمدل لوی درمحاسبات منظورشده‌است - سایر فرضیات حالت اول به قوت خودباقی‌است.

حالت سوم - ازمدل دوفازی همگن برای محاسبه  $\alpha$  و  $\phi$  استفاده شده‌است - سایر فرضیات حالت اول به قوت خودباقی‌است.

حالت چهارم - هیچیک ازفرضیات حالت اول اعمال نشده‌است. به عبارت دیگرانتقال حرارت تحت اشباع بااستفاده ازمدل لوی درمحاسبات منظورشده‌است. ازمدل دوفازی همگن برای محاسبه  $\alpha$  و  $\phi$  استفاده گردیده‌است و ضریب اصطکاک تک فازی برحسب شکل کانال به طورجداگانه حساب شده‌است.

دراینجانتایج حاصل ازاجرای چهارحالت فوق رادرموردسه پارامترافت فشاردرطول کانال به بحث می‌گذاریم. شکل ۶ افت فشاردرطول کانال شماره ۱ را برای چهارحالت نشان می‌دهد. باتوجه به اینکه سیال درابتدای کانال تک فازی‌است، چهارحالت فوق در  $z$  های کوچک نتایج مشابهی رابه دست می‌دهد. باافزایش  $z$ ، تولیدبخاردرجریان زیادشده و اختلافات ظاهر می‌گردد. درجدول ۱ افت فشارهای کلی درکانال ۱ درچهارحالت مقایسه شده و درصداختلاف نسبت به حالت چهارم که کاملترین حالت‌است، نشان داده شده‌است. بامقایسه درصدخطای حالات ۱ و ۳ می‌توان نتیجه گرفت که مدل دوفازی برای محاسبه  $\alpha$  و  $\phi$ ، خطای افت فشاررابه مقدارقابل توجهی کاهش می‌دهد. به طورکلی مدلهای سه گانه استفاده شده جمعا" می‌تواندپیش از ۱۱

درصد از خطای محاسبات بکاهد.



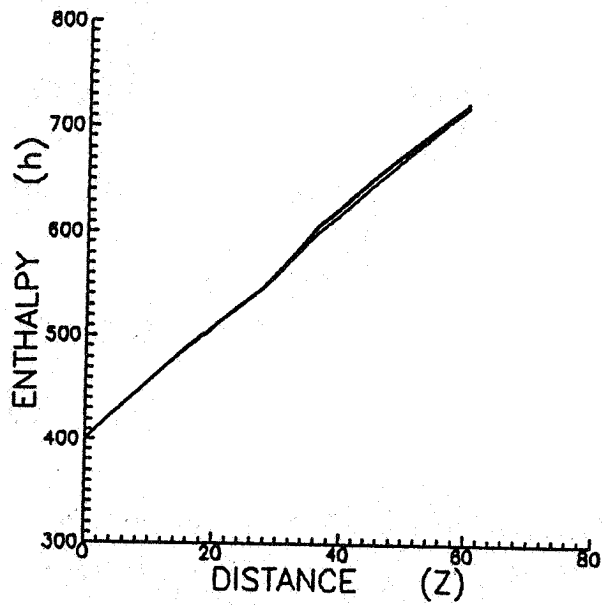
شکل ۶- افت فشار در طول کانال شماره ۱

جدول ۱- افت فشار کل در کانال ۱ در چهار حالت مختلف و مقایسه آنها

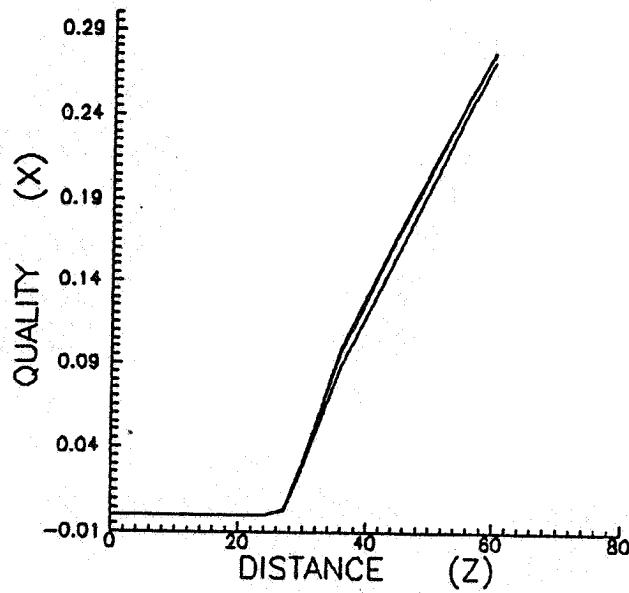
درصد اختلاف	اختلاف فشار کل در کانال ۱	حالت
۱۱/۱	۳/۲۵۸	۱
۷/۹	۳/۳۷۰	۲
۲	۳/۷۴۴	۳
۰	۳/۶۶۶	۴

شکل ۷ تغییرات انتالپی سیال و شکل ۸ تغییرات کیفیت سیال در طول کانال ۱ را برای چهار حالت مختلف نمایش می‌دهد. همان طوری که مشخص است، انتالپی در طول کانال تقریباً به طور خطی افزایش می‌یابد. علت این امر آن است که فلوی حرارتی در طول میله‌ها را خطی فرض کرده‌ایم (حالت





شکل ۷- تغییرات انتالپی در طول کانال ۱



شکل ۸- تغییرات کیفیت در طول کانال ۱

واقعی فلوی حرارتی شکلی شبیه سهمی دارد). مجدداً متذکر می‌شویم که اختلاف نتایج در چهار حالت عمدتاً در  $z$  های بزرگ یعنی وقتی جریان دوفازی می‌شود، نمایان می‌گردد. اطلاعات بیشتر از نتایج حاصل از حل حالات فوق در مرجع [۶] آورده شده است.

### نتیجه گیری

در این مقاله، جریان سیال در قلب یک راکتور هسته‌ای از طریق حل عددی معادلات جریان و به کمک کامپیوتر شبیه سازی شده است. با توجه به اینکه جریان در قلب راکتور دوفازی و مغشوش است، حل آن از طریق مدل کردن پروسه های انتقال حرارت دوفازی، اصطکاک بین سیال دوفازی و دیواره ها و جریانهای عرضی انجام پذیرفته است. در این مقاله مقطع جریان به بخشهایی تقسیم و هر بخش به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است. این فرض سبب می‌شود که معادلات بسیار ساده شده و شبیه جریان یک بعدی حل شوند. البته جریانهای عرضی ناشی از اختلاف فشار بین هر کانال و زواید موجود در مسیر و نیز جریانهای ناشی از اغتشاشات به طور جداگانه مدل شده و اثرات آنها در حل مسئله منظور شده است.

جوابهای حاصل از حل مسئله معقول است، زیرا کلیه پارامترهای مهم در جریان سیال از قبیل جریانهای عرضی، اثرات دوفازی بودن جریان در ضریب اصطکاک، خواص سیال و انتقال حرارت در حل مسئله منظور شده است و نتایج حاصل رami توان به عنوان تقریبی مناسب برای طراحی اولیه قلب راکتور به کاربرد. قدم بعدی برای بهبود بخشیدن به روش فوق حذف مدل‌های استفاده شده در جریانهای عرضی و استفاده از معادلات کامل ممتنم در جهت عرضی است. البته این تغییر موجب پیچیدگی شدید مسئله شده و نیاز به حل سیستم معادلات پاره‌ای غیر خطی دارد. پیشنهاد دیگری برای بهبود روش ارائه شده، کاربر روی مدل‌های ارائه شده و تکمیل این مدل‌هاست.

## 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. Collier, 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- اصغر اسماعیلی، شبیه‌سازی کامپیوتری پروسه‌های انتقال در قلب یک راکتور هسته‌ای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۶۷.