

توسعه شبیه ساز جریان دوفازی با استفاده از روش DFM

سعید، طالبی^{۱*}؛ حسین، کاظمی نژاد^۲

۱. سازمان انرژی اتمی، شرکت ادیس

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده

جریان خنک کننده در برخی از تجهیزات رآکتورهای هسته ای در کارکرد عادی و حوادث هسته ای از دو فاز بخار و مایع تشکیل شده است. در این تحقیق دینامیک جریان دوفازی در یک کانال عمودی با استفاده از روش^۱ DFM شبیه سازی شده و تأثیر تغییر زمانی پارامترهای ورودی بر رفتار ترموهیدرولیکی کانال بررسی می شود. نتایج روش DFM در آنالیز حوادث گذرا در رآکتورهای هسته ای قابل قبول است [۲۱]. این شبیه سازی ما را قادر خواهد کرد ضمن محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیکی، دینامیک تغییرات رژیم های دوفازی در طول کانال را نیز پیش بینی کنیم. با توجه به بلادرنگ بودن الگوریتم به کار برده شده در حوزه زمان، مدل مورد استفاده در این تحقیق برای تولید شبیه ساز جریان دوفازی در شرکت ادیس، به کار برده شده است.

کلید واژه: جریان دوفازی، شبیه سازهای رآکتور، رژیم جریان، انتقال حرارت دوفازی، روش DFM

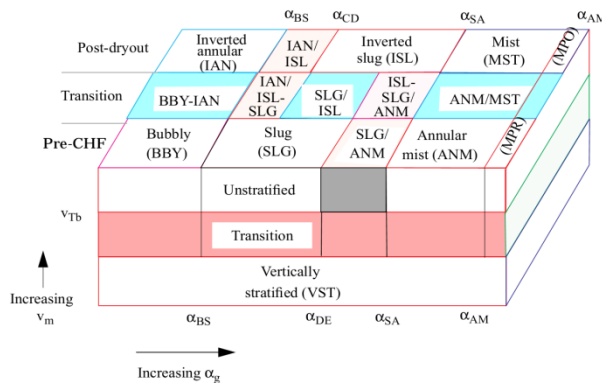
مقدمه

کاملترین مدل در شبیه سازی جریان دوفازی، مدل دوسیاله^۲ است. معادلات جریان دوفازی در مدل مذکور از ۶ معادله بقاء (معادلات بقای جرم، ممنتوم و انرژی برای هر یک از فازهای مایع و بخار) تشکیل شده است. این معادلات، حالت سه بعدی داشته و شکل بسیار پیچیده ای دارند. در مدل دوسیاله، برای مدلسازی مبادله جرم، انرژی و ممنتوم بین فازهای مایع و بخار ناچاریم از تعداد بسیار زیادی روابط تجربی استفاده کنیم [۴]. به طور کلی روش دوسیاله روش بلادرنگی نبوده و نمی توان از آن در ساخت شبیه سازهای نیروگاه های هسته ای که به منظور آموزش اپراتورها استفاده می شوند، بهره برد. راه غلبه بر این مشکلات استفاده از DFM است. در این تحقیق از DFM چهار معادله ای استفاده شده است. استفاده از تعداد معادلات بقاء کمتر، تعداد بسیار کمتر روابط تجربی و همچنین بهره گیری از یک روش عددی بهینه

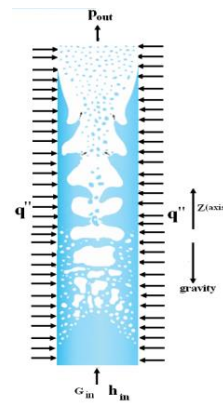
^۱ Drift flux model

^۲ Two fluid model

باعث می‌شود DFM به عنوان یک روش بلادرنگ برای شبیه‌سازی جریان دوفازی در این تحقیق استفاده شود. شکل (۱) نمایی از فیزیک مسئله و شرایط مرزی حاکم را نشان می‌دهد. مایع زیر سرد با آنتالپی و دبی مشخص وارد کانال عمودی تحت شار حرارتی می‌شود. در طول کانال رژیم‌های جریان پی در پی تغییر می‌کنند. خروجی کانال تحت فشار معینی واقع شده است. شرایط مرزی دبی ورودی، آنتالپی ورودی، فشار خروجی و شار حرارتی می‌تواند با زمان تغییر کنند.



شکل (۲): نقشه رژیم‌های جریان [۴]



شکل (۱): نمایی از فیزیک مسئله [۳]

معادلات حاکم

- معادله بقای جرم مخلوط دوفازی

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \frac{\partial}{\partial z}(v_m \rho_m) = 0 \quad (1)$$

در این معادله ρ_m و v_m به ترتیب بیانگر چگالی و سرعت مخلوط دو فازی هستند [۴ و ۱].

- معادله بقای جرم فاز بخار

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha_g) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_g \rho_g v_m) = \Gamma_w - \Gamma_c - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha_g \rho_g \rho_l \bar{V}_{gj}}{\rho_m} \right] \quad (2)$$

گاز به فاز مایع، آهنگ تولید بخار در دیواره کانال، آهنگ چگالش بخار در توده مایع زیر سرد و سرعت سوق مؤثر فاز گاز نسبت به فاز مایع می‌باشند. \bar{V}_{gj} و Γ_c ، Γ_w ، α_g ، ρ_l ، ρ_g به ترتیب بیانگر چگالی فاز بخار، چگالی فاز مایع، کسر خلأ (نسبت حجمی فاز

- معادله بقای ممتوم برای مخلوط دوفازی

$$\frac{\partial \rho_m v_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_m v_m^2) = -\frac{\partial P}{\partial z} - \phi_{f0}^2 \frac{f_{l0}}{D_h} \left(\frac{(1-X_g)^2 G_m}{2\rho_l} \right) - \rho_m g - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha_g \rho_g \rho_l}{(1-\alpha_g) \rho_m} \bar{V}_{gj}^2 \right] \quad (3)$$

در این معادله $P, \phi_{l0}^2, f, X_g, G_{in}$ و g به ترتیب فشار موضعی مخلوط دوفازی، ضریب اصطکاک دو فازی^۱ [۵]، ضریب اصطکاک تک فازی با فرض اینکه تمام جریان از فاز مایع تشکیل شده باشد [۵]، دبی ورودی و شتاب گرانشی می‌باشند.

• معادله بقای انرژی برای مخلوط دوفازی

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m h_m) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_m h_m v_m) = \frac{4q_w}{D_{hy}} - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha_g \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) \bar{V}_{gj} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha_g \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) \bar{V}_{gj} \right] + \frac{\partial P}{\partial t} + \left[v_m + \frac{\alpha_g (\rho_l - \rho_g) \bar{V}_{gj}}{\rho_m} \right] \frac{\partial P}{\partial z} \quad (4)$$

$$h_m = \alpha_g h_g + (1 - \alpha_g) h_l, \rho_m = \alpha_g \rho_g + (1 - \alpha_g) \rho_l, G_m = \rho_m v_m$$

به ترتیب بیانگر آنتالپی مخلوط دوفازی، آنتالپی فاز گاز، آنتالپی فاز مایع، شار حرارتی دیواره کانال و قطر هیدرولیک کانال می‌باشند. بعد از مقداری ساده‌سازی و انجام عملیات ریاضی، معادلات ۱، ۲ و ۴ به شکل ماتریسی زیر در می‌آیند:

$$A \frac{\partial}{\partial t} (Q) + \frac{\partial}{\partial z} (\Phi v_m) = S \quad (5)$$

$$Q = \begin{bmatrix} P \\ h_m \\ \alpha_g \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_m}{\partial P} & \frac{\partial \rho_m}{\partial h_m} & 0 \\ h_m \frac{\partial \rho_m}{\partial P} - 1 & \rho_m + h_m \frac{\partial \rho_m}{\partial h_m} & 0 \\ \alpha_g \frac{\partial \rho_g}{\partial P} & \alpha_g \frac{\partial \rho_g}{\partial h_m} & \rho_g \end{bmatrix}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \rho_m \\ h_m \\ \alpha_g \end{bmatrix}; S = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{4q_w}{D_{hy}} - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha_g \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) \bar{V}_{gj} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha_g \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) \bar{V}_{gj} \right] + \left[v_m + \frac{\alpha_g (\rho_l - \rho_g) \bar{V}_{gj}}{\rho_m} \right] \frac{\partial P}{\partial z} \\ \Gamma_w - \Gamma_c - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha_g \rho_g \rho_l \bar{V}_{gj}}{\rho_m} \right] \end{bmatrix}$$

قابل ذکر است که تأثیرات دیفیوژن فازها در یکدیگر و همچنین انتقال انرژی بین آنها به صورت جملات کانوکسیون در طرف راست معادلات ۱، ۲، ۳ و ۴ ظاهر شده است [۱]. به عبارت دیگر استفاده از DFM ضمن کاهش تعداد معادلات بقاء نیاز به استفاده از روابط نیمه تجربی برای بیان اندرکنش دو فاز گاز و مایع را از بین می‌برد. کلید حل معادلات ذکر شده در بالا یافتن پارامترهای مجهول موجود در سمت راست آنهاست. این پارامترها شامل سرعت سوق مؤثر فاز گاز نسبت به فاز مایع (\bar{V}_{gj})، آهنگ تولید بخار (Γ_w) [۴] و آهنگ چگالش بخار در حجم مایع (Γ_c) [۴] هستند.

مهمترین پارامتر در DFM سرعت سوق مؤثر فاز گاز نسبت به فاز مایع (\bar{V}_{gj}) است که در معادله (۵) ظاهر شده و از رابطه زیر به دست می‌آید [۱].

^۱ Two phase multiplier for friction pressure drop
^۲ Liquid only friction factor



$$\bar{V}_{gj} = \frac{\rho_m (v_{gj} + (C_0 - 1)v_m)}{\rho_m - (C_0 - 1)\alpha_g(\rho_l - \rho_g)} \quad (6)$$

در معادله (۶)، v_{gj} و C_0 سرعت سوق میانگین و فاکتور جمعیت در DFM هستند [۶]. پارامتر C_0 معیاری است از عدم یکنواختی توزیع بخار در سطح مقطع کانال. به طور مثال برای جریان یکنواخت حبابی مقدار آن نزدیک یک است. روابط تجربی زیادی برای بیان v_{gj} و C_0 بر حسب پارامترهایی چون دبی جریان، فشار سیستم، قطر هیدرولیک، رژیم جریان، کسر خلأ و ... وجود دارند. کادینگتن و مکائین [۷] بعد از مقایسه تعداد زیادی رابطه نیمه تجربی بیان شده برای پارامترهای v_{gj} و C_0 ، به این نتیجه رسیدند که مدل نیمه تجربی ارائه شده توسط Chexal-Lellouche [۸] از دقت مناسبی برخوردار بوده و در گستره وسیعی از دبی، فشار و قطر هیدرولیک و رژیم جریان، نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی توافق خوبی دارد. لازم به ذکر است که برای پیش بینی رژیم های مختلف دوفازی در طول کانال از نقشه جریان استفاده شده در کد RELAP^۵ [۴] (شکل ۲) بهره گرفته شده است.

الگوریتم حل معادلات

برای گسسته سازی معادلات حاکم در گستره مکان از روش احجام محدود استفاده می شود و همچنین گسسته سازی در حوزه زمان با روش های نیمه ضمنی انجام می شود. برای جلوگیری از به وجود آمدن میدان های فشار و سرعت غیر فیزیکی، میدان محاسباتی به صورت شبکه جابجا شده نودبندی می شود.

نتایج

برای حصول اطمینان از صحت و دقت مدل های فیزیکی و الگوریتم عددی ارائه شده، لازم است نتایج حاصل از شبیه سازی در حالت های پایا و گذرا با نتایج تجربی و کد RELAP^۵ مقایسه و ارزیابی شوند. جدول (۱) شرایط مرزی اعمال شده برای یک کانال جوشان عمودی توسط مرجع [۹] را نشان می دهد.

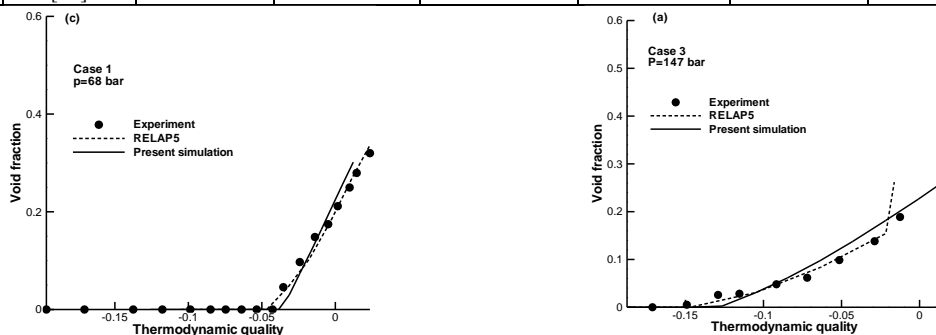
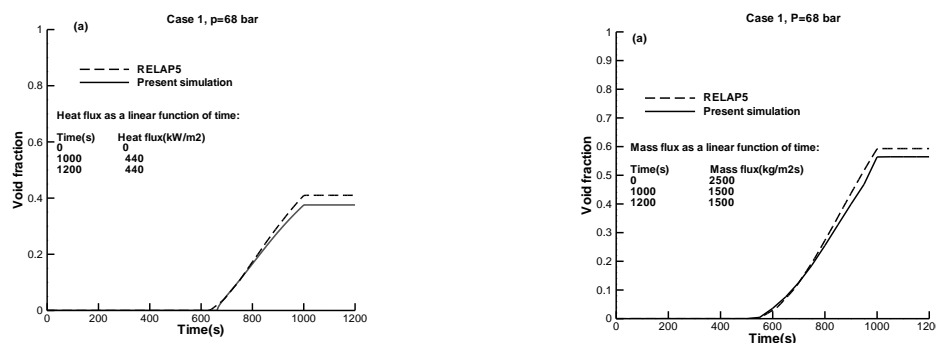
آزمایش های تجربی مربوط به جدول (۱) تنها برای شرایط حالت پایا انجام شده است. انجام آزمایش های تجربی برای بررسی شرایط جریان های دوفازی در حالت گذرا، از لحاظ تکنیکی کار مشکل و پرهزینه ای است و در نشریات قابل دسترس گزارشی از این نوع آزمایشات چاپ نشده است. به همین دلیل برای ارزیابی صحت و دقت مدل های فیزیکی ارائه شده برای شرایط حالت های گذرا، نتایج شبیه سازی با نتایج حاصل از کد RELAP^۵ مقایسه شده است. در شکل (۳)، نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج RELAP^۵ و اندازه گیری های تجربی برای کسر خلأ بر حسب کیفیت تعادلی در حالت پایا و در دو فشار مختلف مقایسه شده است. طبق تعریف، کیفیت تعادلی با رابطه $\frac{h_m - h_f}{h_{fg}}$ قابل تعریف است. کیفیت تعادلی در نواحی زیر سرد منفی و در نواحی اشباع مثبت است. شکل (۳) نشان می دهد که مدل ارائه شده به خوبی شروع جوشش هسته ای و دوفازی شدن جریان را پیش بینی می کند و در فشارهای کاری رآکتورهای BWR و PWR مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد. در

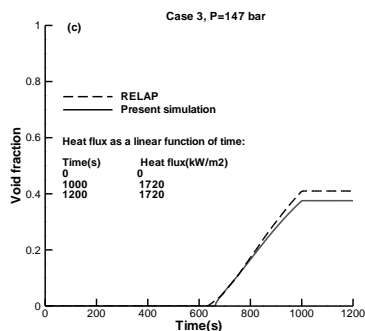


شکل های (۴) و (۵) اثر تغییرات زمانی پارامترها دبی خنک کننده و شار حرارتی دیواره بر رفتار ترموهیدرولیکی کانال جوشان آورده شده است و همچنین با کد RELAP⁵ مقایسه شده است. با مقایسه نتایج شبیه سازی و کد RELAP⁵ مشاهده می شود که مدل های فیزیکی ارائه شده برای حالات گذرا نیز از دقت مناسبی برخوردارند. در شکل (۴) اثر کاهش شار گرمی خنک کننده بر کسر خلأ خروجی کانال نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با کاهش شار گرمی، کیفیت بخار در خروجی کانال افزایش می یابد که از لحاظ ایمنی نامطلوب است زیرا ممکن است باعث وقوع CHF و افزایش ناگهانی دمای دیواره کانال شود. در یک رآکتور واقعی حادثه یاد شده در اثر خرابی پمپ های مدار اول یا شکستگی لوله های رابط در این مدار اتفاق می افتد. با توجه به شکل (۵)، افزایش زمانی شار حرارتی دیواره کانال باعث افزایش تدریجی دمای خنک کننده می شود تا اینکه در یک زمان مشخص حباب ها بر روی دیواره تشکیل شده و جریان دوفاز شود. افزایش بیشتر شار حرارتی باعث افزایش کسر خلأ در خروجی کانال می شود. در حالت های واقعی یک رآکتور هسته ای، به دلیل وجود رآکتیویته ذاتی منفی، افزایش کسر خلأ بخار و به دنبال آن کاهش چگالی مخلوط دوفازی در نهایت باعث کاهش توان رآکتور خواهد شد.

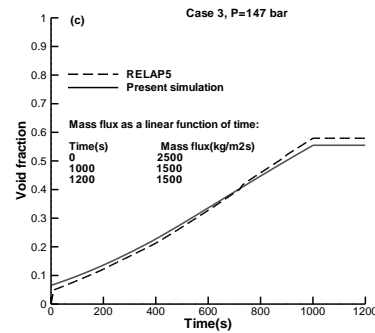
جدول (۱): شرایط اعمال شده در آزمایشهای انجام شده توسط مرجع [۹]

Case No.	مرجع	P(bar)	G(kg/m ² s)	T _{in} (K)	q _w (kW/m ²)	D _{hy} (m)	L(m)
۱	[۳۶]	۶۸	۹۹۸	۵۲۱	۴۴۰	۰,۰۱۲	۱,۵
۲	[۳۶]	۱۴۷	۲۰۱۴	۵۴۵	۱۷۰	۰,۰۱۲	۱,۵

شکل (۲): مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی با RELAP⁵ و تجربی، برای کسر خلأ بر حسب کیفیت ترمودینامیکی در دو فشار مختلف.



شکل (۵): مقایسه اثر افزایش زمانی شار حرارتی دیواره کانال بر کسر خلأ خروجی در دو فشار متفاوت.



شکل (۴): مقایسه اثر کاهش زمانی شار جرمی خنک کننده بر کسر خلأ خروجی در دو فشار متفاوت.

بحث و نتیجه گیری

نتایج حالات پایا و گذرای حاصل از شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های تجربی و نتایج حاصل از کد RELAP5 مقایسه شده و توافق خوبی مشاهده شده است. با توجه به تعداد معادلات کمتر به کار برده شده، این روش از سرعت مناسبی برخوردار است. با توجه نیاز به روش‌های محاسباتی بلادرنگ در ساخت شبیه‌سازهای رآکتور، استفاده از روش معرفی شده در این تحقیق می‌تواند به عنوان یک روش بهینه در ساخت این سیمولاتورها مورد استفاده قرار گیرد. در همین راستا از روش ذکر شده در ساخت سیمولاتور جریان دو فاز در شرکت ادیس استفاده شده است.

منابع

- [۱] M. Ishii, T. Hibiki, Thermo-fluid dynamics of two-phase flow, Springer, ۲۰۰۶.
- [۲] CBRA-EN Code Manual, ۱۹۹۹.
- [۳] J. W. Lane, D. L. Aumiller, F.B. Cheung, L. E. Hochreiter, A self-consistent three-field constitutive model set for predicting co-current annular flow, Nuclear Engineering and Design ۲۴۰ (۲۰۱۰) ۳۲۹۴-۳۳۰۸.
- [۴] RELAP5/MOD2 Code Manual, NUREG/CR-۰۲۷۳, ۱۹۸۹.
- [۵] J.G. COLLIER, Convective Boiling and Condensation, McGraw-Hill Publishing, ۱۹۷۲.
- [۶] T. Hibiki, M. Ishii, One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes. International Journal of Heat and Mass Transfer ۴۶ (۲۰۰۳) ۴۹۳۵-۴۹۴۸.
- [۷] P. Coddington, R. Macian, A study of the performance of void fraction correlations used in the context of drift-flux two-phase flow models, Nuclear Engineering and Design ۲۱۵ (۲۰۰۲) ۱۹۹-۲۱۶.
- [۸] B. Chexal, G. Lellouche, J. Horowitz, J. Healzer, A void fraction correlation for generalized applications, Progress in Nuclear Energy ۲۷ (۱۹۹۲) ۲۵۵-۲۹۵.
- [۹] G.G. Bartolomei, V.M. Chanturiya, Experimental study of true void fraction when boiling sub-cooled water in vertical tubes, Thermal Engineering ۱۴ (۱۹۶۷) ۱۲۳-۱۲۸.