



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

مدل‌سازی عددی و محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیکی یک کانال خنک‌کننده راکتور هسته‌ای

در حالت گذرا با استفاده از روش Drift-Flux

غنچه ، باغبان؛ محسن ، شایسته؛ مجید ، باهنر

^۱سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

^۲دانشگاه امام حسین (ع)، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

^۳دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی-مهندسی، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

با توجه به اهمیت جریان‌های دوفازی در سیستم‌های مهندسی، در این مقاله مدل‌سازی عددی جریان خنک‌کننده عبوری از یک کانال عمودی گرم‌شونده در حالت گذرای افزایش توان بررسی شده است. بدین منظور، پس از تقسیم کانال به تعدادی حجم کنترل، معادلات بقای سیال و انتقال حرارت سوخت گسسته‌سازی شده و سپس با استفاده از روش Drift-Flux چهار معادله‌ای، پارامترهای ترموهیدرولیکی از جمله کسر حجمی بخار، توزیع دمایی و افت فشار دو سر کانال محاسبه شده است. برای حل معادلات برنامه‌ای به زبان Fortran90 نوشته شده است. در انتها نتایج بدست آمده از برنامه با نتایج بدست آمده از کد RELAP5 مقایسه شده است.

کلید واژه‌ها: مدل Drift-Flux، جریان دوفازی، حالت گذرا، کسر حجمی بخار، کد RELAP5

۱. مقدمه

با توجه به اهمیت جریان‌های دوفازی، طراحی بهینه و اطمینان از عملکرد ایمن سیستم‌هایی که با جریان دوفازی کار می‌کنند بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این میان مدل‌سازی جریان‌های دوفازی در راکتورهای هسته‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است. جریان‌های دوفازی در راکتورهای هسته‌ای در صورتی که به دقت مورد بررسی قرار نگیرند، می‌توانند علی‌رغم مفید بودن منجر به خطرات جبران‌ناپذیری شوند [۱، ۲، ۳]. بدین منظور لازم است که پارامترهای ترموهیدرولیکی جریان سیال در بخش‌های مختلف یک نیروگاه هسته‌ای در شرایط نرمال کاری و حوادث احتمالی مورد بررسی قرار گیرند. از این رو در این مقاله نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی حالت گذرای توان در یک کانال عمودی با استفاده از مدل Drift-Flux چهار معادله‌ای ارائه می‌شود. تاکنون سه مدل اصلی برای حل معادلات حاکم بر جریان‌های دوفازی پیشنهاد شده است که این مدل‌ها عبارتند از: مدل تعادلی



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

همگن (HEM)، مدل Drift-Flux و مدل دوسیاله (TFM). در جریان‌های دوفازی، کسر حجمی بخار و شرایط سطح مشترک دو فاز در پیش بینی رفتار سیستم بسیار حائز اهمیت خواهد بود. بنابراین با توجه به کاربرد روش HEM در تعداد محدودی از موارد، لزوم مدل‌سازی دقیق‌تر جریان‌های دوفازی آشکار می‌گردد. در حقیقت در دو مدل دیگر می‌توان شرط تعادل مکانیکی (توزیع فشار) و ترمودینامیکی میان دو فاز را حذف کرده و امکان مدل‌سازی واقعی‌تر سیستم‌ها را فراهم ساخت [۴]. در روش Drift-Flux که اولین بار توسط Zuber- [۲Findlay] ارائه گردید، حرکت کل مخلوط توسط یک معادله بقای مومنتوم توصیف شده و سپس حرکت نسبی بین دو فاز به وسیله یک معادله مناسب سینتیکی کمکی مدل‌سازی می‌گردد. بنابراین قابلیت‌های اصلی این روش زمانی خود را نشان خواهد داد که حرکت بین دو فاز به درستی تخمین زده شود [۳]. مهم‌ترین مزیت روش Drift-Flux نسبت به روش دو سیاله نیاز به حل تعداد کمتر معادلات و روابط کمکی جریان است. هرچند با وجود توجه نسبتاً گسترده به جزئیات، در مقالات اندکی به کاربرد این روش در توسعه کدهای هسته‌ای تحلیل مدار پرداخته شده است و بیشتر توجه محققین به استفاده از این روش در اعتبارسنجی محاسبات قلب بوده است [۶،۵]. از این رو در این مقاله نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی حالت گذرای توان در یک کانال عمودی با استفاده از مدل Drift-Flux چهار معادله‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. روش کار

در روش Drift-flux چهار معادله‌ای، معادلات بقا در حالت گذرا و تک بعدی برای یک مخلوط دوفازی به شکل زیر نوشته می‌شوند [۴]:

معادله بقای جرم مخلوط

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

معادله بقای مومنتوم مخلوط

$$\frac{\partial (v_m \rho_m)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m v_m^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{f_{TP} G_m^2}{2D_e \rho_m} - \rho_m g - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha \rho_g \rho_l}{(1-\alpha)\rho_m} \bar{V}_{gj}^2 \right] \quad (2)$$

معادله بقای انرژی مخلوط

$$\rho_m \frac{\partial h_m}{\partial t} + G_m \frac{\partial h_m}{\partial z} = \frac{q'' P_h}{A_z} - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) \bar{V}_{gj} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) \bar{V}_{gj} \right] + \frac{\partial p}{\partial t} + \left[v_m + \frac{\alpha (\rho_l - \rho_g)}{\rho_m} \bar{V}_{gj} \right] \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

علاوه بر معادلات فوق، معادله بقای جرم فاز گاز برای تخمین کسر حجمی بخار به شکل زیر نوشته می‌شود:



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

$$\frac{\partial(\rho_g \alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g \alpha v_m)}{\partial z} = \Gamma - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha \rho_g \rho_l \bar{V}_{gj}}{\rho_m} \right] \quad (4)$$

در معادلات فوق ρ_m چگالی مخلوط، v_m سرعت مخلوط، g شتاب جاذبه، f_{TP} ضریب اصطکاک دو فاز، G_m سرعت جرمی سیال مخلوط، D_e قطر هیدرولیکی کانال، p فشار سیال، α کسر حجمی بخار، \bar{V}_{gj} سرعت Drift متوسط فاز گاز، h_m آنتالپی مخلوط، q'' شار حرارتی، A_z سطح مقطع و P_h محیط گرم شونده، چگالی فاز گاز و Γ ، نرخ خالص تولید بخار است. همچنین با توجه به در نظر گرفتن سطح غلاف میله سوخت در قلب یک راکتور هسته‌ای به عنوان دیواره‌های کانال در این مقاله، معادله انتقال حرارت رسانش در حالت تک بعدی و در مختصات استوانه‌ای به شکل زیر خواهد بود:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rk \frac{\partial T}{\partial r}) + q''' = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

در این معادله q''' و T به ترتیب چشمه حجمی تولید حرارت و دما را نشان می‌دهند. خواص سوخت مانند ضریب رسانش حرارتی و ظرفیت گرمایی با استفاده از توابع کتابخانه مرجع [۷] به صورت تابعی از دما در نظر گرفته می‌شود. همانگونه که اشاره شد برای استفاده از روش Drift-Flux لازم است سرعت نسبی بین دو فاز تعیین گردد. معادله‌ای که برای تخمین این سرعت استفاده می‌شود عبارتست از:

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

در این رابطه V_{gj} سرعت Diff و C_0 پارامتر توزیع است [۸]. این دو مقدار به ترتیب نشان دهنده حرکت نسبی دو فاز و اثرات کسر حجمی بخار می‌باشند. همچنین برای محاسبه میزان جرم منتقل شده در جریان دوفازی از مفهوم Pumping Factor استفاده می‌شود. بر این اساس شار حرارتی در دیواره برابر خواهد بود با:

$$Q = Q_{CONVECTION} + Q_{EVAPORATION} + Q_{PUMPING} \quad (7)$$

در این رابطه، $Q_{EVAPORATION}$ بخشی از شار حرارتی جوشش است که منجر به تولید بخار می‌گردد در حالیکه $Q_{PUMPING}$ منجر به افزایش تلاطم، رشد و جدایش حباب‌ها می‌شود. همچنین $Q_{CONVECTION}$ بخشی از شار حرارتی است که صرف گرم نمودن توده سیال می‌گردد. بر اساس این تعاریف، نسبت این دو بخش شار حرارتی جوشش تحت عنوان Pumping Factor شناخته می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{Q_{PUMPING}}{Q_{EVAPORATION}} = \frac{\rho_l (h_{sat} - \min(h_l, h_{sat})) - h_{cr}}{\rho_g (h_{g,sat} - h_{l,sat})} \quad (8)$$

بر اساس موارد توضیح داده شده بایستی نقطه جدایش حباب را نیز تعیین نمود. [۹]:



بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکم ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

$$h_{CR} = \begin{cases} h_{l,s} - \frac{StPe^{0.124} C_{pl}}{0.0287}, Pe \geq 52000 \\ h_{l,s} - \frac{StPe^{0.08} C_{pl}}{918.525}, Pe < 52000 \end{cases} \quad (9)$$

$$Pe = RePr, St = \frac{Nu}{RePr}$$

در این رابطه St, Pe, Nu, Pr و Re به ترتیب اعداد بدون بعد استانتون، پکلت، ناسلت، پرنتل و رینولدز و h_{CR} و $h_{l,s}$ آنتالپی بحرانی و آنتالپی مایع اشباع است. بر این اساس کسر تبخیر برابر خواهد بود با:

$$\chi = \frac{\min(h_l, h_{sat}) - h_{cr}}{(h_{l,sat} - h_{cr})(1 + \varepsilon)} \quad (10)$$

همچنین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان دوفازی از طریق رابطه تجربی **Chen** بدست آمده است [۱۰]:

$$h_{NOB} = 0.00122 \left[\frac{k^{0.79} C_p^{0.45} \rho^{0.49} g^{0.25}}{\sigma^{0.5} \mu^{0.29} h_{fg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} \right] (T_{wall} - T_{sat})^{0.24} (P(T_{wall}) - P(T_{sat}))^{0.75} \times S \quad (11)$$

$$S = \begin{cases} (1 + 0.12 Re_{TP})^{-1.14}, Re_{TP} < 32.5 \\ (1 + 0.42 Re_{TP}^{0.78})^{-1}, 32.5 \leq Re_{TP} < 70 \\ 0.0797, Re_{TP} \geq 70 \end{cases} \quad (12)$$

$$F = 2.35 \times (X_u^{-1} + 0.213)^{0.736}, X_u^{-1} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0.1} \quad (13)$$

پس از توسعه معادلات کمکی و گسسته‌سازی معادلات بقا با استفاده از تخمین تفاضل محدود و ضمنی برای جملات مشتق مکانی و زمانی، با توجه به غیر خطی بودن معادلات بدست آمده بر حسب مجهولات، از روش تکرار برای محاسبه مقادیر مجهول استفاده شده است. روند حدس و خطا در هر بازه زمانی با استفاده از مقادیر بدست آمده از مرحله قبل شروع می‌گردد تا از خارج شدن مقادیر از شعاع همگرایی جلوگیری شود. روند حدس و خطای به کار رفته در برنامه نوشته شده، نیاز به خطی سازی معادلات و تقریب‌های ناشی از آن را که در برخی از کدها مانند RELAP5 استفاده می‌شود از بین می‌برد. همچنین در الگوریتم توسعه یافته در این مقاله معادلات سیال و سوخت از طریق ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی همبسته گردیده‌اند. برای حل معادلات در حالت گذرا، از مقادیر بدست آمده در حالت پایا استفاده می‌شود. علاوه بر این، برای حل سیستم معادلات بقا، فشار در خروجی کانال و دبی (سرعت) سیال و دما در ورودی کانال به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شده است. همچنین شرایط مرزی اعمال شده بر معادله انتقال حرارت رسانش، انتقال حرارت جابه‌جایی در سطح خارجی غلاف و شرط عایق بودن سطح داخلی میله سوخت می‌باشد.

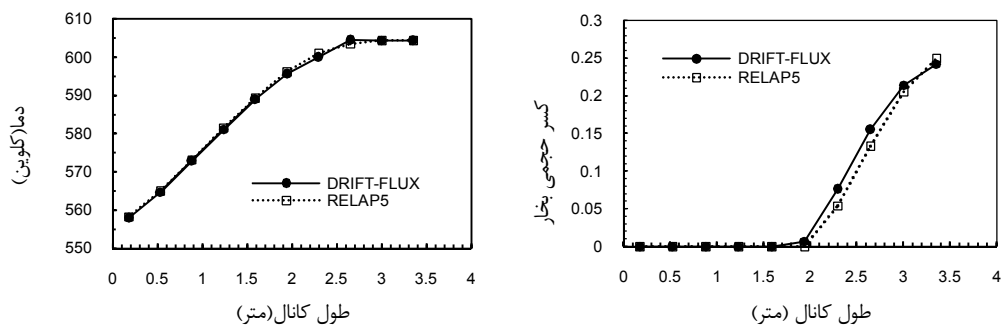
۳. نتایج



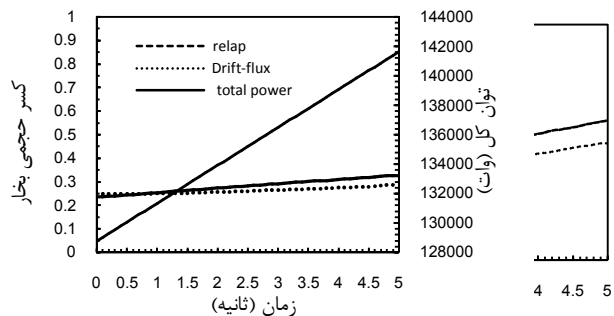
بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ و دانشگاه اصفهان

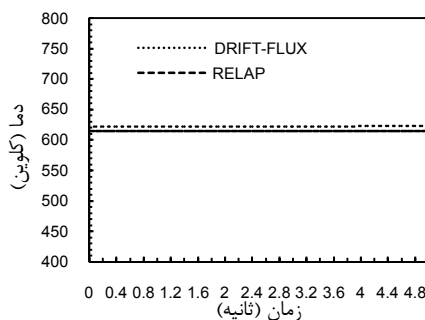
کانال در نظر گرفته شده دارای قطر هیدرولیکی و ارتفاعی به ترتیب معادل با ۱cm و ۳۵۳cm بوده که خنک کننده در دمای ۵۵۴ کلوین با دبی جرمی ۰/۳۷۴ kg/s وارد آن می شود. همچنین فشار خروجی برابر ۱۳/۰۵MPa در نظر گرفته شده است. در طول کانال، تغییرات محوری توان با اعمال فاکتورهای مناسب (Axial power peaking factor) محاسبه شده است [۱۱]. تغییرات توان نسبت به زمان به صورت خطی در نظر گرفته شده است (شکل ۳). به منظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده، مدل سازی مشابهی با کد [RELAP5] نیز انجام شده است. نتایج بدست آمده در حالت پایا برای کسر حجمی بخار، دمای سیال در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. تغییرات کسر حجمی بخار در طول کانال در حالت پایا شکل ۲. تغییرات دما در طول کانال در حالت پایا



شکل ۳. تغییرات کسر حجمی بخار در خروجی و توان تولیدی بر حسب زمان شکل ۴. تغییرات بیشینه دمای مرکز سوخت بر حسب زمان



شکل ۵. تغییرات بیشینه دمای سطح خارجی غلاف بر حسب زمان



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

پس از بررسی و مقایسه نتایج بدست آمده در حالت پایا، نتایج حاصل از اجرای برنامه نوشته شده در حالت گذرای توان و نتایج حاصل از کد RELAP5 برای کسر حجمی بخار، دمای سطح غلاف و بیشینه دمای مرکز سوخت در شکل‌های ۳ تا ۵ آورده شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۳ مشاهده می‌شود که با شروع حالت گذرا کسر حجمی بخار افزایش می‌یابد در حالیکه دمای سطح غلاف تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

۴. بحث و نتیجه گیری

با در نظر گرفتن اهمیت مدل‌سازی جریان‌های دوفازی، در این مقاله حل عددی جریان دوفازی تک بعدی در حالت گذرا در یک کانال گرم شونده با استفاده از روش Drift-Flux در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده در حالت پایا (شکل ۱) نشان می‌دهد که حجم کنترل ششم نقطه شروع جریان دوفازی است. همچنین با توجه به تغییرات دمایی شکل (۲) جریان سیال در حجم هشتم به حالت جوشش اشباع رسیده و دما پس از آن تقریباً ثابت باقی مانده است. لازم به ذکر است با توجه به اختلاف در مدل‌های به کار رفته (مدل دو سیاله و Drift flux) برای مقایسه بهتر میان نتایج لازم است شرایط مسأله تا حد امکان یکسان در نظر گرفته شود. به همین منظور علی‌رغم گستردگی روابط تجربی در متون علمی، در برنامه تدوینی سعی شده است تا حد امکان از روابط به کار رفته در کد RELAP5 استفاده شود.

۵. مراجع

- [۱] Ishii, M., Hibiki, T., " Thermo-fluid Dynamic Theory of Two-phase Flow", Paris, 1975.
- [۲] Zuber, N., Findlay, J.A., Average volumetric concentration in two-phase flowsystems, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 87, pp. 453–468, 1965.
- [۳] Takashi, H., Ishii, M., One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in varioustwo-phase flow regimes, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp. 4935–4948, 2003.
- [۴] Ghiaasiaan, S. M., Two-phase flow, Boiling and Condensation in Conventional and Miniature Systems. Cambridge University Press, 2008.
- [۵] Enrique Julia, J., Hibiki, T., Ishii, M., Byong-Jo, Y., Goon-Cherl, P., " Drift-flux model in a sub-channel of rod bundle geometry", International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 3032–3041, 2009.
- [۶] Talebi, S., Kazeminejad, H., "A new approach to two-phase flow analysis in a rod bundle", Nuclear Engineering and Design, 255, 263– 272, 2013.



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

- [۷] Enrique Julia, J., Hibiki, T., Ishii, M., Byong-Jo, Y., Goon-Cherl, P., " Drift-flux model in a sub-channel of rod bundle geometry", International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 3032–3041, 2009.
- [۸] Hagrman, D.L. , Reymann, G.A. , Mason, R.E. , “MATPRO-Version II (Revision 2): a Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior”, Idaho National Engineering Laboratories, NURBG/CR-0497 and TREE-1280, Revision 2, August 1980.
- [۹] Hibiki, T., Ishii, M., " Distribution parameter and drift velocity of drift-flux model in bubbly flow", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.45, pp. 707–721, 2002.
- [۱۰] Tong, L.S., "Boiling Heat Transfer and Two-phase Flow" ,John Wiley and Sons, Inc., New York, 1965.
- [۱۱] Todreas, N.E., Kazimi, M.S., Nuclear Systems I, Taylor & Francis, USA, 1989.
- [۱۲] Atomic Energy Organization of Iran, " Final Safety Analysis Report of Bushehr Nuclear Power Plant", Chapter 4, 2003.
- [۱۳] The RELAP5 Code Development Team. "RELAP5/MOD3 Code Manual Volume IV: Models and Correlations", Idaho National Engineering Laboratory, 1st Edition, 1995.