

## مدل سازی عددی جریان دو فازی سیال در یک کانال خنک کننده راکتور هسته‌ای در حالت پایا با استفاده از روش drift-flux

غنچه، باغبان\*؛ محسن، شایسته<sup>۲</sup>؛ رضا، سیاره<sup>۱</sup>؛ محمد مهدی، خلیفه شوشتری<sup>۳</sup>

۱ سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده چرخه سوخت

۲ سازمان انرژی اتمی، شرکت ساخت و راه اندازی نیروگاههای اتمی

۳ دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی، گروه مهندسی هسته‌ای

### چکیده

با توجه به اهمیت بررسی سیستم‌های دوفازی در راکتورهای هسته‌ای در حالت پایا و گذرا در این مقاله پارامترهای ترموهیدرولیکی جریان دو فازی در یک کانال خنک کننده در حالت پایا به دست آورده شده است. بدین منظور، پس از تقسیم کانال به تعداد مناسبی حجم کنترل معادلات بقا در حالت پایا جدا سازی شده و سپس با استفاده از روش *Drift-Flux* معادله‌ای، پارامترهای ترموهیدرولیکی از جمله کسر حجمی بخار، توزیع دمایی و افت فشار دو سر کانال محاسبه شده است. در نهایت برای اعتبار سنجی نتایج به دست آمده از نتایج شبیه سازی با کد *COBRA* استفاده شده است.

کلید واژه ها: مدل *Drift-Flux*، جریان دوفازی، حالت پایا، کسر حجمی بخار، کد *COBRA*

### ۱. مقدمه

با توجه به استفاده گسترده صنعت از سیستم‌های مهندسی که با جریان‌های دوفازی کار می‌کنند، طراحی بهینه و اطمینان از عملکرد ایمن این سیستم‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این میان مدل سازی جریان‌های دوفازی در کانال‌های قلب یک راکتور هسته‌ای نقش بسیار مهمی در بررسی عملکرد ایمن آن خواهد داشت. بدین منظور و برای به دست آوردن مشخصات جریان سیال بایستی معادلات بقا به شکل مناسبی نوشته شده و پس از حل این معادلات با استفاده از روش‌های عددی مناسب پارامترهای ترموهیدرولیکی سیال محاسبه گردد. تاکنون سه مدل اصلی برای حل معادلات حاکم بر جریان‌های دو فازی پیشنهاد شده است که این مدل‌ها عبارتند از: مدل تعادلی همگن (HEM)، مدل *Drift-Flux* [۱] و مدل دوسیاله [۲ و ۳]. برخلاف مدل تعادلی همگن، با در نظر گرفتن دو فاز به شکل کاملاً جدا از هم و نوشتن معادلات بقا به طور جداگانه برای هر فاز، می‌توان به نتایج دقیق‌تری رسید [۴]. برای این منظور لازم است سه معادله اصلی بقای جرم، انرژی و مومنتوم برای دو فاز حل گردد. با این وجود حل شش معادله بقا علاوه بر پیچیدگی محاسبات این مدل مشکلاتی از قبیل پایداری سیستم‌های عددی را به دنبال خواهد داشت [۵]. به همین دلیل روش *Drift-Flux*



که اولین بار توسط Zuber-Findlay [۲] ارائه گردید، توسعه چشمگیری یافته است. در این روش حرکت کل مخلوط توسط یک معادله بقای مومنتوم توصیف شده و سپس حرکت نسبی بین دو فاز به وسیله یک معادله مناسب سینتیکی کمکی مدل سازی می گردد. بنابراین قابلیت های اصلی این روش زمانی خود را نشان خواهد داد که حرکت بین دو فاز به درستی تخمین زده شود [۳]. روش Drift-Flux را می توان به شکل چهار (معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی مخلوط و یکی از معادلات بقا برای یکی از فازها) و پنج معادله ای (معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی مخلوط و دو تا از معادلات بقا برای یکی از فازها) نوشت. در این مقاله از روش ۴- معادله ای برای مدل سازی سیستم دو فازی استفاده شده است.

## ۲. روش کار

برای مدل سازی سیستم دو فازی، کانال خنک کننده ای با قطر هیدرولیکی و طول به ترتیب  $0.1m$  و  $3.5m$  در نظر گرفته شده و معادلات بقا در حالت یک بعدی به شکل زیر برای آن نوشته شده است [۱]:

- معادله بقای جرم مخلوط

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

در معادله ی فوق  $\rho_m$  و  $v_m$  به ترتیب دانسیته و سرعت مخلوط دو فازی است.

- معادله بقای جرم فاز گاز

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

در این رابطه،  $\Gamma$ ، نرخ خالص تولید بخار،  $\alpha$  کسر حجمی بخار،  $\rho_g$  و  $\rho_l$  دانسیته فاز گاز و مایع و  $\bar{V}_{gj}$  سرعت Drift متوسط فاز گاز است.

- معادله بقای مومنتوم مخلوط

$$\frac{\partial (v_m \rho_m)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m v_m^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{f_{TP} G_m^2}{2D_e \rho_m} - \rho_m g - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\alpha \rho_g \rho_l}{(1-\alpha)\rho_m} \bar{V}_{gj}^2 \right] \quad (3)$$

در معادله ی فوق  $g$  شتاب جاذبه،  $f_{TP}$  ضریب اصطکاک دو فاز،  $G_m$  سرعت جرمی مخلوط مایع و بخار،  $D_e$  قطر هیدرولیکی کانال و  $P$  فشار سیال است.

- معادله بقای انرژی مخلوط

$$\rho_m \frac{\partial h_m}{\partial t} + G_m \frac{\partial h_m}{\partial z} = \frac{q'' P_h}{A_z} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) \bar{V}_{gj} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) \bar{V}_{gj} \right] + \frac{\partial p}{\partial t} + \left[ v_m + \frac{\alpha(\rho_l - \rho_g)}{\rho_m} \bar{V}_{gj} \right] \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

در معادله فوق  $h_m$  آنتالپی مخلوط،  $q''$  شار حرارتی،  $A_z$  سطح مقطع کانال و  $P_h$  محیط کانال است. باتوجه به در نظر گرفتن حالت پایا در این مقاله، کلیه جملات مشتق وابسته به زمان در معادلات بالا حذف می گردد.

پس از آن با تقسیم بندی محوری کانال به تعداد مناسبی حجم کنترل، معادلات بقا جداسازی و حل شده است. در حل این معادلات از روش حجم محدود و تفاضلات مرکزی برای تخمین مقادیر مشتقات مکانی در هر حجم کنترل استفاده شده است. در نهایت پس از انتخاب معادلات کمکی مناسب شامل معادلات محاسبه پارامترهای ترمودینامیکی سیال، معادلات تخمین میزان انتقال حرارت بین دیواره کانال و سیال و... پارامترهای ترموهیدرولیکی سیال در کانال به دست آورده شده است. همچنین با توجه به غیر خطی بودن معادلات برای حل آن‌ها از روش‌های حدس و خطا استفاده شده است. 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:

$$\overline{V_{gj}} = \frac{\rho_m (V_{gj} + (C_0 - 1)v_m)}{\rho_m - (C_0 - 1)\alpha(\rho_l - \rho_g)} \quad (5)$$

در این رابطه  $V_{gj}$  سرعت Drift و  $C_0$  پارامتر توزیع است. این دو مقدار به ترتیب نشان دهنده حرکت نسبی دو فاز و اثرات کسر حجمی بخار می‌باشند. مقدار این دو پارامتر که به رژیم جریان، شکل هندسی کانال، فشار و دبی جرمی سیال بستگی دارد، از روابط تجربی به دست می‌آید. در این مقاله با توجه به گستره کاری از رابطه تجربی Chexal and Lellouche استفاده شده است [۶]. برای مدل‌سازی تولید بخار به منظور استفاده در معادله بقای جرم فاز گاز از مدل EPRI در این برنامه استفاده شده است [۷]. در این مدل فرض می‌شود تمام گرمای دیواره به فاز مایع منتقل گردد. بخشی از این گرما در حقیقت صرف تبخیر مایع گشته و بخش دیگر آن از طریق لایه مرزی و انتقال حرارت جابه‌جایی صرف گرم نمودن فاز مایع می‌گردد. براین اساس دو ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی تعریف می‌گردد. در صورتی که توده سیال در دمای اشباع قرار نداشته باشد، آهنگ تولید بخار و چگالش بخار در توازن با یکدیگر قرار خواهند گرفت. با در نظر گرفتن این موارد می‌توان آهنگ خالص تولید بخار را به وسیله رابطه زیر مدل‌سازی نمود:

$$\Gamma = \left( \frac{1}{h_{fg}(1 + \beta)} \right) \left( \frac{q'' H_m}{H_{tom} + H_{DB}} - \left( \frac{H_{DB} H_m}{H_{tom} + H_{DB}} + H_{HN} \right) (T_{sat} - T_l) \right) \quad (6)$$

$$\beta = \max\left(0, \frac{h_f - h_l}{h_g - h_l} \frac{\rho_l}{\rho_g}\right) \quad (7)$$

$$H_m = H_{tom} + 0.5 H_{DB} \quad (8)$$

$$H_{tom} = 1975.3 \exp\left(\frac{2P}{8.7}\right) (T_{wall} - T_{sat}) \quad (9)$$

$$H_{DB} = 0.023 \text{Re}_l^{0.8} \text{Pr}_l^{0.4} \frac{k_l}{D_h} \quad (10)$$

$$H_{HN} = 0.2 \text{Re}_l^{0.662} \text{Pr}_l \frac{k_l}{D_h} \quad (11)$$

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان دو فازی از طریق رابطه تجربی Chen به دست آمده است [۸]. در این روش ضریب جابه‌جایی حرارت به دو بخش تقسیم می‌شود: ۱- انتقال حرارت جابه‌جایی ناشی از



جوشش  $h_{NOB}$ ، ۲- انتقال حرارت جابجایی ناشی از جریان سیال که از رابطه (۱۰) بدست می آید. مقادیر این دو جمله عبارتند از:

$$h_{NOB} = 0.00122 \left[ \frac{k^{0.79} C_p^{0.45} \rho^{0.49} g^{0.25}}{\sigma^{0.5} \mu^{0.29} h_{fg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} \right] (T_{wall} - T_{sat})^{0.24} (P(T_{wall}) - P(T_{sat}))^{0.75} \times S \quad (12)$$

$$S = \begin{cases} (1 + 0.12 \text{Re}_{TP})^{-1.14}, & \text{Re}_{TP} < 32.5 \\ (1 + 0.42 \text{Re}_{TP}^{0.78})^{-1}, & 32.5 \leq \text{Re}_{TP} < 70 \\ 0.0797, & \text{Re}_{TP} \geq 70 \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{Re}_{TP} = \min(70, \text{Re}_f \times (F)^{1.25} \times 10^{-4}) \quad (14)$$

$$F = 2.35 \times (X_{tt}^{-1} + 0.213)^{0.736}, X_{tt}^{-1} = \left( \frac{x}{1-x} \right)^{0.9} \left( \frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.5} \left( \frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0.1} \quad (15)$$

پس از توسعه معادلات کمکی لازم و جداسازی معادلات بقا، برای حل معادلات، ابتدا دما و فشار تمام حجم کنترل ها حدس زده شده و سپس با توجه به خواص ترمودینامیکی به دست آمده از جدولی که بدین منظور تهیه شده است، فشار و دمای سیستم از حل معادلات بقا به دست خواهد آمد. علاوه بر این در هر مرحله کسر حجمی بخار و کیفیت غیر تعادلی بخار که به ترتیب نسبت حجم و جرم بخار به حجم و جرم مخلوط را نشان می دهد محاسبه خواهد شد. به این ترتیب پس از همگرایی جوابها برای هر حجم کنترل، پارامترهای ترموهیدرولیکی کانال به دست آورده خواهد شد. پس از یافتن دمای سیال، توزیع دمایی در سوخت از طریق حل معادله رسانش در حالت پایا و دو بعدی به دست آورده خواهد شد:

$$k \nabla^2 T + S = 0 \quad (16)$$

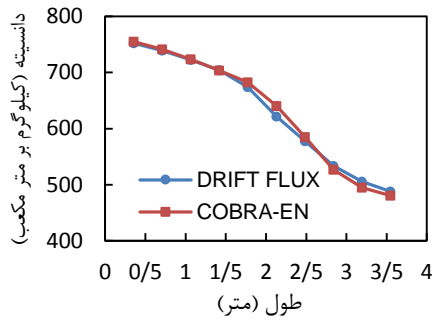
در این معادله  $k$  ضریب رسانش حرارتی مواد سازه حرارتی است که به صورت تابعی از دما در نظر گرفته می شود. شکل جداسازی شده این معادله با انتگرال گیری از هر یک از جملات معادله روی حجم سلول بدست می آید.

### ۳. نتایج

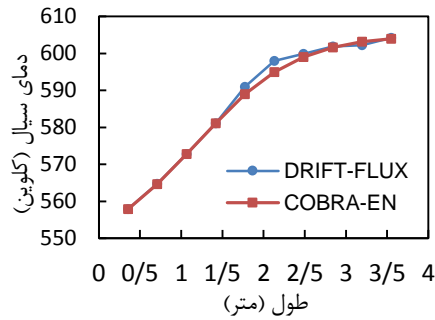
به منظور محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیکی سیستم های دوفازی با استفاده از روش **Drift-flux** جریان عبوری خنک کننده از یک کانال عمودی مدل سازی شده است. برای این کار برنامه کامپیوتری به زبان فرترن ۹۰ نوشته شده است. توزیع محوری توان در این کانال به شکل کسینوسی بوده و توان تولیدی آن  $69000 \text{ W}$  در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است خنک کننده در حالت مادون سرد و در دما و فشار به ترتیب  $554/15 \text{ k}$  و  $13/25 \text{ MPa}$  وارد کانال گردد. با وارد کردن این مقادیر به عنوان پارامترهای ورودی به برنامه نوشته شده توزیع دما و دانسیته در طول کانال به دست آورده شده است (شکل های ۱ و ۲). همچنین به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده پارامترهای سیستم در نظر گرفته شده با استفاده از کد ترموهیدرولیکی **COBRA-EN [۷]** نیز برای کانالی با همین مشخصات به دست آمده است. هرچند این کد اساساً برای



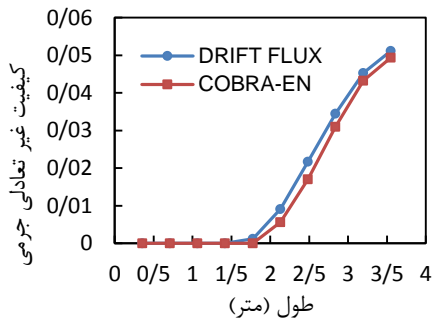
محاسبه پارامترهای مجتمع‌های سوخت به کار می‌رود با توجه به امکان استفاده از روابط مربوط به روش Drift-flux می‌توان با در نظر گرفتن یک کانال منفرد نتایج آن را با روش به کار رفته در این مقاله مقایسه نمود.



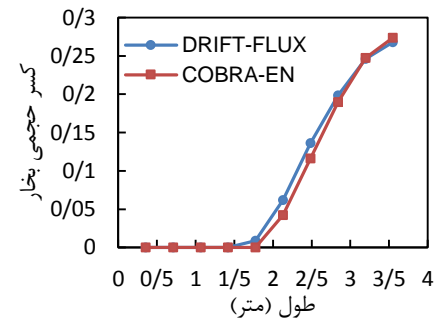
شکل ۲: توزیع دانسیته سیال در طول کانال



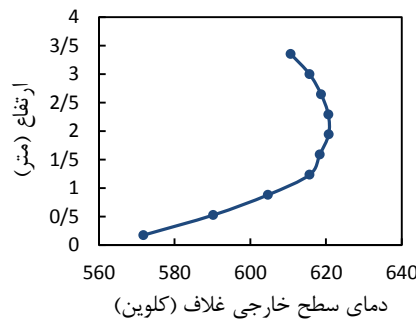
شکل ۱: توزیع دمای سیال در طول کانال



شکل ۴: توزیع دمایی سطح غلاف در طول کانال



شکل ۳: کسر حجمی بخار در طول کانال



شکل ۵: توزیع دمایی سطح غلاف در طول کانال

بدین منظور با نوشتن ورودی مناسب و در نظر گرفتن مشخصات کانال و جریان یکسان و همچنین استفاده از روابط تجربی تخمین کسر حجمی بخار و پارامترهای Drift مشابه، در کد COBRA نتایج این شبیه‌سازی نیز در شکل‌های مذکور آورده شده است. علاوه بر دما و دانسیته، کسر حجمی بخار و کیفیت غیر تعادلی در طول کانال در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها می‌توان پیش بینی نمود که





سیال در فاصله  $m$  ۵۸۸/۱ از ابتدای کانال دو فازی خواهد شد. نمودار توزیع دمای سطح غلاف نیز در شکل (۵) نشان داده شده است.

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

معادلات بقا به عنوان معادلات اصلی توصیف کننده جریان سیال دوفازی در یک کانال عمودی با استفاده از روش Drift-Flux در این مقاله بررسی شده و در نهایت نتایج به دست آمده در هر مرحله از کار با داده‌های به دست آمده از شبیه سازی با کد COBRA-EN مقایسه گردیده است. روش Drift-Flux در میان روش‌های دیگر از جمله روش دو سیاله دارای مزایایی از جمله پیچیدگی کمتر محاسبات و پایداری بیشتر روش‌های عددی است. علاوه بر این در این روش به تخمین تعداد کمتر جملات مرتبط کننده فازها (inter-phase) نیاز است و بنابراین محاسبات تا حد زیادی ساده‌تر خواهد بود. هرچند در سیستم‌های دو فازی با کسرهای حجمی بالا روش Drift-Flux نمی‌تواند نتایج دقیقی داشته باشد، با توجه به گستره کاری راکتورها، خصوصاً راکتورهای آبی تحت فشار (کسرهای حجمی نسبتاً پایین) می‌توان از این روش در تخمین پارامترهای سوخت و جریان سیال استفاده نمود.

#### ۵. مراجع

- [۱] Ishii, M., Thermo-fluid Dynamic Theory of Two-phase Flow, Eyrolles, Paris, ۱۹۷۵
- [۲] Zuber, N., Findlay, J.A., Average volumetric concentration in two-phase flow systems, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. ۸۷, pp. ۴۵۳-۴۶۸, ۱۹۶۵.
- [۳] Takashi, H., Ishii, M., 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, Vol. ۴۶, pp. ۴۹۳۵-۴۹۴۸, ۲۰۰۳.
- [۴] Brooks, S., Paranjape, S., Basar, O., Takashi, H., Ishii, M., Two-group drift-flux model for closure of the modified two-fluid model, International Journal of Heat and Fluid Flow Vol. ۲۷, pp. ۱۹۶-۲۰۸, ۲۰۱۲.
- [۵] Song, J.H., A remedy for the ill-posedness of the one-dimensional two-fluid model, Nuclear Engineering and Design, Vol. ۲۲۲, pp. ۴۰-۵۳, ۲۰۰۳.
- [۶] Chexal, B., Lellouche, G., Horowitz, J., Heizer, J., A void fraction correlation for generalized applications, progress in nuclear engineering, Vol. ۲۷, pp. ۲۵۷-۲۹۴, ۱۹۹۲.
- [۷] Basile, D., Beghi, M., Chierici, R., Salina, E., and Brega, E., COBRA-EN Manual, an Upgraded Version of the COBRA-۳C/MIT Code for Thermal-Hydraulic Transient Analysis of Light Water Reactor Fuel Assemblies and Cores, Oak Ridge National Laboratory, ۱۹۹۹.
- [۸] Todreas, N.E., Kazimi, M.S., Nuclear Systems I, Taylor & Francis, USA, ۱۹۸۹.