

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

## بررسی مدل جسم متخلخل در تحلیل ترموهیدرولیکی مولد بخار نیروگاه هسته‌ای بوشهر بکمک دینامیک سیالات محاسباتی

کمالی نیا، امیر حسین\*<sup>(۱)</sup> - ربیعی، عطاله<sup>(۱)</sup> - حداد، کمال<sup>(۱)</sup>

<sup>(۱)</sup> دانشگاه شیراز، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، گروه مهندسی هسته‌ای

### چکیده:

تحلیل ترموهیدرولیک با هدف ایجاد مدلی مناسب در پیش‌بینی پراکندگی بخار در فضای مولد بخار، به عنوان کامل‌کننده‌ی سیکل تولید بخار نیروگاه هسته‌ای، می‌تواند طراحی و بررسی این جزء مهم از نیروگاه را تحت تاثیر قرار دهد. پیچیدگی بالادر هندسه مولد بخار در کنار تعداد زیاد لوله‌ها بر دشواری هر چه بیشتر تحلیل‌های عددی می‌افزاید. در پژوهش حاضر بکمک دینامیک سیالات محاسباتی، دسته لوله‌ها به عنوان جسم متخلخل فرض شده‌اند و کاهش دامنه محاسباتی با اعمال شرایط مرزی مناسب مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده گردید که کسر حجمی بخار بدست آمده در مقایسه با فعالیت‌های عددی مشابه تطبیق مناسب‌تری را نسبت به نتایج تجربی ارائه می‌نماید.

**کلمات کلیدی:** مولد بخار، دینامیک سیالات محاسباتی، جسم متخلخل.

### مقدمه:

در سال‌های اخیر با گسترش مطالعات عددی و ایجاد زیرساخت‌های رایانه‌ای، تلاش‌هایی برای ایجاد مدل سه‌بعدی مولد بخار انجام گرفته است. در این راستا از مدل‌های بيشماری بهره گرفته شده است تا با کمک نرم‌افزارهای متداول و قدرتمند دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> بتوان درک صحیحی از روند کارکرد مولد بخار در سه بعد بدست آورد. تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی جریان دوفازی آب و بخار در مولدهای بخار به علت کمبود وسایل آزمایشگاهی مناسب، همچنین مشکلات مرتبط با اندازه‌گیری‌ها در نیروگاه‌های هسته‌ای محدود می‌باشند. از طرف دیگر تحلیل عددی جریان دوفازی در یک هندسه سه بعدی با این حد پیچیدگی چالش برانگیز است. با توجه به اهمیت کیفیت بخار در نیروگاه، توزیع بخار در مولدهای بخار، نیاز به تحقیقاتی با جزئیات بیشتر دارد. استوسپیچ و همکارانش [۱] یکی از کاملترین مدل‌سازی‌های جسم‌های پیچیده بر اساس جسم متخلخل را ارائه دادند. این مدل‌سازی با هدف شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی اجسام پیچیده بخصوص دسته لوله‌های موجود در مبدل‌های حرارتی از نوع پوسته لوله می‌باشد. لازم به ذکر است که در این

<sup>۱</sup> CFD

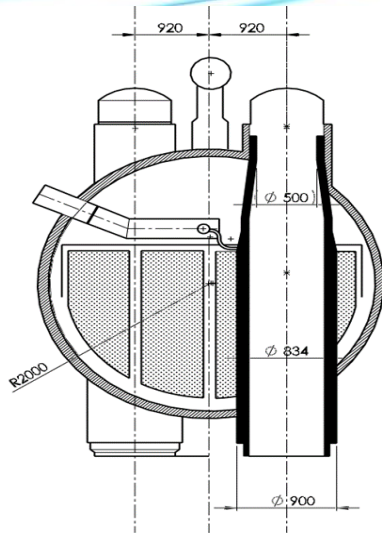
۱۶ و ۱۷ شهریور ماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

پژوهش با شبیه سازی چند مثال نمونه، اعتبارسنجی این مدل سازی بررسی شده است. پژوهش و همکارانش [۲] مدل سازی ریویولر کتل را در دو بعد مورد بررسی قرار دادند. جریان دوفازی لوله های انتقال حرارت با استفاده از معادلات حاکم بر جسم متخلخل مدل سازی شده است. در این پژوهش با استفاده از مدل حجم محدود، تحلیل عددی با تقریب بسیار مناسبی پراکندگی بخار در دو بعد را گزارش می دهد. سیموویچ و همکارانش [۳] روابطی برای جریان دوفازی عمود بر دسته لوله های افقی را مورد بررسی قرار دادند. آن ها مدل سازی جریان در مولدهای بخار و گرمکن ها را مبنای پژوهش خود قرار دادند. مدل سازی ارائه شده توسط آن ها به خوبی با نتایج آزمایشگاهی منطبق بوده است. مک نیل و همکارانش [۴ و ۵] با استفاده از آزمایشات انجام گرفته بر عبور جریان دوفازی از دسته لوله ها روابط متفاوتی را برای رژیم های جریان متغوت جریان دوفازی ارائه داده اند. در این پژوهش سعی شده است با در نظر گرفتن روابط بین فازی و روابط تجربی بدست آمده در پژوهش های آزمایشگاهی و با در نظر گرفتن جسم متخلخل و جایگزینی روابط حاکم بر جسم متخلخل، پراکندگی کسر حجمی بخار در مولد بخار با نتایج اندازه گیری شده در پژوهش های مشابه بعنوان یک پارامتر مهم در طراحی و بررسی ایمنی مولدهای بخار مورد مقایسه قرار گیرد. در ادامه تلاش شده با توجه به اهمیت شرایط مرزی خروجی با توجه به پژوهش انجام گرفته توسط مک نیل و همکارانش [۵] جریان برگشتی به مولد بخار در بالای دسته لوله ها بخار اشیاع بعنوان پارامتر موثر در بالابردن دقت نتایج و کاهش دامنه محاسباتی در نظر گرفته شود. جهت شبیه سازی میدان جریان در مولد بخار از معادلات متوسط گیری شده ی ناویر استوکس در سه بعد استفاده شده است که به آن پرداخته می شود.

## هندسه و شرایط مرزی :

در این پژوهش با توجه به در دسترس بودن مشخصات لازم، مولد بخار نیروگاه بوشهر مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل او جدول ۱ به ترتیب مشخصات و شمای کلی مولد بخار بوشهر را نشان می دهد.

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

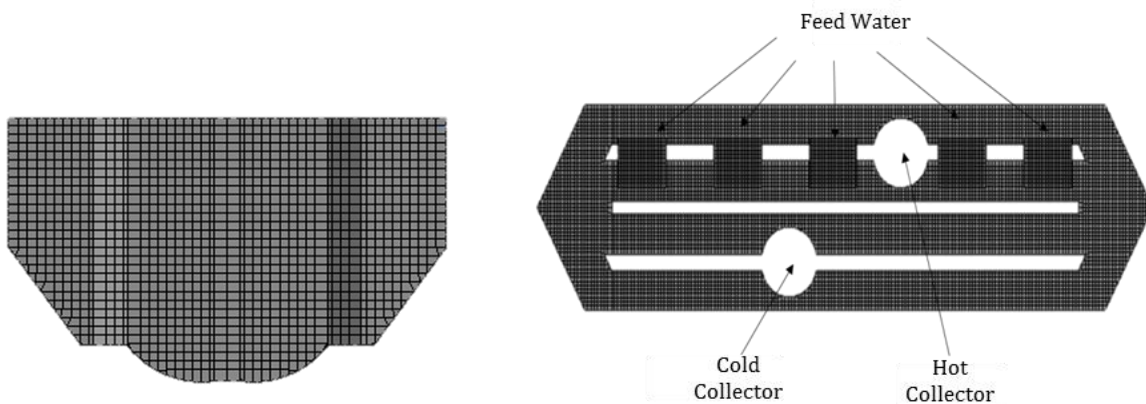


شکل (۱) مولد بخار بوشهر

جدول (۱) مشخصات کامل مولد بخار بوشهر

مقدار	پارامتر
۷۵۳	توان حرارتی، MW
۶/۲۷	فشار بخار خروجی، MPa
۳۲۱	دمای ورودی خنک کننده، C
۲۹۱	دمای خروجی خنک کننده، C
۲۲۰	دمای آب تغذیه، C
۲/۶	سطح آب استاندارد مولد بخار، m
۱۵/۷	فشار خنک کننده اولیه در ورودی مولد بخار، MPa

با توجه به پاشش آب تغذیه در بالای دسته لوله های گرم (نزدیک به کلکتور گرم) ورود آب با توجه به شرایط ذکر شده در جدول ۱ از طریق چشمه ی جرمی به صورت نشان داده شده در شکل ۳ تعریف شده است. شبکه بندی ایجاد شده در پژوهش حاضر از حدود ۵۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی تشکیل شده است. مقطعی از شبکه ی ایجاد شده در این پژوهش در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۴) نمایی از شبکه

شکل (۳) ورودی آب تغذیه

معادلات حاکم :

۱۶ و ۱۷ شهریور ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

در مدل‌سازی میدان جریان از معادلات متوسط گیری شده‌ی ناویر استوکس حاکم بر جریان دوفازی میدان جریان استفاده شده است. مدل‌سازی انجام گرفته بر اساس دیدگاه اوایلرین - اوایلرین انجام گرفته است. با توجه به اینکه در این پژوهش از معادلات حاکم بر جسم متخلخل برای تحلیل پارامترهای میدان جریان بهره گرفته شده است معادلات سه گانه‌ی بقا برای فاز  $q$  می‌تواند به صورت زیر بیان شود.

معادله‌ی پیوستگی

$$\frac{\partial(\gamma\alpha_q\rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma\alpha_q\rho_q\vec{v}_q) = \gamma \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + \gamma S_q \quad (1)$$

در این معادله  $\gamma$  نشان‌دهنده‌ی تخلخل و  $\alpha_q$  و  $\rho_q$  به ترتیب کسر حجمی و چگالی فاز  $q$  می‌باشد و  $\dot{m}_{pq}$  نشان‌دهنده‌ی نرخ انتقال جرم از فاز  $p$  به فاز  $q$  و  $S_q$  چشمه‌ی جرمی می‌باشد.

معادله‌ی مومنتوم

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\gamma\alpha_q\rho_q\vec{v}_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma\alpha_q\rho_q\vec{v}_q\vec{v}_q) \\ & = -\gamma\alpha_q\nabla p + \nabla \cdot (\gamma\vec{\tau}_q) + \gamma\alpha_q\rho_q\vec{g} + \gamma \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq}\vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp}\vec{v}_{qp}) \\ & + \gamma(\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q}) + \alpha_q \left( \left( \frac{\mu}{\alpha} + \frac{C_2\rho}{2} |\vec{v}_q| \right) \vec{v}_q \right) \end{aligned} \quad (2)$$

در این معادله ترم آخر ناشی از چشمه‌ی مورد استفاده برای جسم متخلخل می‌باشد که در آن  $\mu$  ویسکوزیته،  $\alpha$  نفوذپذیری و  $C_2$  ضریب اینرسی می‌باشد.

معادله‌ی بقای انرژی

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\gamma\alpha_q\rho_q h_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma\alpha_q\rho_q\vec{v}_q h_q) \\ & = -\gamma\alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + (\gamma\vec{\tau}_q : \nabla\vec{v}_q) + \gamma S_q - \nabla \cdot (\gamma\vec{q}_q) + \gamma\alpha_q\rho_q\vec{g} + Q_{sp} \\ & + \gamma \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq}h_{pq} - \dot{m}_{qp}h_{qp}) \end{aligned} \quad (3)$$

در این معادله  $h_q$  آنتالپی فاز  $q$  و  $Q_{sp}$  شار حرارتی از جامد به هر کدام از فازها و ترم آخر نشان‌دهنده‌ی انتقال حرارت بین فازی می‌باشد.

• تخلخل :

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

با توجه به اینکه دسته لوله‌های تعبیه شده در ریبویلرهای کتل دارای آرایش مثلثی می باشند. در نتیجه می توان از معادله‌ی ارائه شده توسط مکنیل و همکارانش [۵] در بدست آوردن مقدار تخلخل بهره جست:

$$\gamma = 1 - \varphi_3 \quad (4)$$

$$\varphi_3 = \frac{\pi D^2}{4 P_x P_y} \quad (5)$$

در معادله‌ی ۵، D قطر لوله و  $P_x$  و  $P_y$  بترتیب مقدار گام دسته لوله‌ها در جهت X و Y می‌باشد.

### • جریان جرمی در فصل مشترک :

تغییرات فاز در میدان جریان دوفازی با استفاده از یک معادله‌ی تجربی ساده شبیه سازی شده است. انتقال جرم ناشی از چشمه‌ی حرارتی عبارتست از:

در شرایطی که آنتالپی سلول محاسباتی بزرگتر از آنتالپی مایع اشباع باشد ( $h_1 > h'$ ). داریم:

$$\Gamma_e = \frac{\alpha_1 \rho_1 h_1 - h'}{\tau_e h'' - h'} \quad (6)$$

و در شرایطی که آنتالپی سلول محاسباتی کوچکتر از آنتالپی بخار اشباع باشد ( $h_1 > h'$  و  $\alpha_2 > 0$ ). داریم:

$$\Gamma_c = \frac{\alpha_1 \rho_1 h' - h_1}{\tau_c h'' - h'} \quad (7)$$

### • چشمه‌ی حرارتی :

مقدار چشمه‌ی حرارتی ناشی از گرمای حاصل در لوله‌های انتقال حرارت به هر کدام از فازها برابر است با: [۲]

$$\dot{q}_{AK} = h(T_3 - T_k) \quad (8)$$

ضریب انتقال حرارت از دیوراه‌ی لوله‌های انتقال حرارت عبارتست از:

$$h = f(p) q_A^n \quad (9)$$

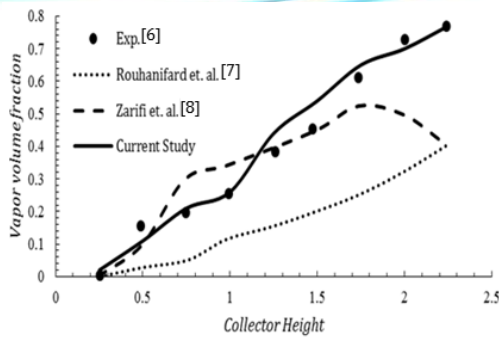
$$f(p) = 4.32(p^{0.14} + 1.28 \times 10^{-2} p^2), \quad n = 0.7 \quad (10)$$

p فشار بر حسب مگاپاسکال و q شار گرمایی بر حسب  $W/m^2$  می باشد

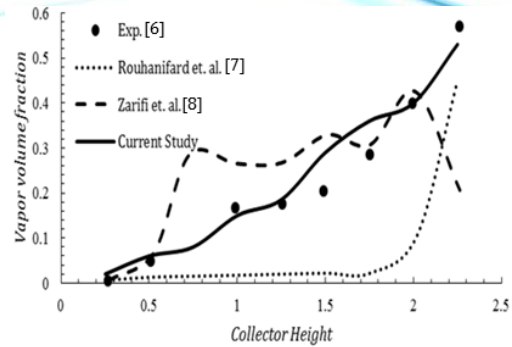
### نتایج :

پراکندگی فاز بخار در مولد بخار می‌تواند در نوع طراحی و کیفیت بخار تولیدی نقش بسزایی را ایفا کند. شکل‌های ۵ و ۶ توزیع کسر حجمی بخار در ارتفاع‌های متفاوت مولد بخار در نزدیکی کلکتور سرد و گرم را نشان می‌دهند.

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ و آنگاه نزد

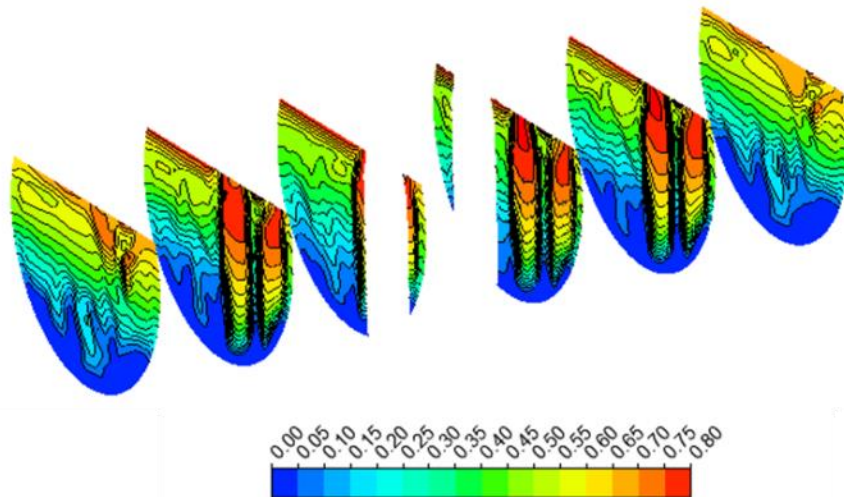


شکل (۶) کسر حجمی بخار در اطراف کلکتور گرم



شکل (۵) کسر حجمی بخار در اطراف کلکتور سرد

همانطور که مشاهده می شود نتایج بدست آمده نشان می دهد تحلیل ترموهیدرولیکی مولد بخار با استفاده از تئوری جسم متخلخل در سه بعد می تواند مقادیر کسر حجمی بخار را در ارتفاع های مختلف با دقت بسیار بهتری نسبت به مدل های تعریف شده در کدهای یک بعدی پیش بینی کند. شکل ۷ نشان دهنده ی توزیع کسر حجمی بخار در فضای مولد بخار افقی می باشد.



شکل (۷) کسر حجمی بخار در طول مولد بخار

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می شود در سمت گرم مولد بخار بدلیل وجود شار حرارتی بالاتر کسر حجمی بخار غالب می باشد.

نتیجه گیری :

۱۶ و ۱۷ شهریورماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

بررسی پارامترهای ترموهیدرولیکی در مولد بخار در طراحی و تحلیل ایمنی نیروگاه دارای اهمیت فراوان می باشد. تحلیل میدان جریان در سه بعد با توجه به پیچیدگی های بالای مولد بخار دارای دشواری های بیشماری در ایجاد شبکه و تحلیل عددی می باشد. در تحلیل حاضر با در نظر گرفتن لوله های انتقال حرارت به عنوان جسم متخلخل و در نظر گرفتن روابط مرتبط علاوه بر کاهش زمان روند محاسبات، نتایج مناسبی در مقایسه با نتایج تجربی و عددی مرتبط بدست آمد. استفاده از مرز خروجی بخار اشیاع در تحلیل حاضر می تواند مشکلات تحلیل عددی با تعداد سلول های محاسباتی بالا را بهبود بخشد. با توجه به شکل های ۵ و ۶ مشاهده می شود که شبیه سازی انجام گرفته به خوبی قابلیت پیش بینی کسر حجمی بخار در مولد بخار را دارد. مقایسه ی نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که شبیه سازی دسته لوله های مولد بخار، با فرض جسم متخلخل، می تواند علاوه بر کاهش مدت زمان ایجاد یک شبکه ی مناسب در هندسه های پیچیده، زمان انجام محاسبات تا رسیدن به جوابی مناسب تر را به صورت قابل ملاحظه ای کاهش دهد.

## مراجع:

- [1] Stosic, Z.V., Stevanovic, V.D., "Advanced three-dimensional two-fluid porous media method for transient two-phase flow thermal-hydraulics in complex geometries", Numerical Heat Transfer, 41 (3-4), pp.263-289, 2002.
- [2] Pezo, M., Stevanovic, V., Stevanovic, Z., "A two-dimensional model of the kettle reboiler shell side thermal-hydraulics", Int. J. Heat Mass Transfer 49 (7-8), pp. 1214-1224, 2006.
- [3] Simovic, Z., Ocoolkjic, S., Stevanovic, V., "Interfacial friction correlation for two phase flow across tube bundle", International Journal of Multiphase Flow 33, pp. 217-226, 2007.
- [4] McNeil, D.A., Bamardouf, K., Burnside, B.M., Almehaal, M., "Investigation of flow phenomena in a kettle reboiler", Int. J. Heat Mass Transfer 53, pp. 836-848, 2010.
- [5] McNeil, D.A., Bamardouf, K., Burnside, B.M., "Two-dimensional flow modeling of a thin slice kettle reboiler", International Journal of Heat Mass Transfer 54, pp. 1907-1923, 2011.
- [6] Ghazanfari, V., Ansarifard, G.R., Esteki, M.H., "Drift flux modeling of the VVER-1000 horizontal nuclear steam generator", Progress in Nuclear Energy, Volume 76, pp. 36-43, 2014.
- [7] Rouhanifard, S.A., Kazanter, A.A., Sergeer, V. V., RELAP5 modeling of the nuclear power plant VVER-1000 steam generator, Thermo Physics Journal 3, pp. 250-257, 2001.
- [8] Zarifi, E., Jahanfarnia, G.R., Mousavian, S. K., D'Auria, F., "Semi 2D modeling of the horizontal steam generator PGV-1000 using the RELAP5 code", Progress in Nuclear Energy 51, pp.788-798, 2009.