



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## حل عددی جریان‌های دوفاز در مولد بخار هسته‌ای با استفاده از مدل شار رانشی

ولی اله غضنفری: منصور طالبی: محمد حسین استکی: غلامرضا انصاری فر: منوچهر بهفرنیا

۱- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

۲- دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

### چکیده:

در این مقاله مولد بخارافقی VVER-1000 با استفاده از مدل شار رانشی تحلیل ترموهیدرولیکی شده است. برای شبیه‌سازی مولد بخار از نرم‌افزار معتبر FLUENT بهره‌گیری شده است. با نوشتن UDF به زبان برنامه‌نویسی ++C معادلات شار رانشی و سرعت‌های لغزشی در نرم‌افزار اعمال می‌شود. با توجه به اینکه اعتبار و برتری مدل شار رانشی نسبت به مدل‌های دوفازی دیگر در مسائل مختلف به اثبات رسیده است برای تحلیل ترموهیدرولیکی در مولد بخار هسته‌ای از این مدل جدید استفاده شده است. نتایج بدست آمده از کار حاضر با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج سایر کارهای تحقیقاتی مقایسه گردیده و دقت مدل شار رانشی برای تحلیل مولدهای بخار هسته‌ای اثبات می‌گردد.

کلیدواژه: مولد بخار VVER-1000، جریان دوفازی، مدل شار رانشی، انتقال حرارت

$$\frac{\partial \langle \rho_m \rangle}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\langle \rho_m \rangle \bar{v}_m) = 0 \quad (1)$$

معادله پیوستگی فاز گازی:

$$\frac{\partial \langle \alpha_g \rangle \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\langle \alpha_g \rangle \rho_g \bar{v}_m) = \langle \Gamma_g \rangle - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\langle \alpha_g \rangle \rho_g \rho_f}{\langle \rho_m \rangle} \bar{v}_{gj} \right) \quad (2)$$

معادله ممتو مخلوط:

$$\frac{\partial \langle \rho_m \rangle \bar{v}_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\langle \rho_m \rangle \bar{v}_m^2) = - \frac{\partial}{\partial z} \langle \rho_m \rangle + \frac{\partial}{\partial z} \langle \tau_{zz} + \tau_{zz}^T \rangle - \langle \rho_m \rangle g_z - \frac{f_m}{2D} \langle \rho_m \rangle \bar{v}_m^2 - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\langle \alpha_g \rangle \rho_g \rho_f}{(1 - \langle \alpha_g \rangle) \langle \rho_m \rangle} \bar{v}_{gj}^2 \right] \quad (3)$$

معادله آنتالپی - انرژی مخلوط:

$$\frac{\partial \langle \rho_m \rangle \bar{h}_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\langle \rho_m \rangle \bar{h}_m \bar{v}_m) = - \frac{\partial}{\partial z} (q + q^T) + \frac{q''_{\xi h}}{A} - \frac{\partial}{\partial z} \frac{\langle \alpha_g \rangle \rho_f \rho_g}{\langle \rho_m \rangle} \Delta h_{gf} \bar{v}_{gj} + \langle \phi_m^u \rangle \quad (4)$$

تأثیرات پخش در فرمول‌های حاضر در ترم‌های سرعت رانشی ( $\bar{v}_{gj}$ ) ظاهر می‌گردند که فرم تابع آن به صورت زیر است:

$$\bar{v}_{gj} = \bar{v}_{gj}(\langle \alpha_g \rangle, \langle \rho_m \rangle, g_z, \bar{v}_m, \text{etc.}) \quad (5)$$

برای در نظر گرفتن انتقال جرم در سراسر سطح، چشمه جرمی فاز گازی  $\langle \Gamma_g \rangle$  باید داده شود که تابعی از کمیت‌های زیر است:



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

$$\langle \Gamma_g \rangle = \langle \Gamma_g \rangle \left( \langle \alpha_g \rangle, \langle \rho_m \rangle, \bar{v}_m, \frac{\partial \langle \rho_m \rangle}{\partial t}, \text{etc.} \right) \quad (6)$$

قابلیت استفاده از مدل شار رانشی برای سیستم‌های گوناگون و با هندسه‌های مختلف اهمیت فراوانی دارد. در ابتدا، این مدل برای هندسه‌های خاص مانند لوله‌های با قطر کم قابل استفاده بوده است. اگر قطر لوله‌ها بزرگ‌تر از قطر معینی می‌شد جریان لخته‌ای ناپایدار می‌شد؛ بنابراین برای شبیه‌سازی مولد بخار افقی که دارای قطرهای هیدرولیکی مختلفی است به مشکل بر می‌خوریم. در مولد بخار فضای بین لوله‌ها با یکدیگر را به عنوان یک قطر هیدرولیکی و فضای بین لوله‌ها و پوسته مولد بخار را به عنوان قطرهای هیدرولیکی مختلف در نظر می‌گیریم. همان طور که گفته شد مشکل ناپایداری در قطرهای بزرگ و به خصوص برای کسر خلأهای بزرگ اتفاق می‌افتد. این مشکل را در نظر گرفتن تأثیرات مختلف از قبیل تأثیر دیواره لوله‌ها و تأثیر جریان توربولانسی حل خواهد شد [6].

Hibiki و Ishii در سال ۲۰۱۰ مدل شار رانشی را برای قطرهای مختلف هیدرولیکی و برای رژیم‌های مختلف جریان دو فازی توسعه داده‌اند [6]. سرعت رانشی برای جریان لخته‌ای در دو حالت با قطرهای بزرگ و کوچک بیان شده است:

۱- سرعت رانشی در جریان لخته‌ای برای لوله‌های با قطر کم:

$$v_{gj} = 0.35 \sqrt{\frac{gD \Delta \rho}{\rho_f}} \quad (7)$$

۲- سرعت رانشی در جریان لخته‌ای برای لوله‌های با قطر زیاد:

$$v_{gj} = 0.0019 \{ \min(D_H^*, 30) \} \left( \frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2} \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-0.157} N_{\mu f}^{-0.562} \quad (8)$$

$$N_{\mu f} = \frac{\mu_f}{(\rho_f \sigma \sqrt{g \Delta \rho})^{\frac{1}{2}}} \text{ و } D_H^* = \frac{D_H}{\sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}}} \geq 40 \quad (9 \text{ و } 10)$$

روابط سرعت رانشی بدست آمده برای جریان لخته‌ای در دو حالت با قطرهای بزرگ و کوچک با نوشتن UDF به زبان C++ و کوپل آن با نرم‌افزار، وارد حل عددی شده و باعث دقیق‌تر شدن حل می‌شود.

## روش کار

مولد بخار مورد بررسی در این پروژه مولد بخار PGV-1000 است. این مولد بخار ساخت روسیه و از نوع افقی است. مولد بخار یک نوع مبدل حرارتی تماس غیرمستقیم به حساب می‌آید. مشخصات هندسی و ترموهیدرولیکی جریان‌های موجود در مولد بخار در جدول ۱ و ۲ به صورت کامل آورده شده است. در این پروژه جریان‌های سیال در طرف ثانویه مولد بخار شبیه‌سازی شده است. طرف ثانویه مولد بخار بر خلاف طرف اولیه، یک جریان دو فازی است. روند کار به این صورت که پس از رسم مدل و شبکه‌بندی آن، معادلات پیوستگی، ممتوم و انرژی حل شده‌اند. به‌دلیل پیچیدگی‌های هندسی برای رسم مدل از نرم‌افزار CATIA استفاده شده است. این نرم‌افزار قابلیت



# بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

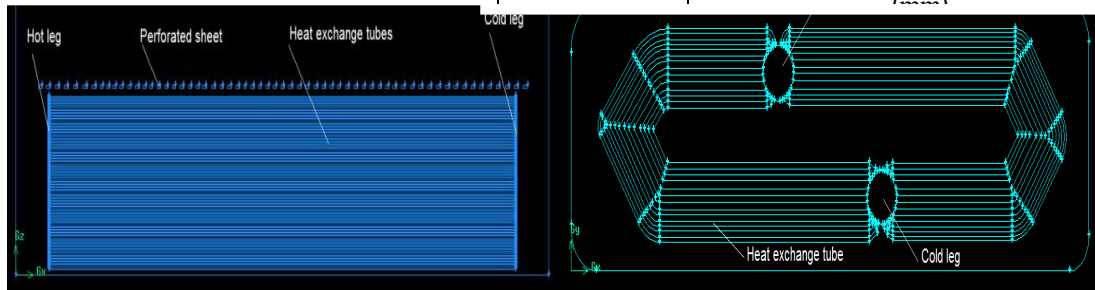
۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

رسم هرگونه هندسه باهر میزان پیچیدگی را دارد. برای شبیه سازی حاضر، مدل در دو نمای X-Y و X-Z رسم گردیده و وارد نرم افزار GAMBIT شده است (شکل ۱ و شکل ۲).

جدول ۲: مشخصات ته مه هیدرو لیکر، مه لد بخار

جدول ۱: مشخصات هندسی مولد

VVER-1000	پارامتر	VVER-1000	پارامتر
۷۵۰	قدرت حرارتی (MW)	۱/۵×۱۶	قطر و ضخامت دیواره لوله ها (mm)
۶/۲۷	فشار بخار (MPa)	۱۱/۱۰	طول متوسط لوله ها (m)
۱۶۴-۲۲۰	دمای آب تغذیه (°C)	زیگزاگ	آرایش تیوپ ها در بسته لوله ها
۳۲۰	دمای خنک کننده به مولد بخار (°C)	۱۹	- گام شبکه در امتداد محور عمودی (mm)
۲۱۲۰۰	دبی خنک کننده ( $\frac{m^3}{hr}$ )	۲۳	- گام شبکه در امتداد محور افقی



شکل ۱: مولد بخار رسم شده در نمای X-Y شکل ۲: مولد بخار رسم شده در نمای X-Z

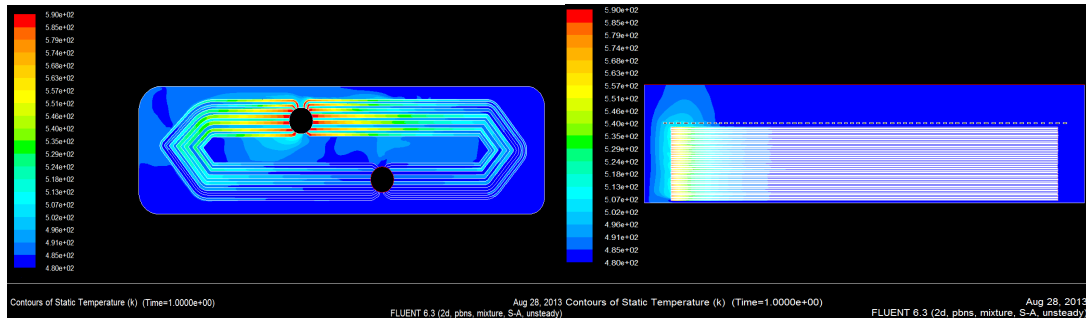
## نتایج

در این قسمت به تحلیل حرارتی مولد بخار پرداخته می شود. تغییرات دمایی در مولد بخار بین ۴۸۰ تا ۵۹۰ درجه کلوین است که آب تغذیه ورودی با دمای ۴۸۰ و خنک کننده رآکتور که در قسمت داغ مولد بخار وارد می گردد دمایی برابر با ۵۹۰ درجه کلوین دارد. همان طور که مشاهده می شود با دور شدن از پایه داغ به طرف پایه سرد از دمای بخار کاسته می شود زیرا شار حرارتی در پایه داغ بیشتر از پایه سرد است. در شکل های ۳ و ۴ توزیع دما در دو نمای X-Y و X-Z در مراحل ابتدایی حل نشان داده شده است. هدف از این قسمت نشان دادن چگونگی روند حل مسئله به صورت مرحله به مرحله است.

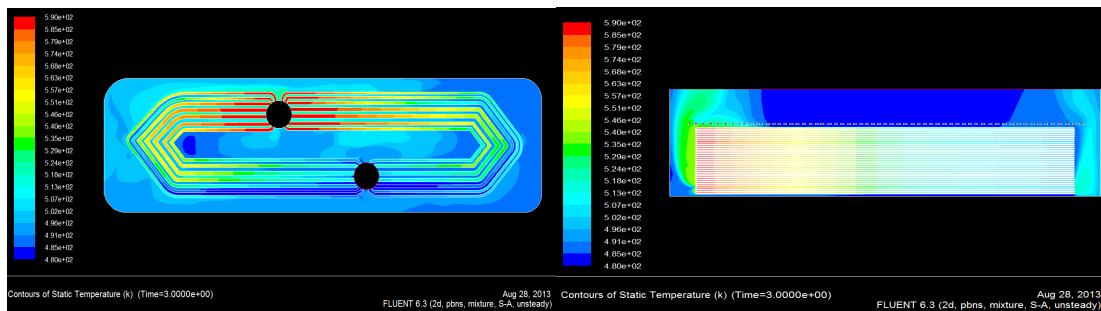


# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

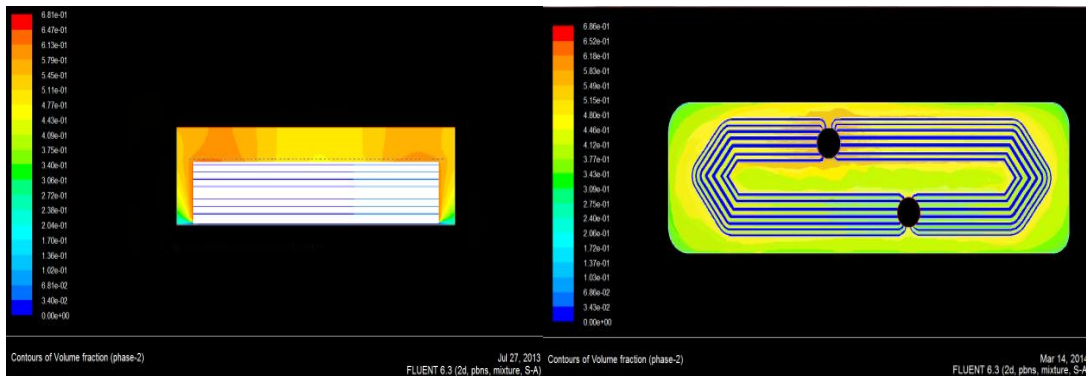


شکل ۳: توزیع دما در مولد بخار در مرحله اول حل



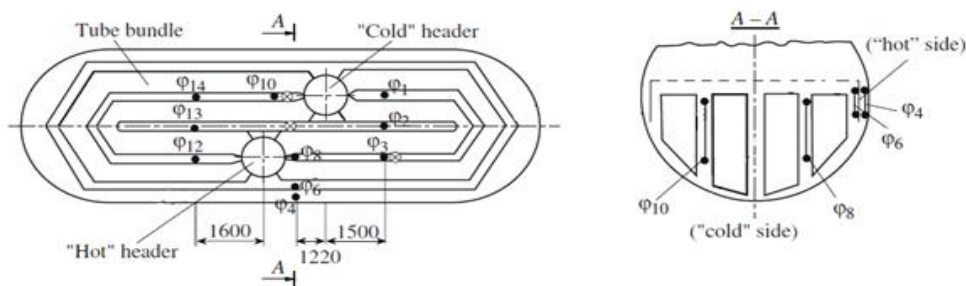
شکل ۴: توزیع دما در مولد بخار در مرحله دوم حل

برای بررسی صحت مدل شار رانشی و محاسبه مقادیر کسر حجمی بخار حل مسئله به صورت پایدار انجام می‌گیرد (شکل ۵). یکی از مهم‌ترین فاکتورها در طراحی مولد بخار، مقادیر کسر حجمی بخار در مکان‌های مختلف است، زیاد بودن مقدار کسر حجمی بخار در یک نقطه خاص می‌تواند باعث آسیب سطحی لوله و خوردگی آن می‌شود.



شکل ۵: توزیع کسر حجمی بخار در مولد بخار

در این پروژه بعد از محاسبه عددی کسر حجمی بخار، این مقادیر با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. نتایج آزمایشگاهی مربوط به نیروگاه قدرت نوورونج است که مولد بخار در آن نیروگاه نیز PGV-1000 است [8]. شکل ۶ محل قرار گرفتن حسگرها برای اندازه‌گیری کسر حجمی بخار در نقاط مختلف را نشان می‌دهد. در سال ۲۰۰۸ krosshilin با استفاده از کد BAGIRA و در سال ۲۰۱۳ آقای صفوی با استفاده از کد CFX به محاسبه کسر حجمی بخار در نقاطی که حسگرها واقع شده‌اند، پرداخته‌اند و نتایج را با نتایج آزمایشگاهی نیروگاه نوورونج که در جدول ۳ آورده شده مقایسه کرده‌اند [۷ و ۸]. در کار حاضر کسر حجمی بخار در همان نقاطی که حسگرها قرار دارند محاسبه گردیده و با کارهای آنها و داده‌های آزمایشگاهی نیروگاه نوورونج مقایسه شده است. مقایسه روش حاضر با داده‌های آزمایشگاهی حاکی از دقت خوب مدل شار رانشی برای تخمین کسر حجمی بخار است.



شکل ۶: محل قرار گرفتن حسگرهای اندازه‌گیری کسر حجمی بخار [۸]

جدول ۳: مقایسه کسر حجمی بخار در نقاط مختلف [۷ و ۸]

محل قرار گرفتن سنسورها	داده‌های آزمایشگاهی (2008)	krosshilin(2008)	صفوی (2013)	شبیه‌سازی انجام شده
$\varphi_1$	0.30	0.27	0.44	0.32
$\varphi_2$	0.43	0.43	0.56	0.45
$\varphi_3$	0.45	0.46	0.51	0.48
$\varphi_4$	0.76	0.53	0.9	0.68
$\varphi_6$	0.70	0.78	0.76	0.66
$\varphi_8$	0.55	0.60	0.62	0.61
$\varphi_{10}$	0.45	0.41	0.42	0.46
$\varphi_{12}$	0.55	0.59	0.61	0.53
$\varphi_{13}$	0.50	0.56	0.49	0.48
$\varphi_{14}$	0.52	0.44	0.52	0.46



# بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## بحث و نتیجه‌گیری

در این پروژه تحلیل ترموهیدرولیکی جریان سیال و انتقال حرارت در مولد بخار هسته‌ای انجام شده است. برای حل عددی مذکور از روش حجم محدود استفاده شده است. یکی از اهداف مهم برای انجام این کار، استفاده از روشی جدید برای تحلیل ترموهیدرولیکی مولد بخار هسته‌ای و اثبات توانایی‌های این روش برای تخمین کسر حجمی بخار است. با بررسی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی حاضر مشخص می‌شود که کسر حجمی بخار با افزایش ارتفاع افزایش یافته است و مقدار آن در ناحیه قسمت گرم به علت زیاد بودن شار حرارتی در این قسمت، بیشتر است. در نواحی بالایی مولد بخار که تولید گرما و شار حرارتی موجود نیست و علاوه بر آن سیستم آب تغذیه هم آب سرد و سنگین را وارد مولد بخار می‌کند کسر حجمی بخار کاهش می‌یابد. با مقایسه نتایج به دست آمده از پروژه حاضر با نتایج سایر کارهای تحقیقاتی که در زمینه مولد بخار افقی انجام گرفته است و همچنین با مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، اعتبار و دقت مدل شار رانشی به خوبی اثبات شده است.

## مراجع و مآخذ

- [۱]: Zuber. N., Findlay. J.A., Average volumetric concentration in two- phase flow system, Journal of Heat Transfer 87, 453- 468, 1965
- [۲]: Ishii. M., One-dimensional drift-flux model and constitutive equation for relative motion between phases in various two-phase flow regimes, ANL-77- 47, USA, 1977
- [۳]: Ishii. M., Hibiki. T., Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow. Springer, 2006
- [۴]: Hibiki. T., Ishii. M., One dimensional drift-flux model and constitutive equations for related motion between phases in various two-phase flow regimes, International Journal of Heat Mass Transfer 46, 4935-4948, 2003
- [۵]: Hibiki. T., Ishii. M., Interfacial area concentration of bubbly flow systems, Chemical Engineering Science 57, 3967- 3977, 2002
- [۶]: Schlegel. J., Hibiki. T., Ishii. M., Development of a comprehensive set of drift-flux constitutive models for pipe of various hydraulic diameters, Progress in Nuclear Energy 52, 666-677, 2010.
- [۷]: Safavi, A., et al., 2013. Study of perforated plate effect in horizontal WWER1000 steam generator. Nucl. Eng. Des. 256, 249-255.
- [۸]: Kroshilin. A.E., Smirnov. A.V., Numerical investigation of three- dimensional flows of steamwater mixture in the housing of the PGV 1000 steam generator, Russia research institute for nuclear power plant operation, 2008



# بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان