

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

شبیه سازی پدیده شار گرمای بحرانی در یک قلب راکتور نوعی در حضور شبکه نگهدارنده

مرادی، لیلا- ربیعی، عطاله- فقیهی، فرشاد

دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته ای

چکیده:

در این پژوهش اثرات ترموهیدرولیکی جریان جوشش اجباری سیال عامل آب در یک کانال سوخت راکتور در حضور شبکه نگهدارنده مورد تحلیل قرار گرفته است. به علت رخداد یک حادثه فرضی در راکتور، دبی جرمی خنک کننده به شدت افت پیدا کرده که در این شرایط، پدیده شار گرمای بحرانی رخ داده که منجر به بالا رفتن شدید دمای سطح میله های سوختی و نهایتاً سوختگی آن ها (Burn out) می گردد. جهت تحلیل این پدیده، از کد عددی در دسترس موجود با به کارگیری مدل های مناسب جهت شبیه سازی میدان جریان در شرایط حادثه، استفاده گردیده است. مشاهده گردید که حضور شبکه نگهدارنده در میدان جریان نسبت به شرایطی که شبکه نگهدارنده در میدان جریان حضور ندارد موقعیت شکل گیری پدیده سوختگی را به سمت انتهای کانال میل داده و دیده شد که شبیه سازی عددی حاضر تطبیق بهتری را نسبت به داده های آزمایشگاهی در کنار سایر کارهای عددی موجود ارائه مینماید.

کلمات کلیدی: شار گرمای بحرانی، شبکه نگهدارنده، جریان جوششی.

مقدمه:

افزایش و بهبود نرخ انتقال حرارت در کانال های فرعی ۱، یکی از مهمترین موضوعات در زمینه راکتورهای هسته ای می باشد. نرخ تولید توان در راکتورهای هسته ای، توسط محدودیت های حرارتی تعیین می شود چراکه در یک راکتور هسته ای، شار نوترونی را به اندازه ای میتوان افزایش داد که سیال خنک کننده قادر به دفع حرارت از سوخت باشد. حال اگر شار گرمای دیواره از حدی بالاتر رود انتقال ناپایدار از جوشش هسته ای به جوشش فیلمی همراه با افزایش دمای دیواره رخ می دهد که در اینصورت دمای سطح غلاف بواسطه افت ناگهانی ضریب انتقال حرارت، بطور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. اگر در قلب راکتور، برداشت کافی گرما از میله های سوخت صورت نگیرد عواقب آن میتواند جبران ناپذیر باشد. در حوادثی نیز که منجر به نشت خنک کننده² LOCA¹ میشود، سیال عامل به مقدار کافی برای برداشت گرما و تماس با سطح میله های سوختی موجود نیست. نتیجه این امر بالا رفتن بیش از اندازه دمای میله های سوختی و ذوب آن است. درک صحیحی از مکانیزم های موجود در افزایش برداشت گرما از میله های سوختی در یک مجتمع در راستای

¹ subchannel

² Loss of Coolant Accident

جلوگیری از وقوع پدیده شار گرمای بحرانی و بدنبال آن خشک شدگی^۳، از نقطه نظر ایمنی راکتورهای هسته‌ای بسیار حائز اهمیت است، که در این پژوهش تلاش می‌شود به این موضوع پرداخته شود. یکی از روش‌های افزایش انتقال حرارت در قلب، تعبیه کردن وسایلی جهت افزایش اختلاط و اغتشاش جریان، نظیر شبکه نگهدارنده به‌مراه پره اختلاط می‌باشد که ضمن جلوگیری از ارتعاش میله‌های سوختی سبب بالا بردن برداشت گرما در قلب می‌گردد. لازم به ذکر است که در این تحقیق فقط به تاثیر شبکه نگهدارنده در میدان جریان و تاثیر آن در پارامترهای میدانی پرداخته شده است. در ادامه به برخی فعالیت‌های صورت‌پذیرفته در این زمینه اشاره می‌شود.

هان و همکارانش در سال ۲۰۰۶ [1] به ارزیابی مدلی که برای پیش‌بینی شار گرمای بحرانی در یک دسته لوله که تحت شار گرمای محوری غیر یکنواخت می‌باشد، پرداختند. در این تحقیق اثر نگهدارنده در پیش‌بینی شار گرمای بحرانی مرد تحلیل قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۲ [2]، جان و همکاران با استفاده از کد TASS/SMR-S به بررسی شار گرمای بحرانی در یک کانال سوختی پرداخته است. نتایج حاصله با یک سری داده‌های آزمایشگاهی از جمله ORNL مقایسه شدند. در سال ۲۰۱۳ [3]، ژانتی و همکاران با استفاده از کد CFX به بررسی پدیده‌ی شار گرمای بحرانی در یک کانال سوختی با روش اویلرین - لاگرانژین با وجود نگهدارنده پرداختند و به این نتیجه رسیدند که وجود نگهدارنده باعث افزایش ۳۰-۴۰٪ ضریب انتقال حرارت محلی روی دیواره می‌شود. در این شبیه‌سازی عددی تاثیر فشار در آستانه شار حرارتی بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است. فعالیت‌های صورت‌گرفته و در عین حال در دسترس موجود نشان می‌دهد که مطالعات عددی نسبتاً کمی در خصوص شبیه‌سازی جریان جوشش بحرانی در حضور شبکه نگهدارنده و پره‌های اختلاط انجام شده است. در این تحقیق تلاش شده است به کمک کد محاسباتی در دسترس موجود، پدیده‌ی شار حرارتی بحرانی در داخل یک مجتمع سوختی در حضور شبکه نگهدارنده بدون در نظر گرفتن پره‌های اختلاط به صورت شبیه‌سازی میدان جریان سه بعدی مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه به روش انجام کار شبیه‌سازی عددی، شامل معادلات حاکم بر میدان جریان و نتایج اشاره می‌شود.

معادلات حاکم:

در این پژوهش، در راستای تحلیل ترموهیدرولیکی جریان جوششی که در نهایت، به علت از دست رفتن خنک‌کننده طی یک حادثه فرضی منجر به وقوع پدیده شار گرمای بحرانی می‌گردد، سعی شده است به کمک کد محاسباتی در دسترس موجود (فلوئنت) مورد تحلیل قرار گیرد. در ادامه معادلات حاکم بر مساله شامل پیوستگی، مومنتوم و انرژی بترتیب در روابط ۱ و ۲ و ۳ آورده شده‌اند:

^۳ Dry Out

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q) = \sum_{r=1}^n (\dot{m}_{rq} - \dot{m}_{qr}) + s_q \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q \vec{V}_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q \vec{V}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}_q) + \alpha_q \rho_q \vec{B}_f + \sum_{r=1}^n (\vec{F}_{rq}^D + \vec{F}_{rq}^{TD} + \dot{m}_{rq} \vec{V}_{rq} - \dot{m}_{qr} \vec{V}_{qr}) + (\vec{F}_q + \vec{F}_q^L + \vec{F}_q^{vm}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q H_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q H_q) = \bar{\tau}_q : \nabla \cdot \vec{V}_q + \alpha_q \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \dot{q} + S_{H,q} + \sum_{r=1}^n (\dot{q}_{rq} + \dot{m}_{rq} H_{rq} - \dot{m}_{qr} H_{qr}) \quad (3)$$

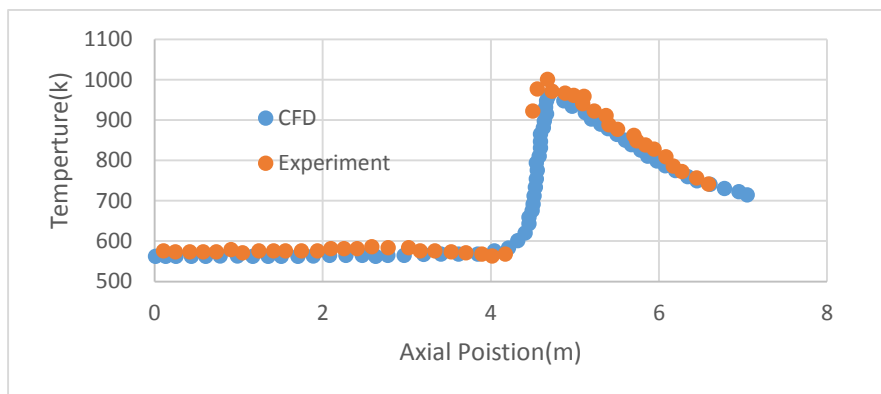
به منظور مدل کردن جوشش غیر تعادلی و شار گرمای بحرانی لازم است که دمای بخار با حل معادله انرژی حاکم بر فاز بخار در کنار سایر معادلات حاکم برای سهم بندی شار حرارتی اعمالی به دیواره بکمک رابطه ۴ محاسبه شود.

$$\dot{q}_W = (\dot{q}_c + \dot{q}_Q + \dot{q}_E + \dot{q}_F) f(\alpha_l) + (1 - f(\alpha_l)) \dot{q}_v + \dot{q}_G \quad (4)$$

در رابطه (۴)، q_V ، q_F و q_G به ترتیب شار گرمای جوششی فیلمی نازک، شار گرمایی در فاز بخار از نوع هدایت و شار گرمای منتقل شده به هرگونه از گازهای دیگر موجود مانند وجود گازهای غیر قابل میعان، می باشد.

نتایج:

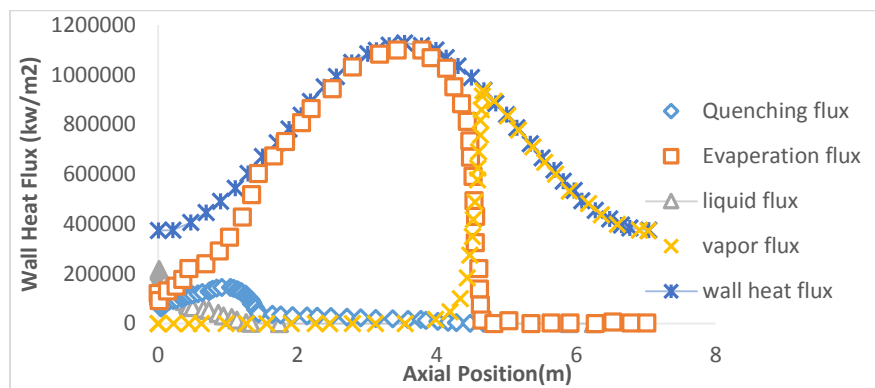
به منظور صحت سنجی مدل های استفاده شده، جریان آب در یک کانال افقی ساده با قطر ۱۵ میلی متر، طول ۷ متر که تحت شار گرمایی متوسط 748000 W/m^2 با توزیع متقارن به شکل کسینوسی در طول لوله و فشار کاری 7.01 MPa با شار جرمی $1001 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ مورد تحلیل قرار گرفته است. شکل (۱) توصیفی از توزیع دمای دیواره در اثر شار حرارتی بحرانی اعمالی را نشان می دهد. دیده می شود که نتایج کار عددی حاضر، مطابقت قابل قبولی با داده های آزمایشگاهی انجام شده توسط برتولمی و همکاران [۴] می باشد.



شکل (۱) - دمای دیواره در راستای کانال به منظور صحت سنجی

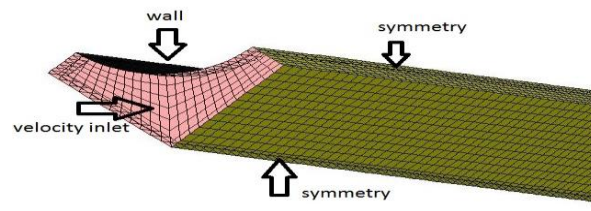
۱۶ و ۱۷ شهریور ۱۳۹۴، دانشگاه یزد

شکل (۲) نیز توصیفی از نحوه سهم بندی شار گرمایی اعمال شده به دیواره را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود در هر مقطع مجموع شار حرارتی ناشی از فاز مایع، تبخیر و سهم مربوط به جابجایی حباب برابر کل شار اعمالی در هر مقطع می باشد. قابل پیگیری است که در طول کانال با داغ شدن سیال عامل و افزایش شدت دانسیته حباب از سهم شار فاز مایع کاسته و به بخش های دیگر بویژه فاز تبخیر اضافه شده است.



شکل (۲) - سهم بندی مختلف مدهای شار گرمایی روی دیواره

به منظور شبیه سازی عددی میدان جریان در یک مجتمع سوختی نوعی قسمتی از آن مجتمع سوختی با شرایط مرزی مناسب به منظور کاهش هزینه های محاسباتی مطابق با شکل (۳)، در نظر گرفته شده است [2]. جریان آب در یک کانال با میله های سوختی به قطر ۹,۵ میلی متر، طول ۳,۶۶ متر که تحت شار گرمایی ۰.۹۴۵ MW/m² و فشار کاری ۰.۹۴۵ MPa با شار جرمی ۸۰۰ kg/m² s و دمای مادون اشباع ۱۴ درجه کلونین می باشد، مورد تحلیل قرار گرفته است. یادآوری میشود در طول این کانال ۶ عدد شبکه نگهدارنده با فواصل مساوی قرار گرفته شده است.

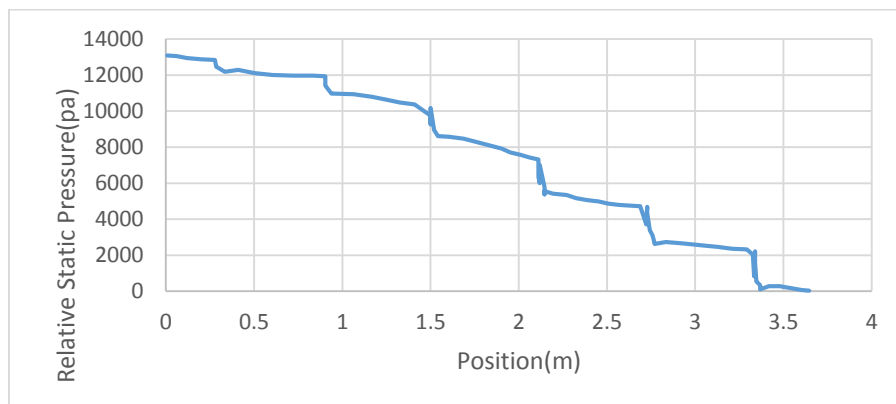


شکل (۳) - شماتیکی از ناحیه محاسباتی و شرایط مرزی مناسب

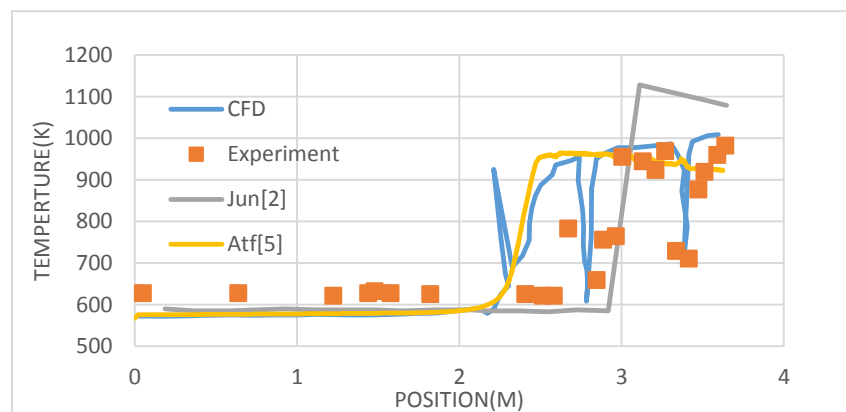
شکل (۴) توصیفی از نحوه تغییرات فشار استاتیک نسبی در طول کانال در حضور شش دسته شبکه نگهدارنده نشان میدهد همانطور که دیده میشود نحوه تغییرات نشان دهنده افت فشار در طول کانال بوده که منطقی بودن روند تحلیل را نشان میدهد. قابل ذکر است که حضور شبکه نگهدارنده در میدان جریان سبب شده که هر شش منطقه شبکه نگهدارنده

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

مواجهه با یک کاهش سریعی در فشار استاتیکی باشیم. شکل 5 نحوه تغییرات توزیع دما در طول بدنه میله ی سوختی را در شرایط پدیده ی شار گرمایی بحرانی نشان میدهد. به منظور بررسی اثر شار گرمای بحرانی، نتایج دمای سطح میله های سوختی دیواره در امتداد کانال مجتمع سوختی در شکل (5) آورده شده است. دیده می شود که نتایج کار عددی حاضر، در عین مطابقت قابل قبول با داده های آزمایشگاهی انجام شده توسط ORNL در مرجع [2]، جزئیات بیشتری از میدان جریان شامل اثر شبکه های نگهدارنده را نسبت به کار جون و عطف [5] نشان می دهد. همانگونه که از شکل (5) مشخص میباشد وجود شبکه نگهدارنده باعث کاهش دما در همان منطقه نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن شبکه نگهدارنده (مرجع [5]) میگردد. یادآوری میشود نتایج کار عددی مرجع [5] بدون حضور شبکه نگهدارنده میباشد. شکل 6 توصیفی از کانتورهای فاز بخار را در مقاطع مختلف از ورودی تا خروجی را نشان میدهد. همان طور که دیده میشود با حرکت در امتداد میله های سوختی میزان فاز بخار با یک روند منطقی رو به افزایش میباشد.

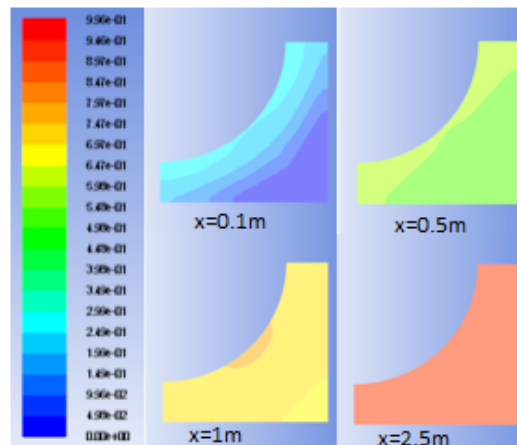


شکل (۴) - فشار در سطح دیواره میله های سوختی در امتداد کانال



۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

شکل (۵) - دمای سطح دیواره میله های سوختی در امتداد کانال



شکل (۶) - توصیفی از کانتورهای فاز بخار در مقاطع مختلف

نتیجه گیری و جمع بندی:

در این پژوهش، پدیده شار گرمایی بحرانی در یک مجتمع سوختی قلب یک راکتور نوعی در حضور شبکه نگهدارنده، توسط دینامیک سیالات محاسباتی مورد تحلیل قرار گرفته است. جهت مدل سازی میدان جریان از معادلات متوسط گیری شده ناویر استوکس در دیدگاه اویلرین برای هر فاز بصورت جداگانه در کنار روابط مورد نیاز جهت توصیف پدیده جوشش در شرایط غیر تعادلی استفاده شده است. در کنار صحت سنجی مدل سازی میدان جریان مشاهده گردید که حضور شبکه نگهدارنده در میدان جریان نسبت به شرایطی که شبکه نگهدارنده در میدان جریان حضور ندارد موقعیت شکل گیری پدیده سوختگی را به سمت انتهای کانال میل داده و دیده شد که شبیه سازی عددی حاضر تطبیق بهتری را نسبت به داده های آزمایشگاهی در کنار سایر کارهای عددی موجود ارائه مینماید.

مراجع:

[1]. Kyu-Hyun Han, Dae-Hyun Hwang, Soon Heung Chang., Assessment of a DNB-type theoretical critical heat flux model for rod bundles with non-uniform axial power shapes, Nuclear Engineering and Design, 236:223-231, 2006.



۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

[2]. Jun .I. S, Bae. K. H, Chung .Y. J, et al.2012. " Validation of the TASS/SMR-S Code for the Core Heat Transfer Model on the Steady Experimental Conditions" , *Journal of energy and Power Engineering*, 338-345.

[3] Jayanti .S, Rajesh Reddy .K. 2013. " Effect of Spacer Grids on CHF in Nuclear Rod Bundles", *Nuclear Engineering and Design* 261 -66– 75.

[۴]. Bartolemei G G and Chanturiya V M., Experimental study of true void fraction when boiling subcooled water in vertical tubes. *Teploenergeika*; 14(2):123-128, 1969.

[5]Atf .A.R.2015. " Thermo-hydraulic Analysis of Dryout Phenomenon in a Boiling Channel with the Injection of Nano Particle Al_2O_3 ", MSc Thesis.