



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## شبیه سازی جریان سیال بین صفحه سربی ستون حرارتی و قلب در راکتور تحقیقاتی تهران و طراحی شرایطی برای خنک کنندگی آن

امین داوری\*، سید محمد میروکیلی، ابراهیم عابدی، سید مجتبی سادات اشکور

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور

### چکیده:

در راکتورهای تحقیقاتی که از تسهیلات پرتودهی ستون حرارتی بهره می‌برند، پرتوهای گامای تولیدی در قلب راکتور توسط صفحه سربی ستون حرارتی که در مجاورت قلب قرار دارد جذب می‌شوند. این فرایند با تولید گرما در صفحه سربی همراه است و باعث ایجاد جریان جابه‌جایی طبیعی بین صفحه سربی و دیواره قلب می‌شود. در این تحقیق، جریان و انتقال حرارت ۳ بعدی در کانال شکل گرفته از صفحه سربی ستون حرارتی و دیواره قلب به طور عددی با استفاده از نرم‌افزار فلونت مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف از این شبیه‌سازی تعیین توزیع دما بر روی صفحه سربی و یافتن راه حلی برای جلوگیری از پدیده جوشش هسته‌ای که ممکن است روی صفحه سربی اتفاق بیفتد.

**کلید واژه:** راکتور تحقیقاتی، صفحه سربی ستون حرارتی، ترموهیدرولیک، تحلیل CFD

### ۱- مقدمه

به طور کلی یکی از روش‌های کم هزینه و عملی در خنک‌کاری، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی است که کاربرد فراوانی در صنایع مختلف از جمله صنعت هسته‌ای دارد. جریان طبیعی به علت تغییرات چگالی القا شده در سیال بواسطه تغییر دما یا غلظت در حضور نیروی گرانش پدید می‌آید. در راکتور تحقیقاتی مورد نظر، بواسطه فرایند شکافت در قلب راکتور، پرتوهایی از نوع گاما تولید و توسط صفحه سربی ستون حرارتی که در مجاورت قلب راکتور قرار دارد جذب می‌شوند. این فرایند با تولید گرما در صفحه سربی همراه است که با گرم شدن سیال مجاور صفحه سربی و ایجاد نیروی شناوری، جریان جابه‌جایی طبیعی در کانال شکل گرفته از صفحه سربی و دیواره قلب برقرار می‌شود. در شرایطی که جابه‌جایی طبیعی توانایی برداشت حرارت تولید شده در صفحه سربی را نداشته باشد، شرایط جوشش سیال بر روی صفحه سربی فراهم شده و تشکیل حباب بر روی صفحه سربی می‌تواند مشکلاتی را چه به لحاظ تاثیر بر روی قلب راکتور از نظر ورود حباب به داخل قلب و چه به لحاظ ایجاد تلاطم در لایه‌های بالایی آب استخر و عدم دید واضح بر روی قلب در شرایط بهره‌برداری ایجاد کند.

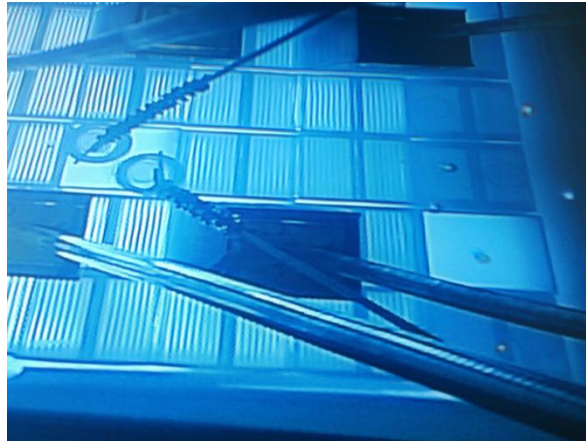
در شکل ۱ نمایی از قلب راکتور تهران نشان داده شده است که در آن پیدایش حباب در سمت ستون حرارتی تحت شرایط عملکرد ۴ مگاوات دیده می‌شود. در نتیجه مسئله جلوگیری از تشکیل حباب داخل استخر از اهمیت بالایی برخوردار می‌شود. از این‌رو هدف از تحلیل عددی حاضر، تعیین توزیع دما روی سطح صفحه سربی و یافتن راه-



## بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

کاری برای جلوگیری از پدیده جوشش سیال خنک کننده می‌باشد که این امر با جایگزین کردن مکانیزم جابه‌جایی اجباری به جای جابه‌جایی طبیعی قابل حصول است.



شکل ۱. حباب‌های ایجاد شده در سمت ستون حرارتی قلب راکتور تهران

### ۲- توصیف مسئله

راکتور تحقیقاتی تهران یک راکتور ۵ مگاواتی از نوع استخری می‌باشد که از سوخت‌های صفحه‌ای بهره می‌برد و با جریان اجباری رو به پایین آب سبک خنک می‌شود. قلب راکتور از یک طرف به ستون حرارتی گرافیتی و از جهات دیگر توسط آب احاطه شده است که ستون حرارتی گرافیتی نقش فراهم کردن چشمه‌ای از نوترون‌های حرارتی برای کاربردهای پزشکی و بیولیژیکی را به عهده دارد. شکل ۲ (الف) و (ب) به ترتیب شماتیک و شکل واقعی از ستون حرارتی قرار گرفته داخل استخر را نشان می‌دهد [۱].

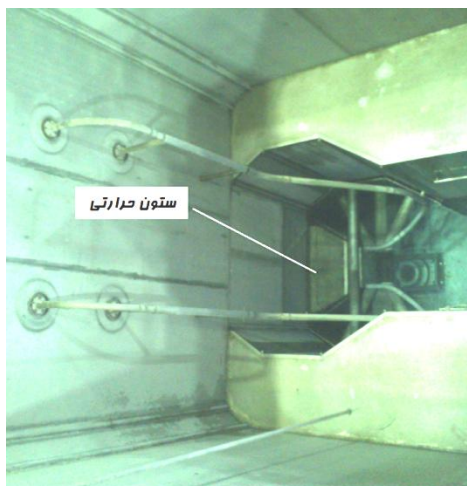
در این تحقیق شبیه‌سازی ۳ بعدی جریان جابه‌جایی طبیعی بین صفحه سربی ستون حرارتی و دیواره قلب راکتور انجام می‌شود. مدل<sup>۱</sup> CFD مسئله در شکل ۳ نشان داده شده است که شامل استخر، ستون حرارتی و دیواره قلب می‌باشد. قلب راکتور تقریباً در عمق ۸ متری استخر و ستون حرارتی در فاصله ۰/۰۱۳۳۲۵ m از دیواره قلب قرار دارد به طوری که کانال ایجاد شده بین قلب و ستون حرارتی دارای ارتفاع و عرض ۰/۹ m و ۰/۶۵ m می‌باشد.

<sup>۱</sup> Computational Fluid dynamic

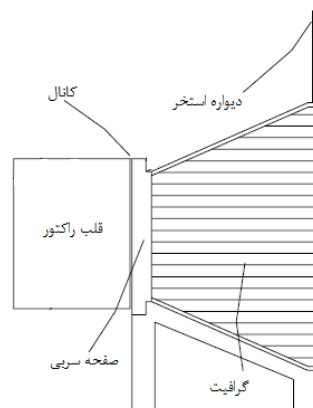


## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



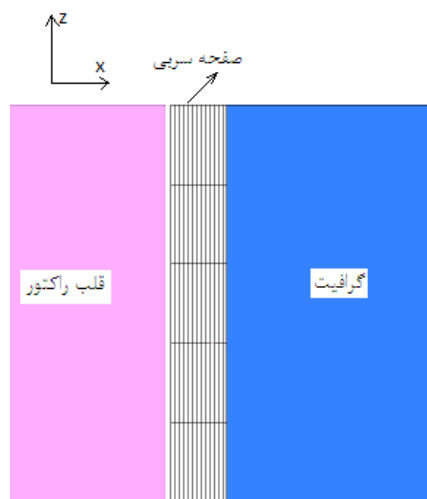
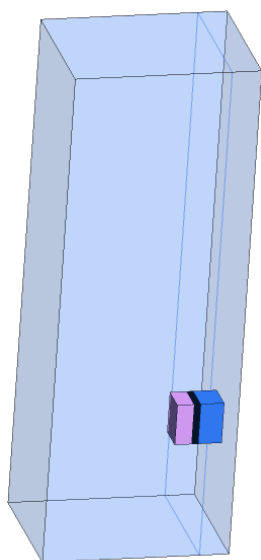
(ب)



(الف)

شکل ۲. الف) ساختار ستون حرارتی و قلب راکتور، ب) محل قرارگیری ستون حرارتی در

استخر راکتور تهران



شکل ۳. مدل CFD جریان جابه‌جایی طبیعی بین قلب و ستون حرارتی

در این مسئله، شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار فلونت [۲] انجام شده و به منظور نشان دادن استقلال حل از شبکه محاسباتی، شبکه‌های محاسباتی مختلفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت با بررسی شبکه‌های محاسباتی، شبکه‌ی به اندازه کافی ریز شده‌ای با تعداد ۳۵۴۶۷۷۰ نود محاسباتی برای حل عددی در نظر گرفته شده است.



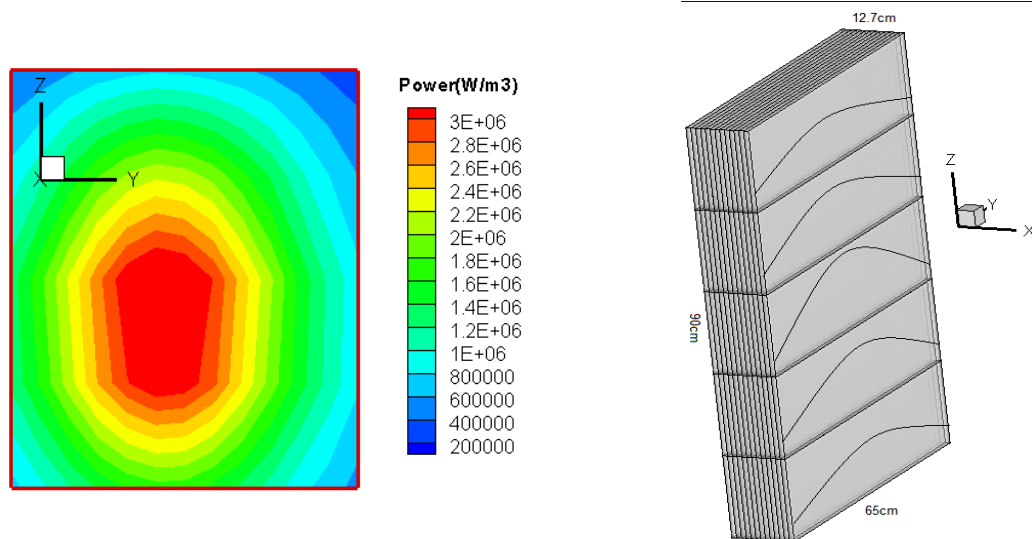
# بیست و یکمین کنفرانس هفتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

همچنین در این تحقیق از تقریب بوزینیسک برای جریان جابه‌جایی طبیعی و مدل توربولانسی  $k-\omega$  (SST) برای مدل‌سازی ترم توربولانسی استفاده شده است [۳].

## ۳- نتایج و بحث

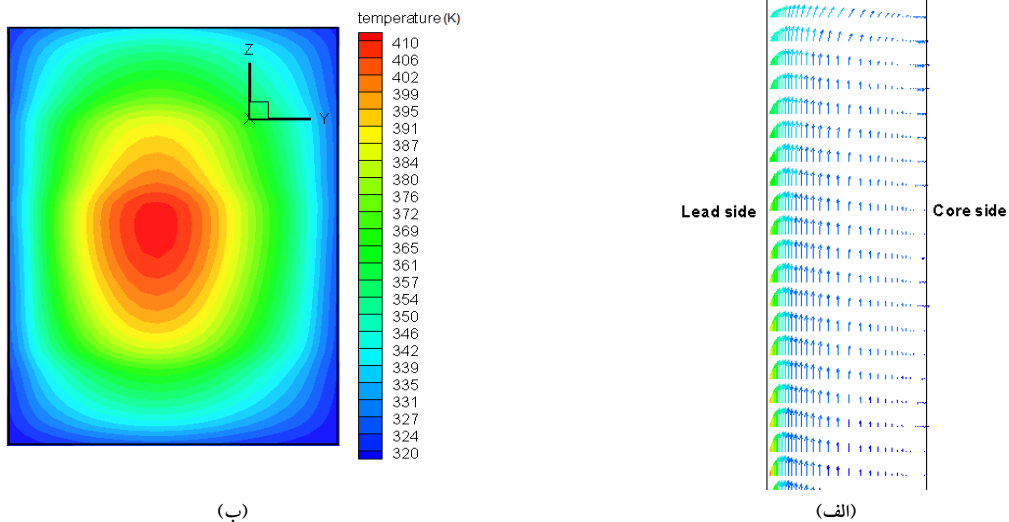
در این شبیه‌سازی، صفحه سربی به ترتیب به  $5 \times 13 \times 13$  بلوک سه بعدی در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  تقسیم بندی می‌شود (ابعاد باریکه سربی در جهت‌های  $x$  و  $y$  و  $z$  به ترتیب  $0.127$ ،  $0.65$  و  $0.9$  متر می‌باشد) که با استفاده از کد [EMCNPX] تولید حرارت داخل هریک از این بلوک‌ها به صورت توابع کسینوسی و چندجمله‌ای نسبت به  $y$  محاسبه می‌شود. توزیع توان در ۵ بلوک اول (دیواره گرم کانال) تحت شرایط کارکرد قلب با توان  $5\text{MW}$  در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. توزیع توان در ۵ بلوک اول صفحه سربی

بردارهای سرعت داخل کانال تحت جریان جابه‌جایی طبیعی در شکل ۵ (الف) نشان داده شده است. با توجه به شکل دیده می‌شود که پروفیل سرعت در مقطع کانال نسبت به سطح مرکزی کانال متقارن نمی‌باشد و بیشترین سرعت داخل کانال در نزدیکی صفحه داغ (صفحه سربی) اتفاق می‌افتد که این امر از گرادینان شدید دمایی و به تبع آن نیروی شناوری قوی‌تر در آن ناحیه نشأت می‌گیرد. شکل ۵ (ب) توزیع دما روی صفحه سربی که روبروی دیواره قلب قرار دارد را نشان می‌دهد. این صفحه می‌بایست توسط جریان جابه‌جایی طبیعی خنک شود. همان‌طور که دیده می‌شود بیشینه دمای صفحه سربی ( $410\text{K}$ ) از مقدار دمای متناظر با جوشش هسته‌ای سیال خنک کننده در فشار  $1/8\text{bar}$  ( $390\text{K}$ ) بیشتر است. برای جلوگیری از پدیده جوشش سیال در مجاورت صفحه سربی، شرایط خنک‌کاری این صفحه باید بهبود یابد به همین منظور توجه به سمت جابه‌جایی اجباری به عنوان مکانیزم انتقال حرارت موثرتری جلب می‌شود. در این حالت، صفحه مشبک (Grid plate) قلب راکتور به زیر کانال متشکل از

دیواره قلب و دیواره ستون حرارتی امتداد می‌یابد به طوری که سیال خنک کننده می‌تواند در کانال (دو صفحه موازی) به سمت پایین جریان یابد و به داخل پلنیوم تخلیه شود. برخلاف کانال های سوخت که جریان از بالا وارد کانال می‌شود در کانال مورد نظر سیال می‌تواند از کنارها نیز وارد شود که در این حالت شرایط جریان عرضی نیز فراهم می‌شود.



شکل ۵. (الف) بردار سرعت در کانال (ب) توزیع دما روی دیواره کانال (صفحه سربی)

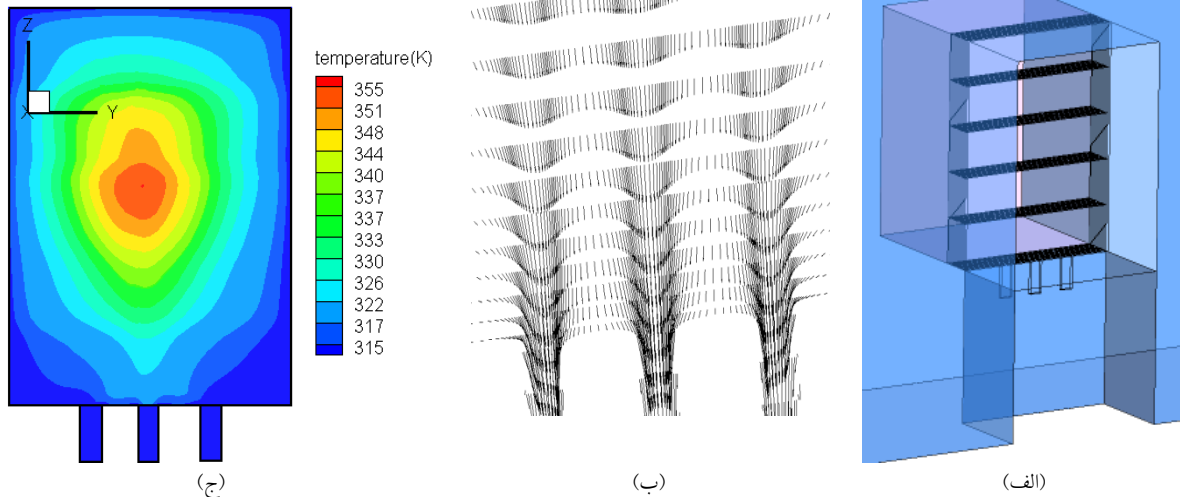
طراحی برای برقراری جریان جابه‌جایی اجباری در کانال بر اساس دو مقوله‌ی کاهش دمای صفحه سربی به مقداری پایین‌تر از دمای جوشش سیال و کم کردن جریان کنار گذر قلب (هرچقدر جریان کنار گذر کمتر باشد ظرفیت پمپ مدار اول کاهش می‌یابد) انجام می‌گیرد. برای همین منظور، شبیه‌سازی برای کانال مورد نظر با سه حفره در خروجی کانال مورد بررسی قرار می‌گیرد که جریان القا شده‌ی ثقلی از کنار قلب وارد کانال و از طریق سه حفره وارد پلنیوم می‌شود. در این مدل‌سازی فشار خروجی از حفره‌ها برابر با فشار داخل پلنیوم راکتور در نظر گرفته می‌شود. مدل محاسباتی جریان جابه‌جایی اجباری به همراه سه حفره با ابعاد  $0.048\text{ m} \times 0.013\text{ m}$  در خروجی کانال (این سه حفره بر روی صفحه مشبک ایجاد می‌شود) در شکل ۶(الف) نشان داده شده است.

میدان جریان رسم شده در شکل ۶(ب)، سبب می‌شود تا توزیع دمایی مطابق با شکل ۶(ج) بر روی صفحه سربی مجاور قلب پدید آید. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این شرایط طراحی که از الگوی جریان جابه‌جایی اجباری بهره برده شده است، بیشینه دمای صفحه سربی ( $355\text{ K}$ ) به مقداری کمتر از مقدار دمای مورد نیاز برای جوشش سیال می‌رسد که در این حالت، نرخ جریان عبوری از حفره‌ها (جریان کنار گذر قلب)  $11/16\text{ kg/s}$  بدست آمده است که این مقدار،  $8\%$  از مقدار دبی کل عبوری از قلب راکتور ( $138/8\text{ kg/s}$ ) را شامل می‌شود.



# بیست و یکمین کنفرانس هفتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۶. (الف) مدل محاسباتی (حالت جابه‌جایی اجباری) (ب) بردار سرعت عبوری از حفره‌ها (ج)

توزیع دما روی صفحه سربی

## ۴- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در راکتور تحقیقاتی ۵ مگاواتی مورد نظر، در حالتی که از جریان طبیعی برای خنک کاری صفحه سربی مجاور قلب بهره برده می‌شود، بیشینه دمای صفحه سربی از دمای لازم برای جوشش هسته‌ای بیشتر می‌شود. در حالی که با طراحی بهینه و ایجاد جریان اجباری در کانال تشکیل شده از صفحه سربی می‌توان دمای سطح صفحه سربی را به اندازه‌ی قابل توجهی کاهش داد تا علاوه بر جلوگیری از پدیده جوشش و تشکیل حباب در استخر، جریان کنار گذر کمتری نیز برقرار شود. همچنین از آنجایی که بیشینه دما در مرکز صفحه سربی رخ می‌دهد و بیشتر جریان از کناره‌های کانال وارد حفره‌ها می‌شود، پیشنهاد می‌شود که حفره‌های خروجی در وسط صفحه خروجی کانال قرار بگیرند.

## ۵- مراجع

- [1] Atomic Energy Organization of Iran., "safety analysis report for Tehran research reactor (TRR)", vol. 1, january 2009.
- [2] AnsysInc, "Fluent User's Guide 14", 2011.
- [3] Wilcox, D. C. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc., La Canada, California, 1998.
- [4] Pelowitz, D.B. "MCNPx User's Manual, Version 2.5.0", LA-CP-05-0369, April 2005.