J. of Nucl Sci. and Tech.
74, 2016, 9-18

مجله‌ی علوم و فنون هسته‌ای
۷۴، ۱۳۹۴، ۹-۱۸

شبیه‌سازی جریان سیال بین تیغه‌ی سربی ستون گرمایی و قلب در یک رآکتور تحقیقاتی از نوع استخری و بهبود شرایط خنک‌کنندگی آن

امین داوری، سیدمحمد میروکیلی*، ابراهیم عابدی، سیدمجتبی سادات اشکور
پژوهشکده‌ی رآکتور، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران ـ ایران

چکیده: در رآکتورهای تحقیقاتی از نوع استخری نظیر رآکتور تهران که از تسهیلات پرتودهی ستون گرمایی بهره می‌برند، پرتوهای گامای تولیدی در قلب رآکتور توسط تیغه‌ی سربی ستون گرمایی که در مجاورت قلب قرار دارد جذب می‌شوند. این فرایند با تولید گرما در تیغه‌ی سربی همراه است و باعث ایجاد جریان جابه‌جایی طبیعی بین تیغه‌ی سربی و دیواره‌ی قلب می‌شود. در این پژوهش، جریان و انتقال حرارت ۳ بعدی در کانال شکل گرفته از تیغه‌ی سربی ستون گرمایی و دیواره‌ی قلب به طور عددی با استفاده از کد دینامیک سیال‌های محاسباتی (CFD) شبیه‌سازی شد. هدف از این شبیه‌سازی تعیین توزیع دما بر روی تیغه‌ی سربی و یافتن راه حلی برای جلوگیری از پدیده‌ی جوشش هسته‌ای بود که ممکن است روی سطح تیغه‌ی سربی اتفاق بیفتد. یافته‌ها نشان داد که در شرایط جریان طبیعی، بیشینه دمای سطح تیغه‌ی سربی از دمای متناظر با جوشش هسته‌ای سیال بیش‌تر است. در نتیجه با امتداد صفحه‌ی مشبک به زیر کانال مابین تیغه‌ی سربی و دیواره‌ی قلب و برقراری شرایط جریان اجباری به عنوان راهکاری مؤثر می‌توان از جوشش سیال جلوگیری کرد.

کلیدواژه‌ها: *رآکتور تحقیقاتی از نوع استخری، تیغه‌ی سربی، ستون گرمایی، کد محاسباتی CFD*

Numerical simulation of flow and heat transfer between thermal column lead slab and core edge surfaces in a pool-type research reactor and enhancement of its cooling condition

A. Davari, S.M. Mirvakili*, E. Abedi, S.M. Ashkevar
Reactor Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran

Abstract: In pool-type research reactors, utilizing thermal column irradiation facilities through the fission process in the core, gamma rays are produced and absorbed by lead slab as a gamma rays shield of thermal column. Consequently, heat is generated in the lead slab surface which induces flow by the thermal buoyancy force. In the present work, 3D, CFD simulation of flow and heat transfer in a channel, formed by the thermal column and core edge, is considered. The aim is to obtain the temperature distribution on the lead surface and also a solution to prevent boiling, which may occur on the lead surface. It is observed that the hot spot on the lead surface exceeds the boiling point in natural convection mechanism. Therefore, the grid plate is extended underneath the channel so that water can flow through the channel and exit to the plenum causing forced convection to be established as an effective way to eliminate the boiling occurrence.

Keywords: ***Pool- type research reactor, Thermal column, Lead slab, CFD code***

*email: mmirvakili@aeoi.org.ir

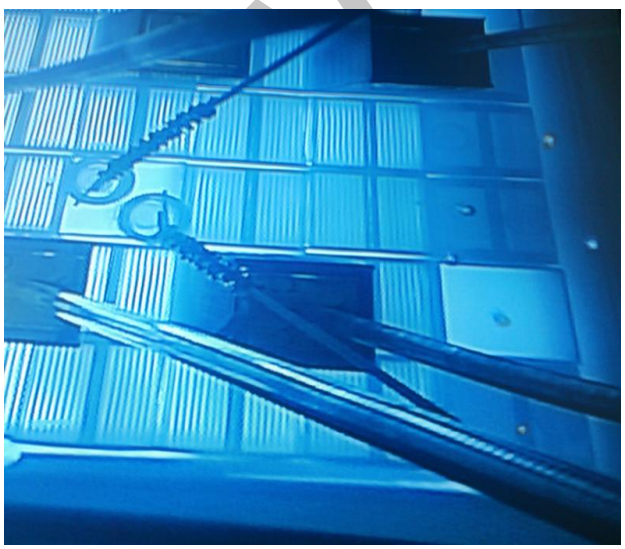
تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۶/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۵/۱۱

Archive of SID
www.SID.ir

۱. مقدمه

به طور کلی یکی از روش‌های کم‌هزینه و عملی در خنک‌سازی، انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی طبیعی است که کاربرد فروانی در صنایع مختلف از جمله صنعت هسته‌ای دارد. جریان طبیعی به علت تغییر چگالی القا شده در سیال به دلیل تغییر دما یا غلظت در حضور نیروی گرانش پدید می‌آید. مسأله‌ی خنک‌سازی صفحه‌های موازی گرم با سازوکار جابه‌جایی طبیعی به علت کاربرد وسیع در صنعت الکترونیک بسیار مورد توجه بوده است [۱]. تاریخچه‌ی مدل‌سازی این‌چنین مسایل شامل بهبود مدل‌سازی و سلسله تقریب‌هایی بوده است. النباس [۲] در اولین مدل‌سازی، نشان داد که ضریب انتقال حرارت بی‌بعد (عدد ناسلت) رابطه‌ی مستقیمی با عدد رایلی دارد. بعدها آنگ [۳] برای صفحه‌های به طور متقارن یا نامتقارن گرم شده، نشان داد که شرایط میدان دمایی قبل از یا هم‌زمان با میدان سرعت به شرایط کاملاً توسعه‌یافته می‌رسد که نشان می‌دهد طول توسعه‌یافتگی گرمایی مستقل از عدد پرانتل است. این نتیجه متفاوت از آن چیزی است که در جریان اجباری وجود دارد که در آن طول توسعه‌یافتگی سرعت و دما تابعی از عدد پرانتل هستند. آنگ و همکاران [۴] دریافتند که در اعداد رایلی بزرگ‌تر از ۰٫۱۴، سرعت خروجی کانال و نمایه‌های دمایی هم‌چنان در حال توسعه‌اند و یافته‌های تجربی ویرتز و استازمن [۵] نیز تطابق خوبی با مدل تحلیلی آنان دارد. تأثیر فاصله‌ی بین صفحه‌ها بر روی جابه‌جایی طبیعی در کانال‌هایی با دو جدار گرم شده و گرم نشده، توسط اسپارو و آزودو [۶] مورد بررسی قرار گرفت که یافته‌های این تحقیق حاکی از آن است که نرخ انتقال حرارت در کانال‌های باریک با اختلاف دمایی کم به طور محسوسی به فاصله‌ی دو جدار وابسته است. در کاربرد جابه‌جایی طبیعی در رآکتورهای هسته‌ای می‌توان به کار لنگرمن [۷] اشاره کرد. در این کار پژوهشی خنک‌سازی از طریق جابه‌جایی طبیعی با هوا در مجتمع سوخت رآکتور آزمون پیشرفته (ATR) به منظور تعیین سطح برداشت گرما از صفحه‌های سوخت مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به کاربرد جریان طبیعی در خنک‌سازی قلب رآکتور در توان پایین، آزون و همکاران [۸] ایمنی رآکتور در شرایط خنک‌سازی بلندمدت قلب با جریان طبیعی را مورد ارزیابی قرار دادند؛ یافته‌های این پژوهش اساساً بر روی تعیین حاشیه‌های ایمنی قلب در شرایط جابه‌جایی طبیعی متمرکز بوده است؛ از دیگر مطالعه‌هایی که بر روی جریان طبیعی داخل استخر و تجهیزهای رآکتور انجام شده است می‌توان به کار سنگوپتا و همکارن [۹] اشاره کرد که در آن شرایط دمایی بازتاباننده‌ی قلب رآکتور ۲ مگاواتی در شرایط جریان طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است.

در رآکتور تحقیقاتی تهران، از طریق فرایند شکافت در قلب رآکتور، پرتوهایی از نوع گاما تولید و توسط تیغه‌ی سربی ستون گرمایی که در مجاورت قلب رآکتور قرار دارد جذب می‌شوند. این فرایند با تولید گرما در تیغه‌ی سربی همراه است که با گرم شدن سیال مجاور تیغه‌ی سربی و ایجاد نیروی شناوری، جریان جابه‌جایی طبیعی در کانال شکل گرفته از تیغه‌ی سربی و دیواره‌ی قلب برقرار می‌شود. در شرایطی که جابه‌جایی طبیعی توانایی برداشت گرمای تولید شده در این تیغه‌ی سربی را نداشته باشد، شرایط جوشش سیال بر روی سطح تیغه‌ی سربی فراهم شده و تشکیل حباب می‌تواند مشکلاتی را چه به لحاظ تأثیر بر روی قلب رآکتور 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 رآکتور تهران نشان داده شده است که در آن پیدایش حباب در سمت ستون گرمایی تحت شرایط عملکرد ۴ مگاوات دیده می‌شود. در نتیجه مسأله‌ی جلوگیری از تشکیل حباب در داخل استخر از اهمیت بالایی برخوردار است. از این‌رو هدف از تحلیل عددی حاضر، تعیین توزیع دما روی سطح تیغه‌ی سربی و یافتن راهکاری برای جلوگیری از پدیده‌ی جوشش سیال خنک‌کننده است که این امر با جای‌گزین کردن سازوکار جابه‌جایی طبیعی با جای جابه‌جایی اجباری قابل انجام است.



شکل ۱. حباب‌های ایجاد شده در سمت ستون گرمایی قلب رآکتور تهران.

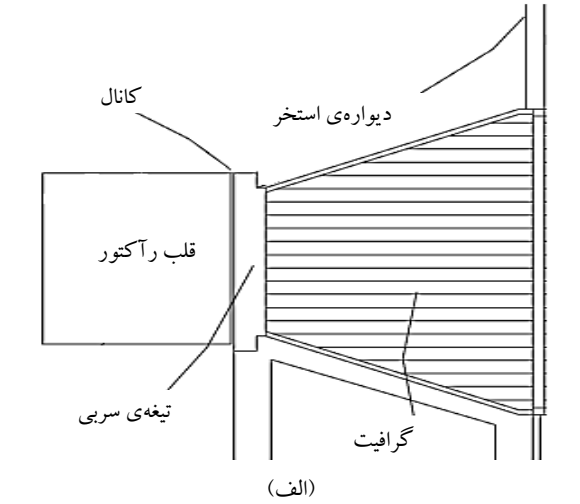
www.SID.ir

۲. توصیف مسأله

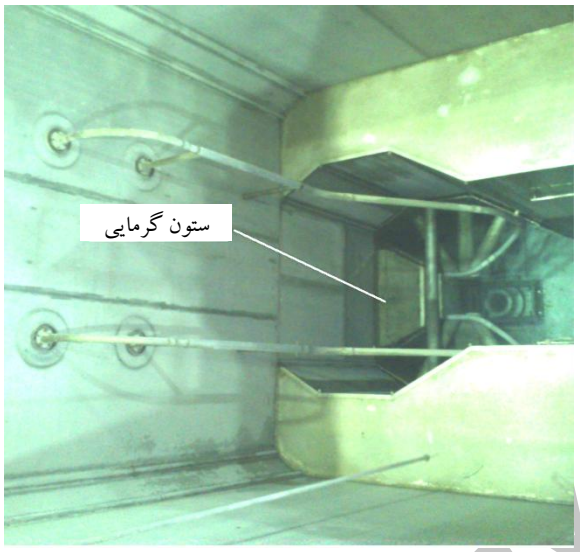
رآکتور تحقیقاتی تهران یک رآکتور ۵ مگاواتی از نوع استخری است که از سوخت‌های صفحه‌ای بهره می‌برد و با جریان اجباری رو به پایین آب سبک خنک می‌شود. قلب رآکتور از یک طرف با ستون گرمایی گرافیتی و از سایر قسمت‌ها با آب احاطه شده است؛ ستون گرمایی گرافیتی وظیفه‌ی فراهم کردن چشمه‌ای از نوترون‌های گرمایی برای کاربردهای پزشکی و زیست‌شناختی را به عهده دارد [۱۰]. شکل ۲ الف و ب به ترتیب، طرح‌واره و شکل واقعی ستون گرمایی قرار گرفته در داخل استخر را نشان می‌دهد [۱۱].

در این پژوهش، شبیه‌سازی ۳ بعدی جریان جابه‌جایی طبیعی بین تیغه‌ی سربی ستون گرمایی و دیواره‌ی قلب رآکتور انجام شد. مدل دینامیک سیال‌های محاسبه‌ای (CFD)[۱] مسأله در شکل ۳ نشان داده شده است که شامل استخر، ستون گرمایی و دیواره‌ی قلب است. قلب رآکتور تقریباً در عمق ۸ متری استخر و ستون گرمایی در فاصله‌ی ۰٫۰۱۳۳۲۵ m از دیواره‌ی قلب قرار دارد به طوری که کانال ایجاد شده بین قلب و ستون گرمایی دارای ارتفاع و عرض به ترتیب، برابر با ۰٫۹ و ۰٫۶۵ m است.

در این بررسی، شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت [۱۲]، که از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی معادله‌های حاکم استفاده می‌کند، انجام شد. از طرح پرسِتو[۲] برای گسسته‌سازی فشار و از طرح آپویند[۳] مرتبه‌ی دوم برای گسسته‌سازی دیگر متغیرهای وابسته استفاده شد [۱۲]. هم‌چنین در حل میدان جریان از الگوریتم سیمپل برای جفت‌شدگی میدان فشار و سرعت بهره برده شد. جریان به صورت پایا، تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شد. خواص سیال به‌جز چگالی در جمله‌ی شناوری که از تقریب بوزینیسک تبعیت می‌کند، ثابت فرض شد. به منظور نشان دادن استقلال حل از شبکه‌ی محاسباتی، شبکه‌های محاسباتی مختلفی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با بررسی شبکه‌های محاسباتی، شبکه‌ای به اندازه‌ی کافی ریز شده با تعداد ۳۵۴۶۷۷۰ گره محاسباتی برای حل عددی در نظر گرفته شد. در این پژوهش برای جریان جابه‌جایی طبیعی از تقریب بوزینیسک استفاده شد.

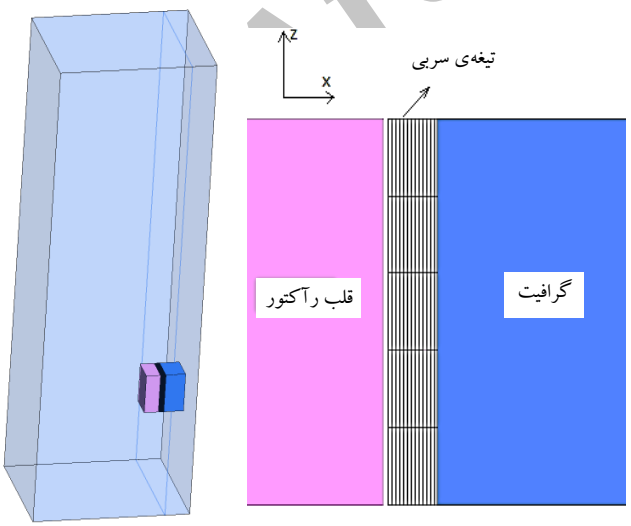


(الف)



(ب)

شکل ۲. (الف) طرح‌واره‌ی ساختار ستون گرمایی و قلب رآکتور، (ب) محل قرارگیری ستون گرمایی در استخر رآکتور تهران.



شکل ۳. مدل دینامیک سیال‌های محاسبه‌ای جریان جابه‌جایی طبیعی بین قلب و ستون گرمایی.

www.SID.ir

۱.۲ معادله‌های حاکم

معادله‌های حاکم بر مسأله که باید حل می‌شدند، معادله‌های پیوستگی، تکانه و انرژی‌اند. جریان آشفتگی با معادله‌های RANS در نظر گرفته شد. از مدل آشفتگی k-ω(SST) به عنوان مدل آشفتگی مناسب فیزیک جریان استفاده شد [۱۲]. کد دینامیک سیال‌های محاسبه‌ای (CFD) فلوئنت شامل چندین مدل آشفتگی برای گران‌روی آشفتگی است: مدل k-ε استاندارد، k-ω استاندارد و مدل k-ω(SST). از مدل k-ε استاندارد برای هندسه‌های ساده‌ی جریان داخل لوله در رینولدزهای بالا بدون هیچ حرکت چرخشی استفاده می‌شود و از آن‌جایی که مدل آشفتگی k-ε برای جریان آشفتگی در هسته‌ی مرکزی جریان معتبر است در نتیجه استفاده از تابع‌های دیواره که از تابع‌های نیمه‌تجربی‌اند، در نزدیکی دیواره لازم می‌شود [۱۳]. این تابع‌ها ارتباط بین متغیرها در سلول‌های نزدیک دیواره و کمیت‌های متناظر روی دیواره‌ها را برقرار می‌سازند. مدل k-ω استاندارد در فلوئنت براساس مدل k-ω ویلکاکس [۱۴] است که اصلاحاتی را برای اثرات عدد رینولدز پایین، تراکم‌پذیری و جریان برشی در نظر می‌گیرد. در نتیجه این مدل برای جریان‌های بین دیواره و جریان‌های برشی آزاد قابل استفاده است. مدل k-ω (SST) اساساً از لحاظ فرمول‌بندی مشابه مدل k-ω استاندارد است با این تفاوت که این مدل شامل تابع ترکیبی است به طوری‌که مدل k-ω را در نزدیکی دیواره و مدل k-ε را در ناحیه‌های دور از دیواره فعال می‌سازد. هم‌چنین در این مدل، تعریف گران‌روی آشفتگی به نحوی بهبود می‌یابد که انتقال تنش برشی آشفتگی را شامل شود؛ در این مدل انرژی جنبشی آشفتگی k و نرخ ویژه‌ی اتلاف ω از معادله‌های انتقال به دست می‌آیند

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\left[\frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+\tilde{G}_k-Y_k+S_k \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i)=\left[\frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right]+G_\omega-Y_\omega+D_\omega+S_\omega \qquad (۲)$$

که در آن‌ها $\tilde{G}_k$ تولید انرژی جنبشی آشفتگی k، به دلیل شیب سرعت متوسط و G_ω تولید ω است؛ Γ_k و Γ_ω به ترتیب، نفوذ مؤثر k و ω، Y_k و Y_ω اتلاف k و ω ناشی از آشفتگی، D_ω جمله‌ی نفوذ عرضی و S_k و S_ω جمله‌های چشمه را نشان می‌دهند.

Γ_k و Γ_ω به صورت $\Gamma_k=\mu+\mu_t/\sigma_k$ و $\Gamma_\omega=\mu+\mu_t/\sigma_\omega$ تعریف می‌شوند که در آن σ_k و σ_ω اعداد پرانتل آشفتگی‌اند. جایی که از تابع ترکیبی استفاده می‌شود تا از به‌کارگیری معادله‌های مدل موردنظر در هر دو ناحیه‌ی نزدیک دیواره و دور از دیواره اطمینان حاصل شود، گران‌روی آشفتگی چنین بیان می‌شود

$$\mu_t=\alpha^*\frac{\rho k}{\omega} \qquad (۳)$$

که ضریب α^* در آن، به عنوان تصحیحی در عدد رینولدز پایین، اثر گران‌روی آشفتگی را کم می‌کند

$$\alpha^*=\alpha^*_\infty\frac{\alpha^*_\circ+\mathrm{Re}_t/R_k}{1+\mathrm{Re}_t/R_k} \qquad (۴)$$

که در آن $\mathrm{Re}_t=\frac{\rho k}{\mu\omega}$، $R_k=۶$، $\alpha^*_\circ=\frac{\beta_i}{۳}$ و $\beta_i=۰/۰۷۲$؛ در اعداد رینولدز بالا $\alpha^*=\alpha^*_\infty=۱$.

۲.۲ شرایط مرزی

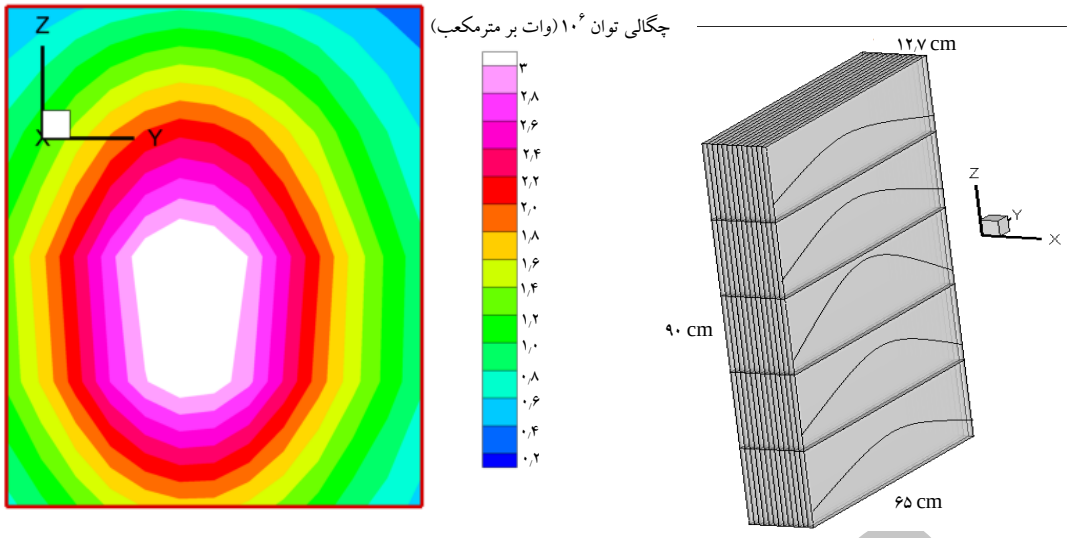
در این شبیه‌سازی، تیغه‌ی سربی، به ۱۳×۱۳×۱۵ بلوک سه‌بعدی به ترتیب، در جهت‌های x، y و z تقسیم‌بندی شد (ابعاد تیغه‌ی سربی در جهت‌های x و y و z به ترتیب، ۰/۱۲۷، ۰/۶۵ و ۰/۹ متر بود). با استفاده از کد MCNPX [۱۵] تولید گرما در داخل هر یک از این بلوک‌ها به صورت تابع کسینوسی و چندجمله‌ای نسبت به y محاسبه شد؛ این تابع‌ها با نوشتن تابع‌های تعریف شده به وسیله‌ی کاربر[۴] (UDF) در کد دینامیک سیال‌های محاسبه‌ای (CFD) بر روی عناصر تیغه‌ی سربی اعمال شد. توزیع چگالی توان در ۵ بلوک اول (دیواره‌ی گرم کانال) تحت شرایط کارکرد قلب با توان ۵ MW در شکل ۴ نشان داده شده است.

۳. یافته‌ها و بحث

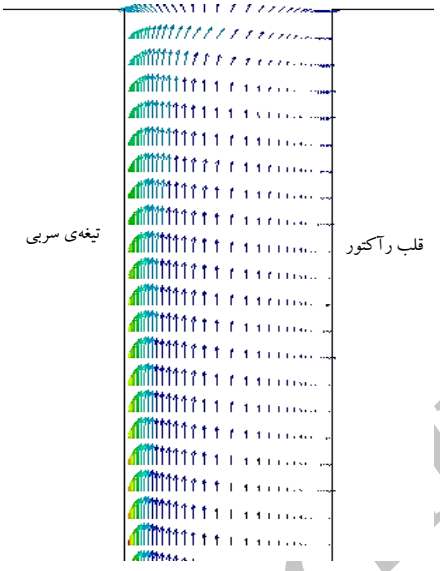
۱.۳ جریان جابه‌جایی طبیعی

در این پژوهش، ابتدا جریان طبیعی و انتقال حرارت در کانال عمودی با یک دیواره‌ی گرم شبیه‌سازی شد. کانال موردنظر متشکل از دو صفحه‌ی موازی یکی سطح خارجی تیغه‌ی سربی و دیگری دیواره‌ی قلب بود (شکل ۲). با جذب پرتوهای گاما، سطح تیغه‌ی سربی گرم شده و شرایط برای ایجاد جریان طبیعی در کانال ایجاد می‌شود.

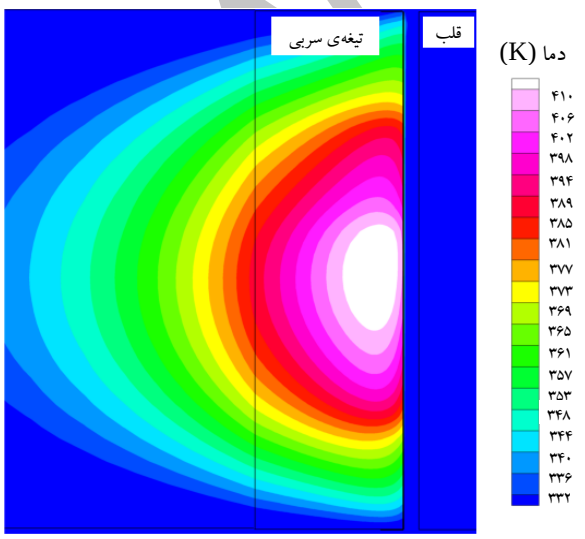
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ٤. توزیع چگالی توان در ۵ بلوک اول تیغه‌ی سربی.



شکل ۵. بردارهای سرعت در کانال (شرایط جریان طبیعی).

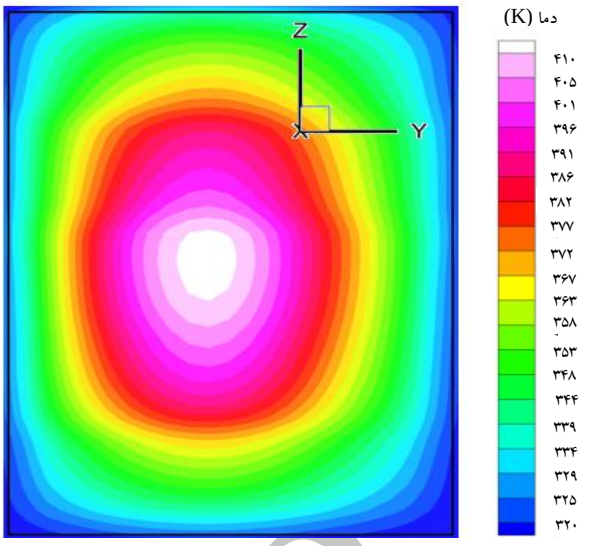


شکل ٦. توزیع دما در صفحه‌ی مرکزی ستون گرمایی، کانال جریان و لبه‌ی قلب.

بردارهای سرعت داخل کانال تحت جریان جابه‌جایی طبیعی در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل دیده می‌شود که نمایه‌ی سرعت در مقطع کانال نسبت به سطح مرکزی کانال متقارن نبوده و بیش‌ترین سرعت داخل کانال در نزدیکی صفحه‌ی داغ (تیغه‌ی سربی) اتفاق می‌افتد که این امر از شیب شدید دما و به تبع آن نیروی شناوری قوی‌تر در آن ناحیه نشأت می‌گیرد. توزیع دما در سطح مرکزی ستون گرمایی، کانال جریان و لبه‌ی قلب در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل توزیع توان استخراج شده از مرحله‌ی اول محاسبات، بیشینه‌ی دما در مرکز تیغه‌ی سربی اتفاق می‌افتد.

شکل ۷ توزیع دما روی سطح تیغه‌ی سربی را، که روبه‌روی دیواره‌ی قلب قرار دارد، نشان می‌دهد. این سطح باید توسط جریان جابه‌جایی طبیعی خنک شود. همان‌طور که دیده می‌شود بیشینه‌ی دمای سطح تیغه‌ی سربی (۴۱۰ K) از مقدار دمای متناظر با جوشش هسته‌ای سیال خنک‌کننده در فشار ۱٫۸ bar (۳۹۰ K) بیش‌تر است. لازم به ذکر است که افزایش فاصله بین تیغه‌ی سربی و لبه‌ی قلب رآکتور تأثیر چندانی بر توزیع دمای سطح تیغه‌ی سربی ندارد. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، ضخامت لایه‌ی مرزی گرمایی بسیار کوچک‌تر از فاصله‌ی بین قلب و تیغه‌ی سربی است؛ در نتیجه افزایش فاصله بین صفحه‌ها تأثیر قابل توجهی بر روی ضخامت لایه‌ی مرزی و به تبع آن نرخ انتقال حرارت ندارد. در این حالت، جریان جابه‌جایی طبیعی داخل کانال مشابه جریان ایجاد شده روی تک صفحه‌ی گرم است.

www.SID.ir



شکل ۷. توزیع دما روی دیواره‌ی کانال (تیغه‌ی سربی).

۲.۳ جریان جابه‌جایی اجباری

برای جلوگیری از پدیده‌ی جوشش سیال در مجاورت تیغه‌ی سربی، شرایط خنک‌سازی این صفحه باید بهبود یابد. در این رابطه، جابه‌جایی اجباری به عنوان سازوکار انتقال حرارت مؤثرتری مطرح می‌شود. در این حالت، صفحه‌ی مشبک[۵] قلب رآکتور به زیر کانال متشکل از دیواره‌ی قلب و دیواره‌ی ستون گرمایی امتداد می‌یابد به طوری که سیال خنک‌کننده می‌تواند داخل کانال (دو صفحه‌ی موازی) به سمت پایین جریان یابد و به داخل پلنیوم تخلیه شود. برخلاف کانال‌های سوخت که جریان از بالا وارد کانال می‌شود در کانال موردنظر سیال می‌تواند از کناره‌ها نیز وارد شود که در این حالت شرایط جریان عرضی نیز فراهم می‌شود.

طراحی برای برقراری جریان جابه‌جایی اجباری در کانال براساس دو مقوله‌ی کاهش دمای سطح تیغه‌ی سربی به مقداری پایین‌تر از دمای جوشش سیال و کم‌کردن جریان کنارگذر قلب (هر اندازه جریان کنارگذر کم‌تر باشد ظرفیت پمپ مدار اول به همان اندازه کاهش می‌یابد) انجام می‌شود. برای همین منظور، شبیه‌سازی برای کانال موردنظر برای سه حالت مختلف از سطح مقطع جریان خروجی از کانال به انجام رسید.

۱.۲.۳ حالت اول

به عنوان اولین شرایط آزمایش، کانالی با خروجی کاملاً باز در نظر گرفته شد. در این حالت جریان از سطح مقطعی به اندازه‌ی سطح مقطع عرضی کانال وارد پلنیوم می‌شد. مدل دینامیک سیال‌های محاسبه‌ای و شرایط مرزی در شکل ۸ نشان داده شده است. پس از بررسی مستقل بودن حل از شبکه‌ی محاسباتی، تعداد ۲۱۷۸۰۶۰ سلول محاسباتی برای این فاز از شبیه‌سازی در نظر گرفته شد و به علت وجود شیب‌های شدید مشخصه‌های جریان، از شبکه‌های ریزتر در نزدیکی دیواره‌ها و مرزها استفاده شد. لازم به ذکر است که فشار پلنیوم با استفاده از افت فشار موجود در قلب رآکتور تهران محاسبه و در خروجی کانال مربوطه اعمال شد.

شکل ۹ الف توزیع دما روی سطحی از تیغه‌ی سربی را که مقابل دیواره‌ی قلب قرار دارد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این شرایط (جابه‌جایی اجباری برای کانال با خروجی کاملاً باز) دمای این سطح در مقایسه با شرایط جابه‌جایی طبیعی، به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و هم‌چنین با توجه به شکل ۹ ب، مشاهده می‌شود که در شرایط جابه‌جایی اجباری، محدوده‌ی دما- بالا به سمت چپ تیغه‌ی سربی منتقل می‌شود در حالی‌که در شرایط جابه‌جایی طبیعی، نقاط دما- بالا در نزدیکی سطح خارجی تیغه‌ی سربی اتفاق می‌افتد.

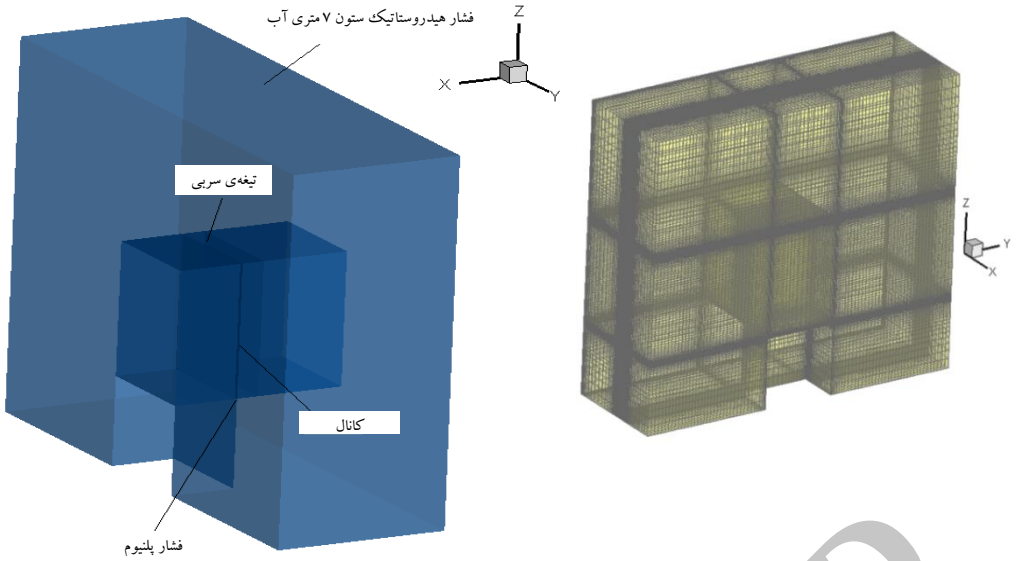
از آن‌جایی که توزیع دما روی سطح تیغه‌ی سربی (دیواره‌ی کانال) به میدان جریان داخل کانال بستگی دارد، خطوط جریان عبوری از کانال در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. واضح است که بیش‌تر جریان از وجه‌های کناری کانال وارد پلنیوم می‌شود که این مسأله از این حقیقت ناشی می‌شود که جریان در عبور از کناره‌های کانال، با مقاومت کم‌تری مواجه می‌شود.

لازم به ذکر است که در این حالت، نرخ جریان جرمی خروجی از کانال برابر $۴۰٫۵\ \mathrm{kg\ s^{-1}}$ ($۱۴۶\ \mathrm{m^3\ h^{-1}}$) محاسبه شد. از آن‌جایی که دمای سطح تیغه‌ی سربی ($۳۳۰\ \mathrm{K}$) از مقدار متناظر با پدیده‌ی جوشش بسیار فاصله دارد و جریان کنارگذر قلب نیز در این شرایط افزایش می‌یابد (۳۰٪ جریان نامی عبوری از قلب رآکتور) در نتیجه شرایط دیگری آزموده شد.

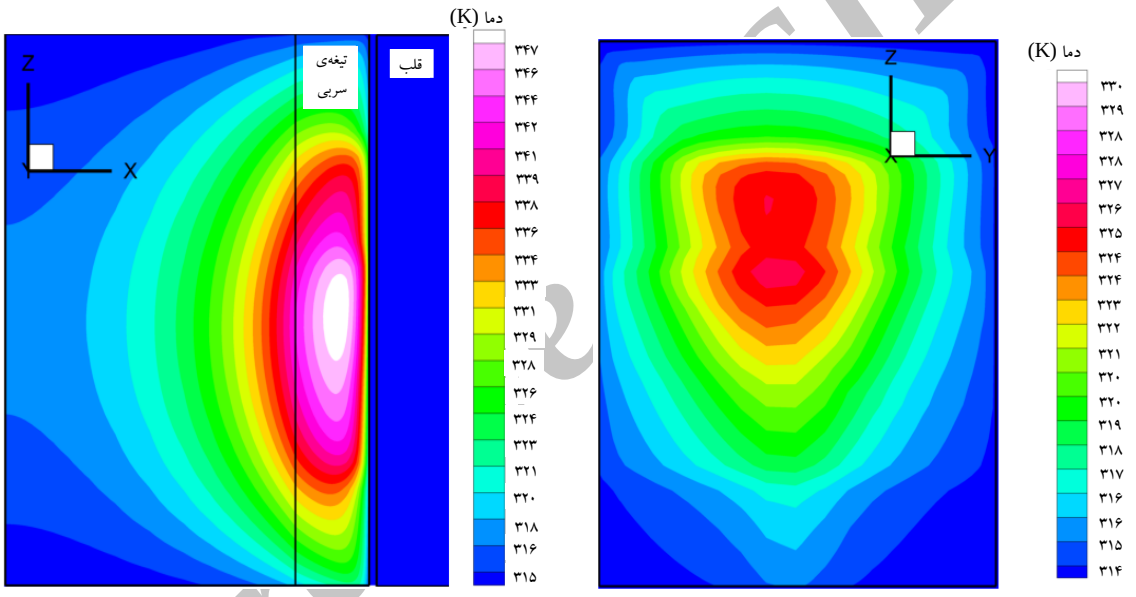
۲.۲.۳ حالت دوم

به عنوان دومین شرایط آزمایش، جریان داخل کانال با خروجی ۵۰٪ باز در نظر گرفته شد؛ این شرایط با ایجاد حفره‌ی مستطیلی‌شکل، که جریان از طریق آن وارد پلنیوم می‌شود، در خروجی کانال مربوطه برقرار شد میدان جریان مربوط به این شرایط در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

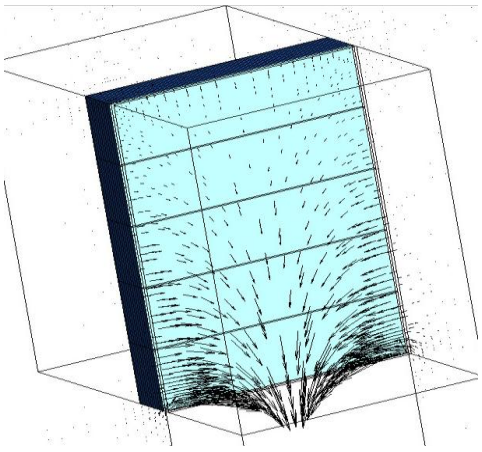
Archive of SID
www.SID.ir



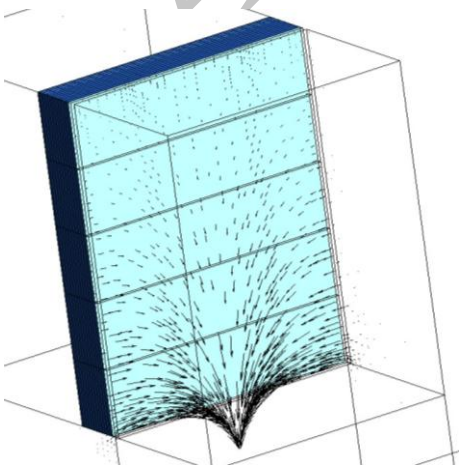
شکل ۸. مدل دینامیک سیال‌های محاسبه‌ای (CFD) شبیه‌سازی جریان اجباری.



شکل ۹. توزیع دما (الف) روی سطح تیغه‌ی سربی (دیواره‌ی کانال) و (ب) در صفحه‌ی مرکزی ستون گرمایی، کانال و دیواره.



شکل ۱۰. خطوط جریان در کانال با خروجی کاملاً باز.



شکل ۱۱. خطوط جریان در کانال با خروجی ٪۵۰ باز.

www.SID.ir

در این حالت نرخ جریان کنارگذر قلب بر $۲۵٫۳۵\ \mathrm{kg\ s^{-1}}$ ($۹۱٫۳\ \mathrm{m^3\ h^{-1}}$) بالغ شد. با این جریان ایجاد شده در کانال، توزیع دما روی سطح تیغه‌ی سربی مطابق شکل ۱۲ به دست آمد.

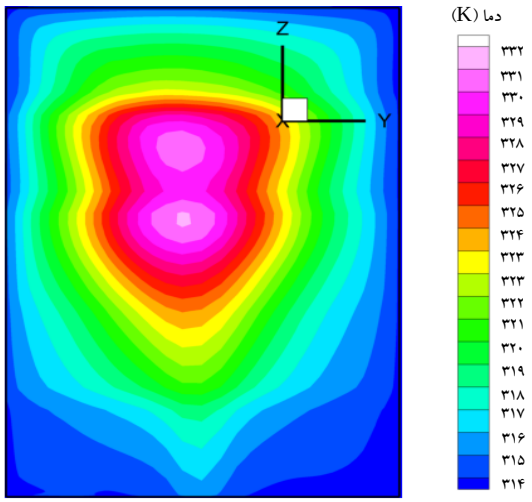
از آن‌جایی که بیشینه‌ی دمای سطح تیغه‌ی سربی هم‌چنان بسیار کم‌تر از دمای مربوط به جوشش هسته‌ای سیال است، در نتیجه شبیه‌سازی برای شرایط دیگری تکرار شد.

۳.۲.۳ حالت سوم

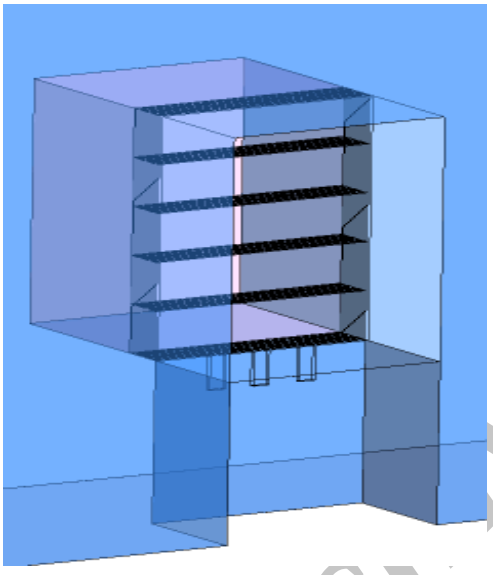
با توجه به قابلیت نشان داده شده‌ی سازوکار جابه‌جایی اجباری در خنک‌سازی تیغه‌ی سربی، به عنوان آخرین مورد، مسأله‌ی جریان و انتقال حرارت در کانال با سه حفره‌ی مستطیلی با اندازه‌های $۰٫۰۱۳\ \mathrm{m}\times۰٫۰۴۸\ \mathrm{m}$ در مقطع خروجی کانال که ۲۲ درصد از کل مقطع خروجی را شامل می‌شود، مورد بررسی قرار گرفت.

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 رآکتور در نظر گرفته شد. مدل محاسباتی جریان جابه‌جای اجباری به همراه سه حفره با اندازه‌های $۰٫۰۱۳\ \mathrm{m}\times۰٫۰۴۸\ \mathrm{m}$ در خروجی کانال (این سه حفره بر روی صفحه‌ی مشبک ایجاد می‌شود) در شکل ۱۳ الف نشان داده شده است.

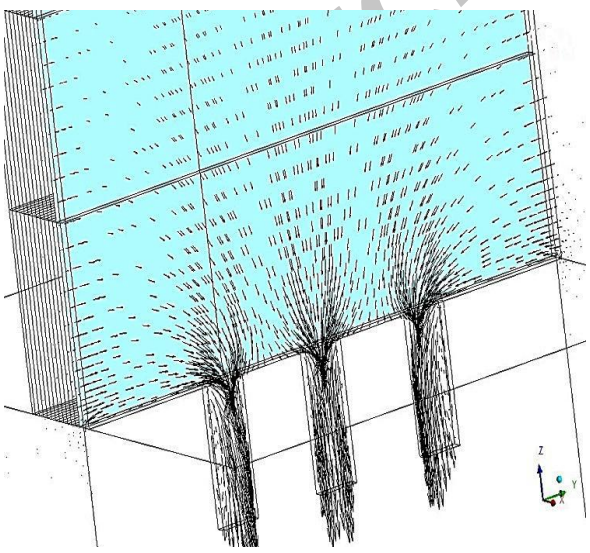
میدان جریان نشان داده شده در شکل ۱۳ ب، سبب می‌شود تا توزیع دمایی مطابق با شکل ۱۴ بر روی سطح تیغه‌ی سربی مجاور قلب پدید آید. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این شرایط طراحی، که از الگوی جریان جابه‌جایی اجباری بهره برده شده است، بیشینه‌ی دمای سطح تیغه‌ی سربی ($۳۵۵\ \mathrm{k}$) به مقداری کم‌تر از مقدار دمای مورد نیاز برای جوشش سیال می‌رسد که در این حالت، نرخ جریان عبوری از حفره‌ها (جریان کنارگذر قلب) $۱۱٫۱۶\ \mathrm{kg\ s^{-1}}$ به دست آمد که این مقدار، ٪۸ از مقدار جریان کل عبوری از قلب رآکتور ($۱۳۸٫۸\ \mathrm{kg\ s^{-1}}$) را شامل می‌شود. داده‌های حاصل از شبیه‌سازی این سه حالت از جریان جابه‌جایی اجباری در جدول ۱ ثبت شده است.



شکل ۱۲. توزیع دما روی سطح تیغه‌ی سربی (دیواره‌ی کانال).



(الف)



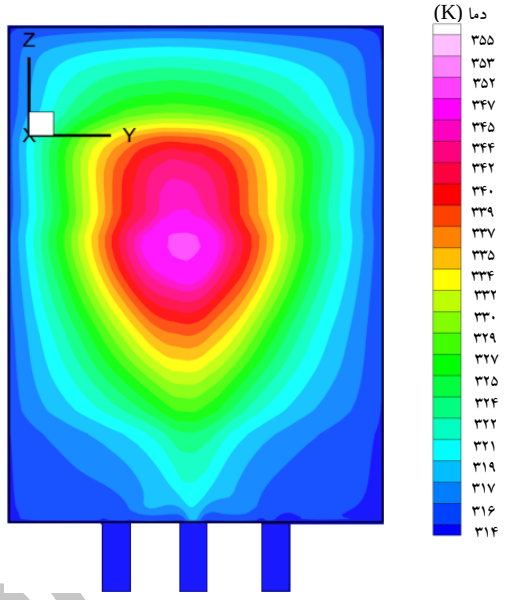
(ب)

شکل ۱۳. (الف) مدل محاسباتی برای کانال با ۳ حفره در خروجی (حالت جابه‌جایی اجباری)؛ (ب) بردار سرعت عبوری از حفره‌ها.

www.SID.ir

جدول ۱. مقادیر مربوط به دما و نرخ جریان در حالت‌های مختلف از جریان جابه‌جایی اجباری

پارامترها	جریان جابه‌جایی اجباری		
	کانال با خروجی کاملاً باز	کانال با خروجی ٪۵۰ باز	کانال با خروجی ٪۲۲ باز
بیشینه دمای تیغه‌ی سربی (K)	۳۳۰	۳۳۲	۳۵۵
نرخ جریان عبوری ($kg\ s^{-1}$)	۴۰٫۵	۲۵٫۳۵	۱۱٫۱۶



شکل ۱۴. توزیع دما روی سطح تیغه‌ی سربی.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جریان جابه‌جایی طبیعی و اجباری بین تیغه‌ی سربی (به عنوان بخشی از ستون گرمایی) و دیواره‌ی قلب رآکتور با استفاده از دینامیک سیال‌های محاسبه‌ای (CFD) شبیه‌سازی شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که در رآکتور تحقیقاتی تهران در شرایط کاری رآکتور با توان ۵ مگاوات، وقتی‌که از جریان طبیعی برای خنک‌سازی تیغه‌های سربی مجاور قلب بهره برده می‌شود، بیشینه دمای سطح تیغه‌ی سربی از دمای لازم برای جوشش هسته‌ای سیال بیش‌تر می‌شود. در حالی که با طراحی بهینه و ایجاد جریان اجباری در کانال تشکیل شده از تیغه‌ی سربی و هم‌چنین با در نظر گرفتن حاشیه‌های ایمنی قلب رآکتور می‌توان دمای سطح این تیغه را به اندازه‌ی قابل توجهی کاهش داد تا علاوه بر جلوگیری از پدیده‌ی جوشش و تشکیل حباب در استخر، جریان کنارگذر کم‌تری برقرار شود. هم‌چنین از آن‌جایی که بیشینه‌ی دما در مرکز تیغه‌ی سربی حاصل می‌شود و بیش‌تر جریان از کناره‌های کانال وارد حفره‌ها می‌شود، بهتر است که حفره‌های خروجی در وسط صفحه‌ی خروجی کانال قرار بگیرند.

پی‌نوشت‌ها

1. Computational fluid dynamic
2. Presto
3. Upwind scheme
4. User defined functions
5. Grid plate

Archive of SID

www.SID.ir

مرجع‌ها

[1] S. Ramanathan, R. Kumar, Correlations for Natural convection Between Heated Vertical Plates Heated Asymmetrically, ASME Journal of Heat Transfer, 113 (1991) 97-107.

[2] W. Elenbaas, Heat dissipation of Parallel Plates by Free Convection, Physica, 9 (1942) 1-28.

[3] W. Aung, Fully Developed Laminar Free Convection Between Vertical Plates Heated Asymmetrically, International Journal of Heat and Mass Transfer, 15 (1972) 1577-1580.

[4] W. Aung, L.S. Fletcher, V. Sernas, Developing Laminar free convection Between Vertical Plates with Asymmetrics Heating, International Journal of Heat and Mass Transfer, 16 (1972) 2293-2308.

[5] T.A. Wirtz, R.J. Stutzman, Experiments on Free Convection Between Vertical Plates With symmetric Heating, ASME Journal of Heat Transfer, 104 (1982) 501-507.

[6] E.M. Sparrow, L.F.A. Azevedo, Vertical-channel Natural Convection Spanning Between the Fully-developed Limit and the Single-plate Boundary-layer Limit, International Journal of Heat and Mass Transfer, 28(10) (1985) 1847-1857.

[7] M.A. Langerman, Natural convection Heat transfer Analysis of ATR Fuel Elements, Technical Report, Technical Information Center Oak Ridge Tennessee, (1992).

[8] M. Azzoune, L. Mammou, M.H. Boulheouchat, T. Zidi, M.Y. Mokeddem, S. Belaid, A. Bousbia Salah, B. Meftah, A. Boumedien, NUR research reactor safety analysis study for long time natural convection (NC) operation mode, Nuclear Engineering and Design, 240 (2010) 823-831.

[9] Samiran. Sengupta, P.K. Vijayan, Anil. Pathrose, S.B. Chafle, K. Sasidharan, Three dimensional conjugate heat transfer analysis of BeO reflector assemblies of upgraded Apsara reactor, Int. J. Adv Eng Sci Appl Math, 4(3) (2012) 152-164.

[10] Y. Kasesaz, H. Khalafi, F. Rahmani, A. Ezati, M. Keyvani, A. Hossnirokh, M.A. Shamami, Design and construction of a thermal neutron beam for BNCT at Tehran Research Reactor, Applied Radiation and isotops, In Press, 94 (2014) 149-151.

[11] Atomic Energy Organization of Iran, Safety analysis report for Tehran research reactor (TRR), 1, (January 2009).

[12] Ansys Inc, Fluent User's Guide 14, (2011).

[13] B.E. Launder, D.B. Spalding, The Numerical Computation of Turbulent Flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3 (1974) 269-289.

[14] D.C. Wilcox, Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc., La Canada, California, (1998).

[15] D.B. Pelowitz, MCNPx User's Manual, Version 2.5.0, LA-CP-05-0369, (April 2005).

Archive of SID

www.SID.ir