

بررسی نوعی جداکننده به شکل وایر پیچشی بر انتقال حرارت سیال خنک کننده در مجتمع های سوخت راکتور

منصور طالبی^{۱*}، رضا عبدالمهی^۲، جمشید خورسندی^۱

۱- سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

۲- دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی

چکیده: در این مقاله یک مجتمع سوخت شامل هفت میله سوخت که توسط وایرهای پیچشی نگه‌داری شده به روش عددی مورد بررسی قرار گرفته و انتقال حرارت در این دسته میله سوخت بررسی شده است. جریان سیال موازی با میله‌ها می‌باشد و این میله‌ها به صورت شار حرارتی یکنواخت گرم می‌شوند. علاوه بر این تغییرات عدد رینولدز و شار حرارتی بر جریان سیال روی میله‌های سوخت وایر پیچشی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که این وایرهای پیچشی با ایجاد جریان چرخشی و اختلاط بیشتر سیال بر روی میله‌های سوخت باعث یکنواختی بیشتر دما و انتقال حرارت بیشتر به سیال شده است. از طرف دیگر استفاده از این مغشوش کننده‌ها باعث افزایش افت فشار در طول مسیر میله‌های سوخت شده است.

کلید واژه: وایرهای پیچشی، شبیه‌سازی عددی، دسته میله سوخت

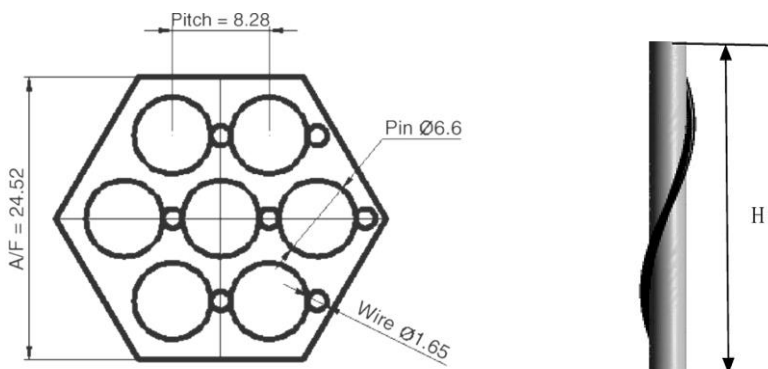
مقدمه: برای افزایش انتقال حرارت از میله‌های سوخت به سیال خنک‌کننده لازم است که ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال افزایش داده شود این امر با تعبیه وسایلی در مسیر جریان سیال که منجر به اختلاط و اغتشاش جریان سیال می‌شود امکان‌پذیر است که متداول‌ترین آن‌ها استفاده از پره‌های مغشوش‌کننده (نگهدارنده‌های شبکه‌ای میله سوخت) است. مغشوش کننده‌ها علاوه بر افزایش انتقال حرارت باعث ایجاد افت فشار در جریان سیال می‌شوند که یک عامل منفی در عملکرد راکتور می‌باشد بنابراین در طراحی این وسایل محاسبات بهینه‌سازی لازم است. وایرهای پیچشی تکنولوژی جدیدی از مغشوش کننده‌های جریان سیال و نگهدارنده‌های میله‌های سوخت راکتور هستند. در شکل ۱ نحوه قرارگیری این مغشوش کننده‌ها بر روی میله‌های سوخت مشخص شده است. با توجه به این شکل هر نگهدارنده وایر پیچشی دارای دو مشخصه گام محوری (H) و قطر وایر (D_w) می‌باشد. گام محوری به فاصله دو سر وایر در یک دور گردش کامل آن به دور میله سوخت گفته می‌شود.

ناتسان و همکاران با شبیه‌سازی سه بعدی جریان مغشوش سیال به بررسی افت فشار و انتقال حرارت میان دسته میله‌های سوخت ۱۹ تایی با نگهدارنده وایر پیچشی در راکتور سریع با فلز مذاب پرداختند [۱]. آنها از سه

مدل اغتشاشی $k-\omega$, $k-\varepsilon$ و تنش رینولدز استفاده کرده و نتایج عدد ناسلت و ضریب اصطکاک حاصل را با مقادیر تجربی مقایسه کردند و نشان دادند که ضریب اصطکاک حاصله از این مدل‌ها تقریباً بر هم منطبق هستند و در حدود ۶ درصد انحراف با رابطه تجربی ناوندسترن [۲] دارند. نتایج آنها نشان داد که وجود نگهدارنده و ایر پیچشی با افزایش اختلاط سیال خنک کننده منجر به کاهش تغییرات دمایی در هر قسمت از میله‌های سوخت شده است ولی افزایش افت فشار را نیز در پی دارد.

شبیه‌سازی سه بعدی انتقال حرارت و جریان سیال بر روی دسته میله‌های سوخت ۷، ۱۹، ۶۱ و ۲۷۱ تایی با نگهدارنده و ایر پیچشی در راکتورهای سریع با خنک کننده فلز مذاب توسط رولفو و همکاران در سال ۲۰۱۲ انجام شده است [۳]. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد که تغییر تعداد میله‌های سوخت اثر عمده‌ای روی ساختار جریان کلی ندارد. با توجه به این نکته که اکثر مطالعات عددی انجام شده در زمینه بررسی نگهدارنده‌های و ایر پیچشی بر روی راکتور با سیال فلز سدیم مذاب به عنوان سیال خنک کننده بوده است و کارهای انجام شده جهت بررسی تغییرات انتقال حرارت و جریان سیال بر روی راکتور با خنک کننده آب معدود است. این مقاله با مدل‌سازی مجتمع سوخت با نگهدارنده و ایر پیچشی به بررسی و مقایسه ترموهیدرولیکی جریان سیال و انتقال حرارت پرداخته است.

روش حل: هندسه مدل شبیه‌سازی شده شامل یک کانال شش وجهی دارای هفت میله سوخت با مغشوش کننده و ایر پیچشی می‌باشد. شرایط مرزی در این شبیه‌سازی شامل شرط مرزی سرعت و فشار به ترتیب برای جریان سیال ورودی و خروجی در نظر گرفته می‌شود. همچنین دیواره‌های کانال شش وجهی عایق فرض می‌شود و شار حرارتی بر روی سطح میله‌های سوخت در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱ هندسه و ابعاد مسئله مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل (۱) نمایی از هندسه مدل شبیه‌سازی شده

محاسبات انجام شده برای عدد رینولدز بین ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ می‌باشد و برای مدل‌سازی جریان مغشوش از مدل اغتشاشی $k-\varepsilon$ استفاده می‌شود به علت نیاز به وجود حافظه کامپیوتری بالا در انجام محاسبات طولی از

کانال به اندازه یک گام مغشوش کننده و ایر پیچشی در نظر گرفته شده است. تحلیل معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل صورت گرفته است. معادلات حاکم عبارتند از: معادله پیوستگی، مومنتوم، انرژی، انرژی جنبشی اغتشاشی و نرخ اتلافات اغتشاشی که در روابط ۱ تا ۵ آمده است:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

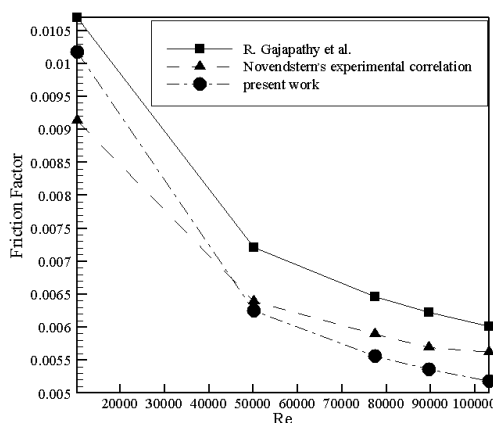
$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i}, \quad \tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}, \quad s_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j c_p T - K \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) = -\rho \varepsilon - \frac{2}{3}\left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k\right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (4)$$

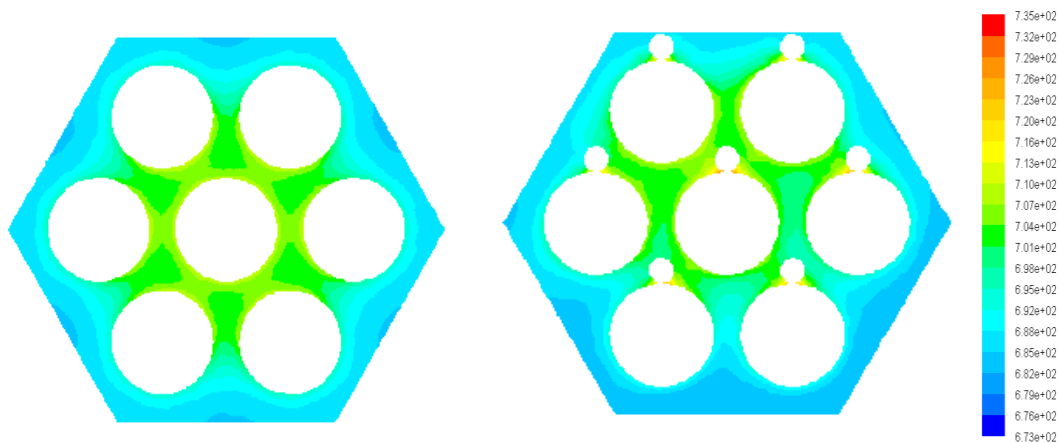
$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[-\frac{2}{3}\left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k\right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right] - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

نتایج: برای اعتبار سنجی شبیه سازی انجام شده مقادیر تغییرات ضریب اصطکاک $f = 2\left(\frac{\Delta P}{\rho V^2}\right)\left(\frac{d_h}{l}\right)$ مدل حاضر بدست آمده و با نتایج عددی ارائه شده توسط گاجاپاتی و همکاران [۴-۵] و نتایج تجربی ناوندسترن [۲] برای مدل مشابه با کار حاضر در شکل ۲ مورد مقایسه قرار گرفته است که نشان دهنده تطابق خوب نتایج شبیه سازی عددی حاضر با نتایج عددی و تجربی مبنای است.



شکل (۲) مقایسه ضریب اصطکاک بین نتایج کار حاضر و کارهای انجام شده

در نتایج بعدی اثر وایرهای پیچشی بر روی عملکرد جریان سیال و انتقال حرارت بر روی میله‌های سوخت بررسی شده است. کانتور دما برحسب کلوین در ارتفاع ۰/۷۵ طول کانال برای میله‌های سوخت با وایر پیچشی در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳ دمای سیال در مرکز کانال با وایر پیچشی کمی بیشتر است و همچنین با حرکت چرخشی سیال در طول کانال دمای سیال مجاور دیواره‌های کانال که شار حرارتی کمتری دریافت می‌کند افزایش می‌یابد. این در حالی است که در حالت کانال بدون وایر پیچشی دمای سیال در مرکز کانال بیشینه است ولی دمای سیال مجاور دیواره‌های کانال دمایی نزدیک به دمای سیال ورودی به کانال دارد به عبارت دیگر وجود وایر پیچشی باعث اختلاط بیشتر سیال در طول کانال و در نتیجه دمای سیال در تمامی سطح کانال یکنواخت‌تر می‌شود. در محل اتصال وایر پیچشی به میله‌های سوخت نقاطی با بیشترین دما مشاهده می‌شود که نقاط داغ نامیده می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که با کاهش عدد رینولدز و در نتیجه کاهش دبی ورودی به کانال از تعداد این نقاط و بیشینه دمایی آنها کاسته می‌شود.



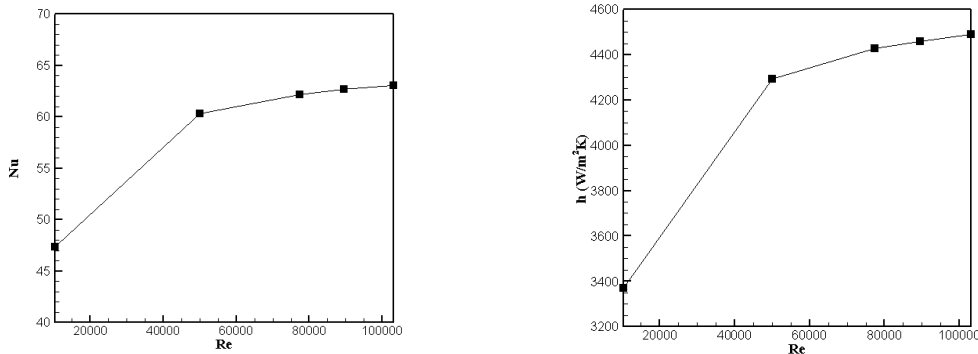
شکل (۳) توزیع دما روی میله‌های سوخت با و بدون وایر پیچشی در $Re = 89618$ و $Z = 0.75L$

مقایسه مقادیر افت فشار و ضریب اصطکاک بین دو حالت با و بدون وایر پیچشی در جدول ۱ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که افت فشار در کانال با وایر پیچشی در حدود دو برابر کانال بدون وایر پیچشی است. همچنین با افزایش سرعت سیال مقدار افت فشار نیز افزایش می‌یابد.

جدول (۱) مقایسه افت فشار و ضریب اصطکاک در کانال با و بدون وایر پیچشی

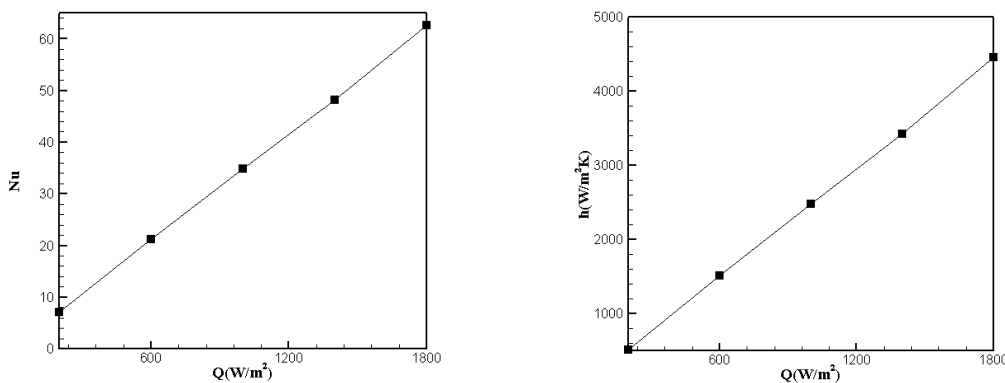
Re	f		$\Delta P(\text{pa})$	
	با وایر	بدون وایر	با وایر	بدون وایر
۱۰۳۰۸	۰,۰۱۰۱۸	۰,۰۱۱۴۳	۶۰۲	۳۲۹
۷۷۴۶۳	۰,۰۰۵۵۶	۰,۰۰۵۷۷	۱۸۵۵۰	۹۳۷۱
۱۰۳۰۸۵	۰,۰۰۵۱۸	۰,۰۰۵۲۹	۳۰۶۳۳	۱۵۲۶۰

تغییرات متوسط ضریب انتقال حرارت سطح و عدد ناسلت متوسط روی میله سوخت میانی با وایر پیچشی در کانال شش وجهی برای رینولدزهای مختلف در شکل‌های ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز متوسط ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. ولی که نرخ افزایش ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد.



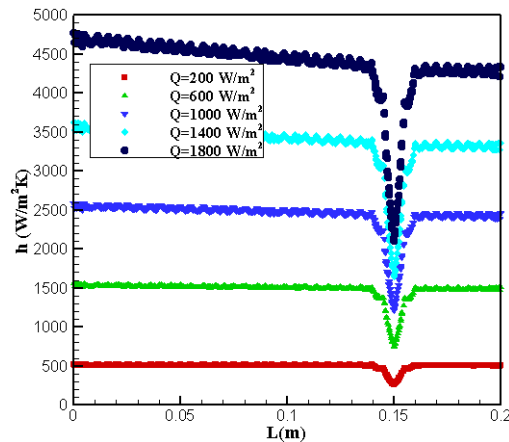
شکل (۴) توزیع ضریب انتقال حرارت سطح و عدد ناسلت متوسط روی میله سوخت میانی برای اعداد رینولدز مختلف

همچنین تغییرات متوسط ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت متوسط روی میله سوخت میانی با وایر پیچشی در کانال شش وجهی برای شارهای حرارتی مختلف در شکل‌های ۵ نشان داده شده است. افزایش شار حرارتی منجر به افزایش میزان متوسط ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت متوسط می‌شود.



شکل (۵) توزیع ضریب انتقال حرارت سطح و عدد ناسلت متوسط روی میله سوخت میانی برای شارهای حرارتی مختلف

شکل ۶ تغییرات ضریب انتقال حرارت محلی روی سطح میله سوخت میانی را به ازای شارهای حرارتی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶ روند تغییرات ضریب انتقال حرارت محلی برای شار حرارتی کمتر از ۱۰۰۰ وات بر مترمربع ثابت است و برای شارهای حرارتی بیشتر از این مقدار ضریب انتقال حرارت محلی با افزایش طول میله سوخت کاهش می‌یابد.



شکل (۶) توزیع ضریب انتقال حرارت محلی روی سطح میله سوخت میانی بر حسب شارهای حرارتی مختلف

بحث و نتیجه‌گیری: بررسی عددی سه بعدی جریان سیال بر روی دسته میله‌های سوخت با وایر پیچشی در یک کانال شش ضلعی نشان می‌دهد که وایر پیچشی باعث حرکت چرخشی سیال در طول کانال می‌شوند که این منجر به اختلاط بیشتر جریان سیال و در نتیجه یکنواختی دمایی بیشتر سیال در طول کانال می‌شود. استفاده از وایر پیچشی منجر به افزایش افت فشار سیال در طول کانال می‌شود که مقدار آن در حدود دو برابر افت فشار در حالت بدون مغشوش کننده است همچنین مغشوش کننده‌های وایر پیچشی منجر به ایجاد نقاط داغ در محل اتصال آن‌ها با میله‌های سوخت می‌شود که تعداد و بیشینه دمایی این نقاط با افزایش دبی سیال و در نتیجه افزایش عدد رینولدز بیشتر می‌شود. ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز و شار حرارتی افزایش می‌یابد.

مراجع:

- [۱] Natesan, K., Sundararajan, T., Narasimhan, A. and Velusamy, K., ۲۰۱۰. "A comparative Turbulent flow simulation in a wire-wrap rod bundle of an LMFBR". *Nuclear Engineering and Design*, ۲۴۰(۵), May, pp. ۱۰۶۳-۱۰۷۲.
- [۲] Novendstern, E.H., ۱۹۷۲. "Turbulent Flow pressure drop model for fuel rod assemblies utilizing a helical wire-wrap spacer system". *Nuclear Engineering and Design*, ۲۲(۵), December, pp. ۱۹-۲۷.
- [۳] Rolfo, S., Péniguel, C., Guillaud, M. and Laurence, L., ۲۰۱۲. "Thermal-hydraulic study of a wire spacer fuel assembly". *Nuclear Engineering and Design*, ۲۴۳(۵), February, pp. ۲۵۱-۲۶۲.
- [۴] Gajapathy, R., Velusamy, K., Selvaraj, P. Chellapandi, P. and Chetal, S.C., ۲۰۰۹. "A comparative CFD investigation of helical wire-wrapped ۷, ۱۹ and ۳۷ pin bundles and its extendibility to ۲۱۷ pin bundles". *Nuclear Engineering and Design*, ۲۳۹(۱۱), December, pp. ۲۷۷۹-۲۷۹۲.
- [۵] Gajapathy, R., Velusamy, K., Selvaraj, P. Chellapandi, P. and Chetal, S.C., ۲۰۰۷. "CFD investigation of helical wire-wrapped ۷-pin fuel bundle and the challenges in modeling full scale ۲۱۷ pin bundle". *Nuclear Engineering and Design*, ۲۷۳(۲۴), December, pp. ۲۳۳۲-۲۳۴۲.