



شبیه‌سازی عددی افت فشار و انتقال حرارت اجباری حول میله‌های یک مجتمع سوخت هسته‌ای به همراه شبکه‌های نگه‌دارنده

مجید عسگری^۱، منصور طالبی*^۲، محمدرضا عبدی^۳

۱. دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران

۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۸۱۴۶۵-۱۵۸۹، اصفهان - ایران

۳. دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران

چکیده: شبکه‌های نگه‌دارنده در مجتمع‌های سوخت هسته‌ای از جمله تجهیزاتی هستند که با ایجاد اغتشاش و هدایت جریان سیال در زیر کانال‌ها روی توزیع جریان سیال خنک‌کننده اثر می‌گذارند. در این مقاله یک دسته میله‌ی سوختی شامل ۶۰ میله‌ی سوخت به همراه ۴ شبکه‌ی نگه‌دارنده مطابق با ابعاد اصلی رآکتور VVER-440 مدل‌سازی و به روش عددی حل شده است. از ۳ مدل تلاطم استفاده شد. نتایج نشان داد در حالتی که از شبکه‌های نگه‌دارنده در طول دسته میله‌ی سوخت استفاده شود؛ ضریب انتقال حرارت در طول کانال نسبت به حالت بدون شبکه‌ی نگه‌دارنده افزایش می‌یابد. البته با اضافه کردن این شبکه‌ها افت فشار نیز افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از این پژوهش برای طراحی و ساخت مجتمع‌های سوخت و به دست آوردن پارامترهای ترمویدرولیکی مربوط به بهینه‌سازی انتقال حرارت میله‌ها کاربرد دارد.

کلیدواژه‌ها: شبکه‌ی نگه‌دارنده، مجتمع سوخت، پارامترهای ترمویدرولیکی

Numerical Simulation of Pressure Loss and Heat Transfer in Rod Bundle Fuel Assembly with Spacer Grids

M. Asgari¹, M. Talebi*², M.R. Abdi³

1. Faculty of Science & Advanced Technology, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan - Iran

2. Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 81465-1589, Isfahan - Iran

3. Faculty of Sciences, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan - Iran

Abstract: The spacer grids in nuclear fuel assembly are one of the equipments that affect the fluid flow distribution with the creation of turbulence and driven fluid flow in a sub-channel. In the present paper, the fuel bundle in the VVER-440 nuclear reactor that contains 60 fuel rods and 4 spacer grids has been simulated and solved by a numerical method. Three turbulent models were used. The results showed that using spacer grids over the fuel bundle led to an increase in the heat transfer coefficients. However, these grids increase the pressure drop. The results of this research can be used to design and manufacture the fuel assembly and obtain the relevant thermo hydraulic parameters to optimize the heat transfer of fuel rods.

Keywords: Spacer Grid, Fuel Assembly, Thermal-Hydraulic Parameters



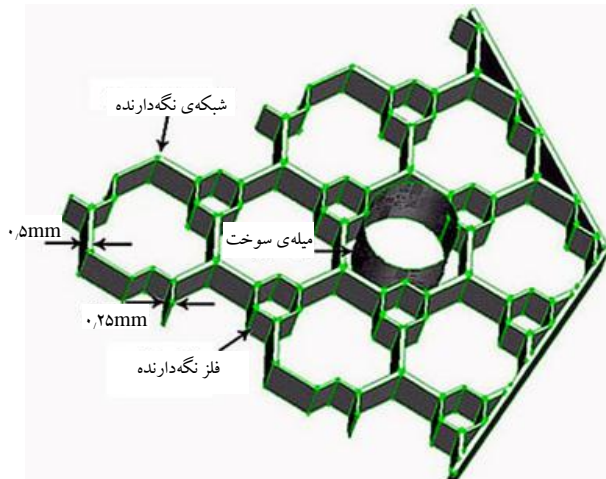
۱. مقدمه

دسته میله‌های موجود در رآکتورهای آب تحت فشار^(۱) شامل شبکه‌های نگه‌دارنده‌ای^(۲) هستند که با ایجاد فاصله‌ی مناسب بین میله‌های سوخت آرایش لازم برای دسته میله‌ها را فراهم کرده و از ارتعاش میله‌های سوخت در درون قلب رآکتور در شرایط کاری جلوگیری می‌کنند. هم‌چنین طراحی مناسب این شبکه‌ها می‌تواند به افزایش انتقال حرارت^(۳) کمک کند [۱]. جنس این شبکه‌ها اغلب از فولاد ضدزنگ یا از آلیاژهای زیرکینیم است. تجارب بهره‌برداری نیروگاه‌های اتمی نشان داده است که استفاده از آلیاژهای زیرکینیم خاص برای ساخت شبکه‌های نگه‌دارنده باعث بهبود پایداری ساختار مجتمع سوخت^(۴) نسبت به تورم پرتویی و خمش آن می‌شود. شبکه‌های نگه‌دارنده علاوه بر فراهم نمودن آرایش لازم برای میله‌های سوخت، کانال‌هایی را برای عبور سیال خنک‌کننده ایجاد می‌کنند [۲]. با توجه به این که شبکه‌های نگه‌دارنده بر روی توزیع جریان سیال خنک‌کننده اثر می‌گذارند شکل این شبکه‌ها تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی پارامترهای ترموهیدرولیکی^(۵) در کانال سوخت نظیر شار حرارتی و افت فشار^(۶) در مسیر حرکت سیال خنک‌کننده دارد [۳]. بررسی‌های متعددی در زمینه‌ی اثر شبکه‌های نگه‌دارنده و پره‌های مغشوش‌کننده روی پارامترهای ترموهیدرولیکی جریان سیال، در حالتی که آرایش میله‌های سوخت به صورت مربعی است، به صورت تجربی و هم‌چنین با روش عددی انجام شده‌اند. باگلیتو به بررسی اثر شبکه‌های نگه‌دارنده در ساختار جریان پرداخت. او محاسبات خود را در بازه‌ی وسیعی از سرعت‌ها انجام داد. او بیش‌تر بر بهبود روش‌های مدل‌سازی جریان آشفته تکیه کرد و مدل‌های محاسباتی مختلفی را برای رسیدن به درست‌ترین نتیجه مورد ارزیابی قرار داد. وی نشان داد که در نتایج خود مدل k-ε مناسب‌ترین مدل برای پیش‌گویی میدان جریان در طول کانال سوخت است [۴]. چانگک به بررسی اثر فاصله‌ی بین میله‌های سوخت و دیواره‌ی کانال در ساختار جریان و انتقال حرارت در یک دسته لوله پرداخت. او برای این کار از معادله‌های ناویر استوکس و انرژی استفاده کرد. او نشان داد که با کاهش فاصله‌ی بین میله‌ها و دیواره‌ی کانال دمای سیال بین میله‌ها و دیواره‌ی کانال و هم‌چنین انرژی جنبشی افزایش می‌یابد. او توانست فاصله‌ی بحرانی را که دما و انرژی جنبشی در آن افزایش و سپس کاهش می‌یابد به دست آورد [۵]. باراتو نیز همین آزمایش را برای یک دسته میله‌ی شامل ۵ میله انجام داد [۶].

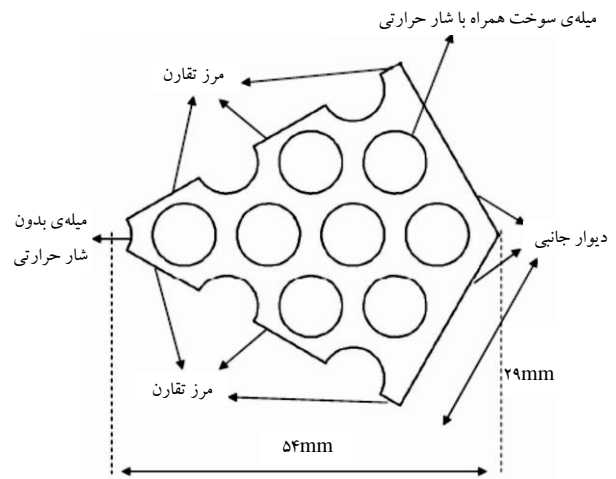
آشودنی با شبیه‌سازی^(۷) یک مجتمع سوخت رآکتور VVER-440 به وسیله‌ی کد CFX به مطالعه‌ی عددی مدل‌های مختلف آشفستگی جریان سیال در اطراف میله‌های سوخت پرداخت و نتایج حاصله را با حل عددی به وسیله‌ی کد COBRA مقایسه کرد [۷، ۸]. زینوس با شبیه‌سازی عددی جریان اطراف یک دسته لوله با آرایش مربعی مدل‌های مختلف آشفستگی را با هم مقایسه کرد و دریافت که مدل k-ε مدلی مناسب، برای پیش‌بینی جریان در فواصل کم نیست [۹]. چانگک به بررسی پارامترهای دما و سرعت در اطراف ۳۷ میله‌ی گرم‌شونده پرداخت و متوجه شد که افزایش دما در نواحی با پهنای کم، تدریجی است و اثر چندانی بر سرعت سیال ندارد [۱۰]. در این مقاله سعی بر آن است تا با شبیه‌سازی عددی، بتوان اثر چهار شبکه‌ی نگه‌دارنده روی پارامترهای ترموهیدرولیکی جریان سیال در اطراف یک مجتمع سوخت با آرایش مثلی را به دست آورد. مجتمع سوخت شبیه‌سازی شده برگرفته از یک مجتمع رآکتور نوع VVER-440^(۸) است. رآکتور VVER-440 مدل روسی رآکتور آب تحت فشار با توان حرارتی ۱۳۷۵ MW است که آرایش میله‌های سوخت در آن به صورت شش وجهی است. طول میله‌های سوخت در این رآکتور ۲۴۲۰ mm و گام^(۹) میله‌ها ۱۲۰۲ mm بوده و دارای ۱۱ شبکه‌ی نگه‌دارنده است [۷].

۲. مدل‌سازی و روش حل

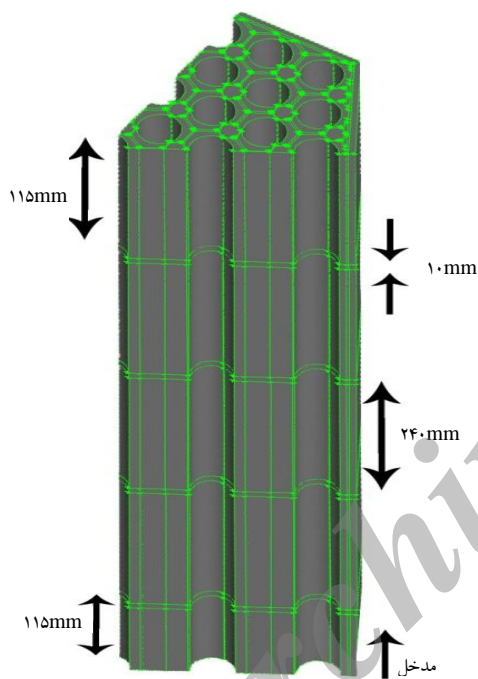
در این پژوهش تعداد ۶۰ میله‌ی سوخت مدل‌سازی شد. سطح مقطع دامنه‌ی حل مدل شده در شکل ۱ نشان داده شده است. حجم مورد بررسی شامل ۸ میله‌ی سوخت به صورت کامل و ۴ میله‌ی سوخت به صورت نیمه کامل قرار گرفته در مرز تقارن بود. به تمام میله‌ها به جز میله‌ای که در مرکز قرار داشت شار حرارتی ثابت اعمال شد. این میله در عمل به عنوان محل قرارگیری چشمه یا آشکارساز مورد استفاده قرار می‌گیرد. با مدل کردن این دامنه‌ی حل، هم حجم محاسبات کم‌تر و هم مدل به واقعیت نزدیک‌تر شد. ابتدا دسته میله‌ی بدون شبکه‌ی نگه‌دارنده به ازای ۳ مقدار متفاوت تراکم شبکه به صورت عددی حل شد (شکل ۲) و دست آمد. برای بررسی اثر شبکه‌های نگه‌دارنده بر پارامترهای ترموهیدرولیکی سیال، از شبکه‌های نگه‌دارنده‌ای استفاده شد که از نظر شکل هندسی و ابعاد مطابق با شبکه‌های نگه‌دارنده‌ای است



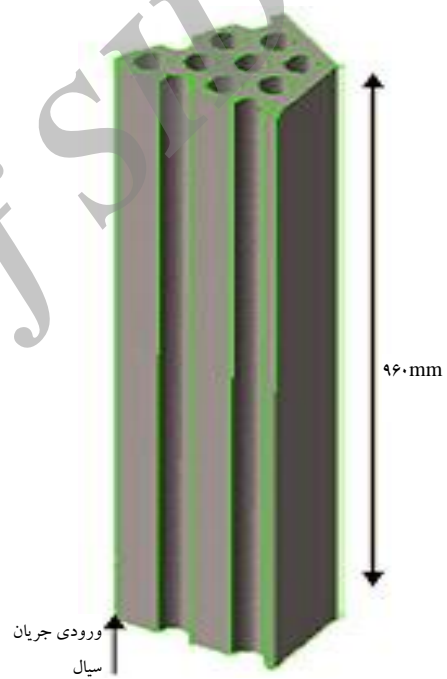
شکل ۳. شبکه‌ی نگه‌دارنده‌ی شبیه‌سازی شده.



شکل ۱. سطح مقطع دامنه‌ی حل مدل شده.



شکل ۴. دسته میله به همراه ۴ شبکه‌ی نگه‌دارنده.



شکل ۲. دسته میله‌ی بدون شبکه‌ی نگه‌دارنده.

معادله‌های حاکم، عبارت از معادله‌های پیوستگی، تکانه و انرژی هستند

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho u_j) = S_m \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (\partial / \partial t)(\rho u_j) + \nabla \cdot (\rho u_i u_j) &= -\nabla P + \nabla \cdot (\tau_{ij}) + \rho g_j + F_j \\ \tau_{ij} &= \mu[(\nabla u_i + \nabla u_i^T) - (\nu_r / \nu) \nabla \cdot u] \delta_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

$$(\partial / \partial t)(\rho E) + \nabla \cdot (u_j(\rho E + P)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (3)$$

که در حالت واقعی در مجتمع‌های سوخت رآکتور VVER-440 به کار می‌رود (شکل ۳). برای بررسی اثر شبکه‌های نگه‌دارنده بر پارامترهای ترموهیدرولیکی ابتدا تراکم مناسب شبکه به دست آورده شود که بدین منظور ابتدا نمونه‌ای از آن به ارتفاع ۲۴۰mm در نظر گرفته شد. بعد از حل دامنه‌ی محاسباتی و یافتن تراکم شبکه‌ی حل مناسب در این حجم، این مقدار تراکم شبکه به حجم اصلی به طول ۹۶۰mm به همراه ۴ شبکه‌ی نگه‌دارنده تعمیم داده شد. فاصله‌ی این شبکه‌ها از یک‌دیگر ۲۴۰mm و ارتفاع شبکه‌های نگه‌دارنده ۱۰mm بود (شکل ۴).



تحلیل آن پرداخته خواهد شد. مقادیر باقی‌مانده‌ها در همگرایی جواب، 10^{-5} و برای معادله‌ی انرژی، 10^{-9} در نظر گرفته شد. دسته میله به طول 960mm در حالت بدون شبکه‌ی نگه‌دارنده برای 3 نوع شبکه‌ی مختلف حل شد. تعداد سلول‌های هر حل برابر است با (4,050,000، 3,100,000 و 5,000,000). شاید در حالت بدون شبکه‌ی نگه‌دارنده نیازی به بررسی تراکم شبکه نباشد ولی این کار برای اطمینان از عدم وابستگی جواب نهایی به تعداد سلول و همچنین اندازه‌ی آن‌ها انجام شد. برای راستی آزمایشی نتایج و اطمینان از درستی نتایج چند نمونه‌ی ساده به وسیله‌ی برنامه اجرا شد که نتایج آن در مرجع‌های [1، 2] قابل مشاهده است.

نتایج در این حالت برای پارامترهای دما و سرعت سیال در راستای خط A با مختصات نقاط $z = 0.15$ و $y = 0.035$ و $a_1(x = 0.305)$ و $a_2(x = 0.305)$ و $z = 0.975$ و $y = 0.035$ و $z = 0.975$ طول دسته میله رسم شد (شکل 5). در شکل 6 نمودار دمای سیال در راستای خط A برای 3 تراکم شبکه‌ی مختلف برای حالت بدون شبکه‌ی نگه‌دارنده رسم شده است. با توجه به شکل 6 مشاهده می‌شود که هر 3 نمودار روی یک‌دیگر منطبق شده‌اند، به همین جهت برای تفکیک نمودار و رسیدن به مناسب‌ترین تراکم شبکه از نمودار سرعت سیال در راستای خط A مطابق با شکل 7 استفاده شد. با توجه به شکل 7 مشاهده می‌شود که خطوط قرمز و آبی تقریباً بر یک‌دیگر منطبق شده‌اند. این بدین مفهوم است که از 4,050,000 تراکم شبکه به بعد جواب‌ها تغییری نمی‌کنند. لذا برای صرفه‌جویی در زمان و بالا بردن سرعت در رسیدن به جواب نهایی و عدم صرف زمان اضافی در تولید شبکه‌بندی بیش‌تر می‌توان گفت 4,050,000 تراکم شبکه، مقادیر مناسب تراکم شبکه نسبت به دیگر مقادیر است. در این حالت (بدون شبکه‌ی نگه‌دارنده) نمودار سرعت از مقدار 3.25 m/s در ورودی سیال در راستای خط A شروع شده تا مقدار 3.67 m/s می‌رسد. از این مقدار به بعد سرعت تغییر نمی‌کند و به حالت یکنواخت و توسعه‌یافتگی می‌رسد. علت افزایش سرعت در طول کانال، رشد لایه‌ی مرزی در طول کانال است که این امر به دلیل اثر گرانروی روی جریان است. در نتیجه سرعت در طول کانال از ناحیه‌ی هیدرودینامیکی به سمت ناحیه‌ی توسعه یافتگی پیش می‌رود (شکل 8) [13]. البته سرعت متوسط در خروجی برابر با مقدار سرعت در ورودی و برابر با 3.25 m/s است. با پیشروی در طول کانال از ورودی تا خروجی به علت رشد لایه‌ی مرزی و افزایش دمای سیال و در نتیجه کاهش نرخ انتقال حرارت با سطح میله، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

سیال مورد بررسی، تراکم‌ناپذیر و جریان آن دایمی بود. برای حل از روش سیمپل با کمک جداسازی آپویند مرتبه‌ی دو⁽¹⁰⁾ استفاده شد. حل این معادله‌ها توسط نرم‌افزار فلونت انجام شد. برای بررسی نتایج، از 3 مدل تلاطم استفاده شد. این 3 مدل عبارت‌اند از: مدل دو معادله‌ی (k-ε)، مدل یک معادله‌ی اسپالارت-آلماراس⁽¹¹⁾ و مدل دو معادله‌ی (k-ω SST). نحوه‌ی حل معادله‌ها در پیوست (1) آمده است. برای اطلاعات بیش‌تر به مرجع [2] مراجعه شود.

1.2 شرایط مرزی

شرایط مرزی که در این پژوهش برای دامنه‌ی حل در نظر گرفته شد به صورت زیر است.

سرعت ورودی سیال ثابت و برابر 3.25 m/s بود. دمای سیال ورودی برابر 540K و شدت اغتشاش سیال در ورودی با توجه به راهنمای فلونت، 3/5 درصد در نظر گرفته شد [11]. با توجه به این که سرعت سیال در خروجی به حالت توسعه یافتگی کامل نمی‌رسد از شرط مرزی بقاء جرمی در خروجی استفاده شد. قطر هیدرولیکی 0.0699m بود. در لایه‌ی مرزی روی دیواره‌ها سرعت برابر صفر در نظر گرفته شد. همچنین از نظر حرارتی دیواره‌ها بی‌دررو در نظر گرفته شدند. برای جامد از مشخصات فیزیکی فلز زیرکینیم با مشخصات زیر استفاده شد.

$$k=22.6 \text{ W/m.K} \text{ و } C_p=278 \text{ J/kg.K}, \rho=6520 \text{ Kg/m}^3$$

همچنین برای آب با دمای متوسط 550K مشخصات ترموفیزیکی برابر است با:

$$C_p=5.24 \text{ J/kg.K}, k=0.58 \text{ W/m.K}, \rho=755.85 \text{ Kg/m}^3$$

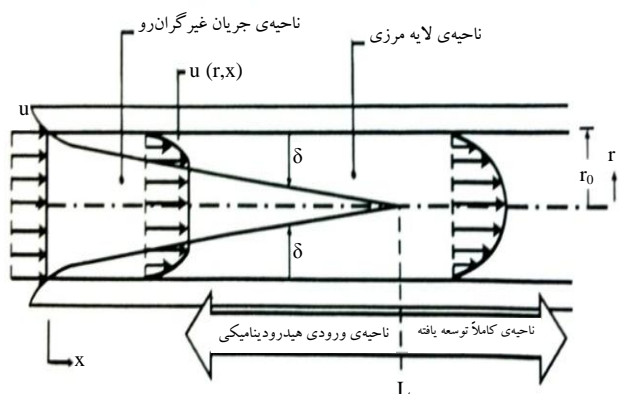
$$Re=219233.5, Pr=0.87$$

شار اعمال شده به سطح میله‌ها از روابط موجود در کتاب انتقال حرارت الوکیل⁽¹²⁾ به دست آمده است (روابط 30.4 و 21.4) [12].

با توجه به این که قدرت رآکتور 1375MW و تعداد 349 مجتمع سوخت و 126 میله‌ی سوخت در رآکتور وجود دارد توان هر میله‌ی سوخت برابر است با $q=1047340 \text{ W/m}^2$.

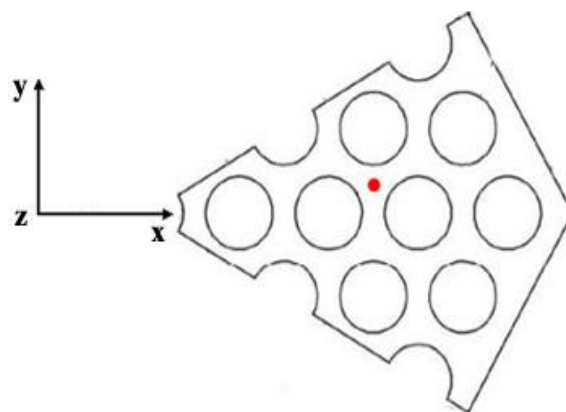
3. نتایج

یکی از عوامل مهم در رسیدن به جواب با دقت مناسب انتخاب تراکم شبکه‌ی کافی و مطمئن شدن از عدم وابستگی جواب نهایی به تراکم شبکه و تعداد نقاط ایجاد شده است. بعد از حل معادله‌ها و همگرا شدن نتایج، توزیع سرعت، دما، فشار و ضریب انتقال حرارت در کل دامنه‌ی حل، به دست آمد که در زیر به

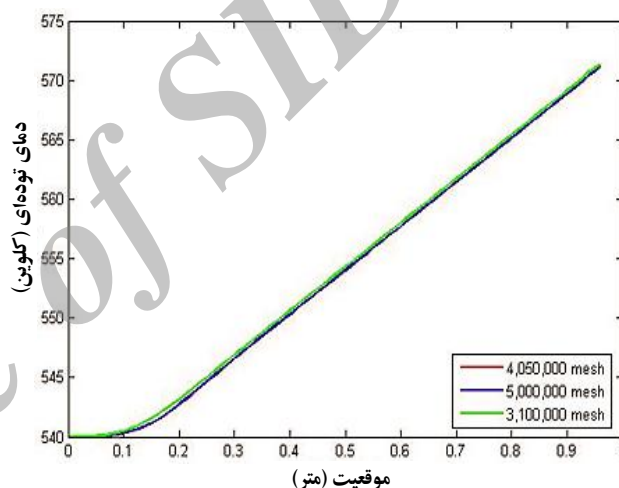


شکل ۸. نمودار سرعت سیال بین ناحیه‌ی هیدرودینامیکی و ناحیه‌ی توسعه یافته [۱۳].

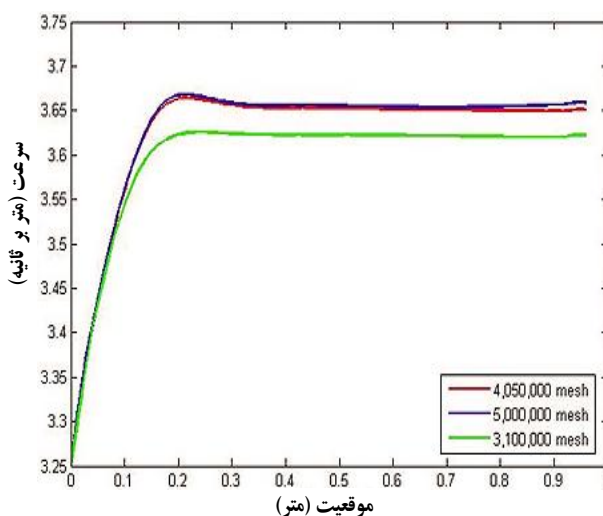
برای بررسی اثر شبکه‌ی نگه‌دارنده، ابتدا دسته میله‌ای به ارتفاع 240 mm به همراه یک شبکه‌ی نگه‌دارنده که در نصف فاصله‌ی طولی این ارتفاع قرار گرفته است شبیه‌سازی شد (شکل ۹). علت استفاده از این ارتفاع این است که طبق شکل ۴ این نمونه‌ی حجمی در کل دسته میله متناوباً تکرار شده است. سپس نمونه‌ی موردنظر، شبکه‌بندی و برای ۳ مقدار تراکم شبکه‌ی مختلف حل شد تا تراکم شبکه‌ی مناسب به دست آید. نمایی از شبکه‌بندی تولید شده در نواحی مرزی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که تراکم شبکه در نواحی مرزی به خوبی رعایت شده است. برای دست یافتن به تراکم شبکه‌ی مناسب علاوه بر خط A با مختصات که پیش از این ذکر شده، خط B که از نقاطی با مختصات $z = 0.15$ و $y = 0$ و $b_1(x = 0.2895)$ و $b_2(x = 0.2895)$ و $y = 0$ و $z = 0.975$ می‌گذرد مطابق شکل ۱۱ در نظر گرفته شد. تراکم شبکه‌ی مناسب از رسم نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت سطح در راستای خط B (شکل ۱۲) و تغییرات سرعت سیال در راستای خط A (شکل ۱۳) و مقایسه‌ی آن‌ها با یک‌دیگر حاصل شد. بعد از رسم نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت در راستای خط B به ازای طول نمونه‌ی شبیه‌سازی شده مشاهده شد که خط قرمز ($3,000,000$ تراکم شبکه) و خط آبی ($1,850,000$ تراکم شبکه) نزدیکی بیش‌تری با هم دارند، (شکل ۱۲). از شکل ۱۲ می‌توان مشاهده کرد که ضریب انتقال حرارت در طول کانال در حال کاهش بوده و با رسیدن به شبکه‌ی نگه‌دارنده به دلیل کاهش سطح مقطع کانال و افزایش سرعت سیال، ناگهان افزایش می‌یابد. سپس در طول شبکه‌ی نگه‌دارنده با همان شیب پیشین و به دلیل افزایش لایه‌ی مرزی حرارتی کاهش می‌یابد و در خروجی



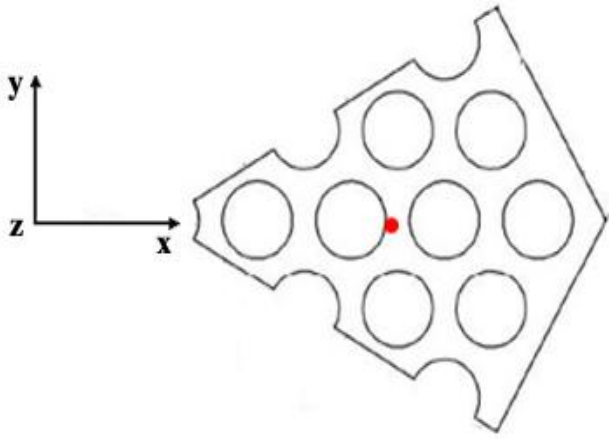
شکل ۵. مختصات خط A در بین دسته میله از محل ورودی سیال تا خروجی در مقطع عرضی که با رنگ قرمز مشخص شده است (این خط در امتداد میله‌های سوخت یا محور Z قرار دارد و در شکل به صورت یک نقطه دیده می‌شود).



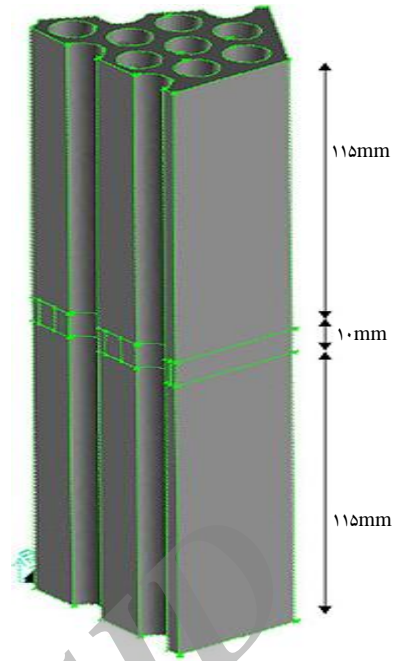
شکل ۶. نمودار دمای سیال در راستای خط A برای ۳ تراکم شبکه‌ی مختلف.



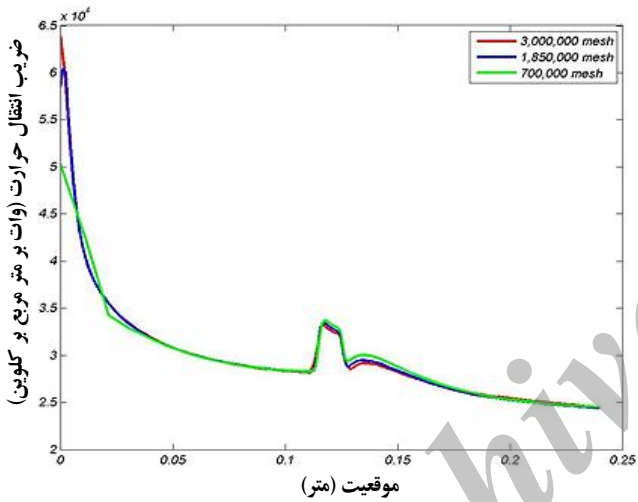
شکل ۷. نمودار سرعت سیال در راستای خط A برای ۳ تراکم شبکه‌ی مختلف.



شکل ۱۱. مختصات خط B روی سطح یکی از میله‌ها از محل ورودی سیال تا خروجی در مقطع عرضی که با رنگ قرمز مشخص شده است (این خط در امتداد میله‌های سوخت یا محور Z قرار دارد و در شکل به صورت یک نقطه دیده می‌شود).

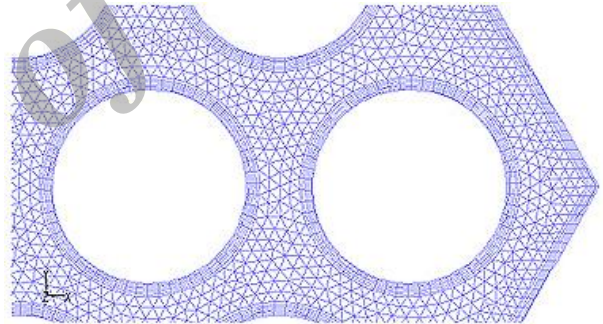


شکل ۹. نمونه‌ی در نظر گرفته شده برای بررسی تراکم شبکه‌ی مناسب.

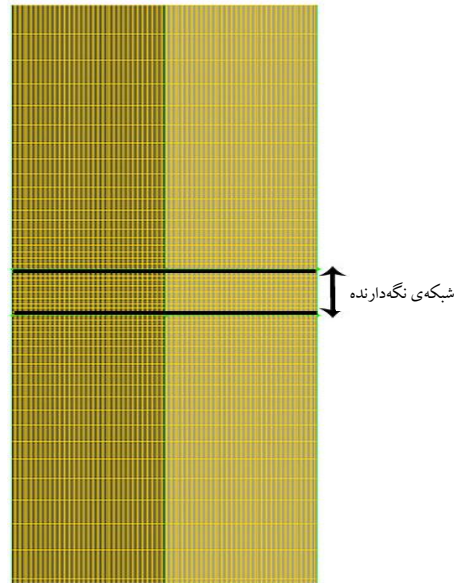


شکل ۱۲. تغییرات ضریب انتقال حرارت سطح میله در راستای خط B به ازای مقادیر مختلف تراکم شبکه.

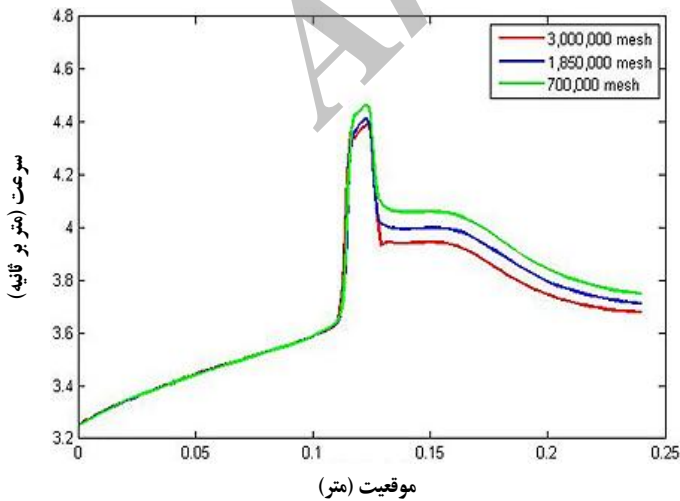
(الف)



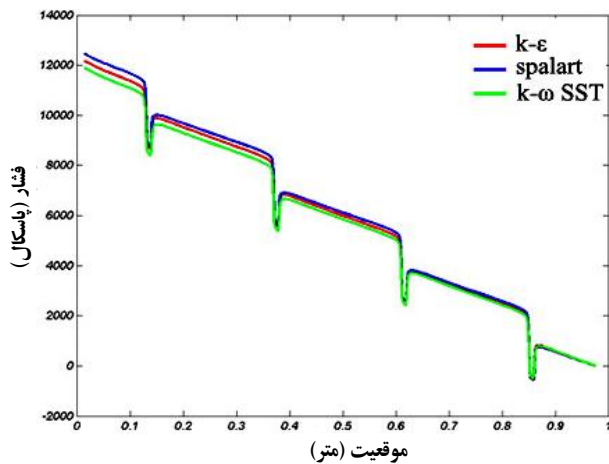
(ب)



شکل ۱۰. تراکم شبکه‌ی ایجاد شده در نواحی مرزی؛ الف) اطراف میله، ب) اطراف شبه‌ی نگه‌دارنده.



شکل ۱۳. تغییرات سرعت سیال در راستای خط A به ازای مقادیر مختلف تراکم شبکه.



شکل ۱۴. تغییرات فشار در راستای خط A برای ۳ مدل تلاطم مختلف.

در شکل ۱۵ افت فشار برای دو حالت با و بدون شبکه‌ی نگه‌دارنده با یک‌دیگر مقایسه شده است. می‌توان دریافت که افت فشار در حالت با شبکه‌ی نگه‌دارنده در حدود ۵kPa بیش‌تر از حالتی است که در آن از شبکه‌ها استفاده نمی‌شود. این اختلاف در افت فشار، مجموع ۴ افت فشاری است که سیال در پشت شبکه‌های نگه‌دارنده به صورت ناگهانی پیدا می‌کند.

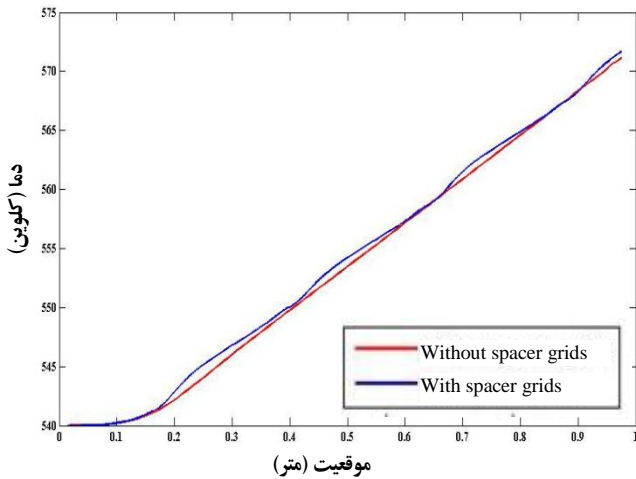
هم‌چنین در شکل ۱۶ توزیع فشار به صورت رابط‌ی بدون بعد (f) ارایه شده است. مشاهده می‌شود که بعد از شبکه‌های نگه‌دارنده به دلیل گردابه‌های تشکیل شده، ضریب اصطکاک (f) بیش‌تر تحت تأثیر قرار گرفته است. با کاهش سرعت محوری و افزایش سرعت چرخش در پشت شبکه‌های نگه‌دارنده، f کاهش یافته است.

در شکل ۱۷ تغییرات دمای سطح میله در راستای خط B برای ۳ مدل تلاطم مختلف نشان داده شده است. دمای سطح میله در طول دسته میله در حال افزایش است. هنگامی که سیال به پشت شبکه‌های نگه‌دارنده می‌رسد به دلیل کاهش شدت اغتشاش، دمای سطح افزایش می‌یابد و به محض ورود به داخل شبکه به خاطر افزایش سرعت سیال و در نتیجه افزایش نرخ خنک‌کاری، دمای سطح کاهش می‌یابد که این افت دمایی به ازای هر شبکه‌ی نگه‌دارنده حدوداً ۲,۷۶K به دست آمد. در خروجی شبکه‌ی نگه‌دارنده، به دلیل کاهش سرعت و کم شدن انرژی جنبشی سیال، دمای سطح افزایش می‌یابد. در شکل ۱۸ تغییرات دمایی سیال در راستای خط A برای دو حالت با و بدون شبکه‌ی نگه‌دارنده با یک‌دیگر مقایسه شده است. علت افزایش دمای سیال در حالت با شبکه‌ی نگه‌دارنده نسبت به حالت بدون شبکه‌ی نگه‌دارنده است که به دلیل شکل هندسی خاص شبکه‌های نگه‌دارنده و ایجاد تلاطم و جریان چرخشی سیال قبل و بعد از شبکه‌های نگه‌دارنده، حرارت بیش‌تری از میله‌ی سوخت

شبکه‌ی نگه‌دارنده نیز به دلیل افزایش سطح مقطع کانال و کاهش سرعت، کاهش پیدا می‌کند. در مرحله‌ی بعد با رسم نمودار تغییرات سرعت سیال در راستای خط A با توجه به شکل ۱۳ مشاهده شد که خطوط قرمز و آبی تطابق بیش‌تری با یک‌دیگر دارند. این بدین مفهوم است که از ۱,۸۵۰,۰۰۰ تراکم شبکه به بعد، تغییرات ناچیز است. به همین دلیل ۱,۸۵۰,۰۰۰ تراکم شبکه، تراکم مناسب است. با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که سرعت سیال در راستای خط A و قبل از شبکه‌ی نگه‌دارنده در حال افزایش است تا به شبکه‌ی نگه‌دارنده برسد. با رسیدن به شبکه‌ی نگه‌دارنده و کاهش سطح مقطع کانال جریان، سیال با افزایش ناگهانی سرعت مواجه خواهد بود. بعد از شبکه‌ی نگه‌دارنده به دلیل ایجاد گردابه‌های احتمالی و هم‌چنین تأثیر شبکه‌های نگه‌دارنده در تولید جریان چرخشی، سرعت محوری سیال کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که بعد از شبکه‌ی نگه‌دارنده و در طول ۱۱۵mm، سرعت سیال ثابت نشده و به حالت یکنواخت و توسعه‌یافتگی نمی‌رسد. در مرحله‌ی بعد از این، مقدار تراکم در کل دسته‌ی میله به همراه ۴ شبکه‌ی نگه‌دارنده استفاده شد.

در حل این مسئله از ۳ مدل تلاطم مختلف استفاده شد. افت فشار در یک دسته میله‌ی سوخت عموماً ناشی از شبکه‌های نگه‌دارنده، نیروی ثقل و هم‌چنین ضریب اصطکاک روی میله‌های سوخت است. تغییرات فشار در راستای خط A برای ۳ مدل تلاطم مختلف در شکل ۱۴ نشان داده شده است. سیال با رسیدن به شبکه‌ی نگه‌دارنده با سطح مقطع کوچک‌تری مواجه می‌شود. بنابراین سرعت افزایش و فشار کاهش می‌یابد. افت فشار دیگر، ناشی از طول کانال است. افت فشار ناشی از هر شبکه‌ی نگه‌دارنده با توجه به شکل ۱۴ و با استفاده از ۳ مدل آشفتگی برابر تقریباً ۸۴۶,۴۳ Pa به دست آمد که مطابق با مرجع [۱۴] در صورتی که تعداد میله‌ها دو برابر شود با نتایج آن مرجع مطابقت دارد. سرعت سیال در حال پیشروی در ابتدای کانال در حال زیاد شدن است تا این که به شبکه‌ی نگه‌دارنده برسد. در این حالت به علت مواجه شدن با سطح مقطع کوچک‌تر، بلافاصله در طول شبکه سرعت افزایش می‌یابد تا این که به خروجی شبکه برسد. در این حالت به خاطر خروج سیال به حجم بزرگ‌تر و افزایش سطح مقطع جریان، سرعت کاهش نسبی می‌یابد. دلیل دیگر کاهش سرعت سیال به خاطر کاهش سرعت محوری سیال در راستای خط A و افزایش سرعت چرخشی سیال است. این روند برای تمامی شبکه‌ها تکرار می‌شود. معادله‌ای که از برازش این منحنی به دست می‌آید تابعی چندجمله‌ای و به صورت زیر است

$$P = 21086x^4 - 43990x^3 + 31057x^2 - 21024x + 12604 \quad (4)$$



شکل ۱۸. تغییرات دمای سیال در راستای خط A برای دو حالت با شبکه‌ی نگه‌دارنده و بدون شبکه‌ی نگه‌دارنده.

به سیال منتقل می‌شود و این نشان‌دهنده‌ی انتقال حرارت بهتر بین میله‌ی سوخت و سیال است. با توجه به شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که ضریب انتقال حرارت در ناحیه‌ی شبکه‌ها افزایش ناگهانی پیدا می‌کند که به خاطر بالا رفتن سرعت سیال و افت ناگهانی دما است. این افزایش ناگهانی در ناحیه‌ی شبکه‌ها باعث بالا رفتن نرخ انتقال حرارت می‌شود. این افزایش ضریب انتقال حرارت باعث می‌شود در مجموع ضریب انتقال حرارت متوسط در طول کانال سیال افزایش یابد که به بهبود انتقال حرارت کمک می‌کند. ضریب انتقال حرارت در ابتدای کانال و در محل‌های شبکه‌های نگه‌دارنده افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد در حالی که در صورت نبودن شبکه، این مقدار در طول کانال به طور پیوسته کاهش داشت.

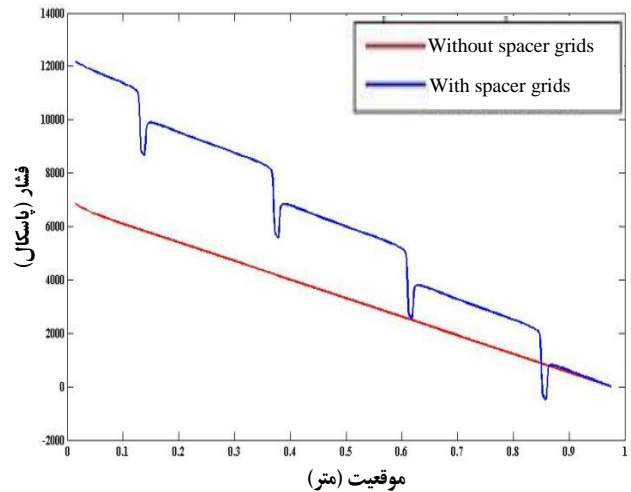
معادله‌ای که از برازش منحنی ضریب انتقال حرارت به دست آمد به صورت زیر است

$$Nu = 3.07e^{y x^{-0.99}} - 3.06e^{y x} \quad (5)$$

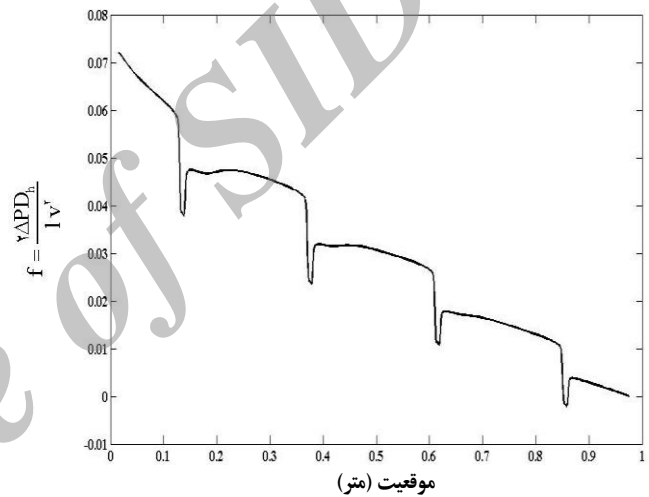
ضریب انتقال حرارت در شکل ۱۹ از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید

$$Q = hA\delta T / \partial X \quad (6)$$

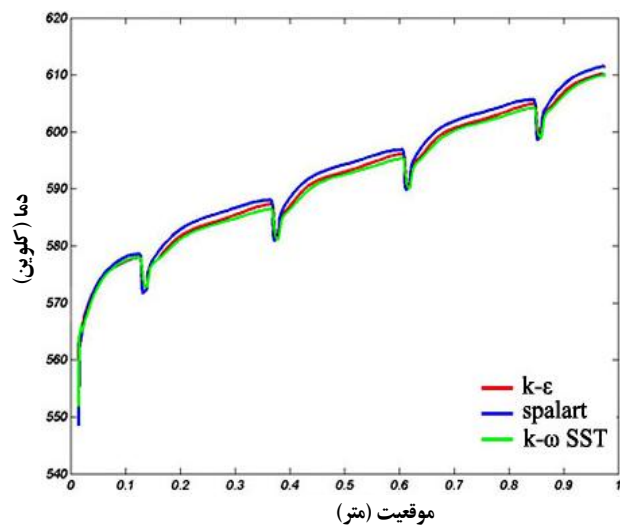
که در آن، δT اختلاف دمای سطح میله با دمای سیال است. با توجه به این که رابطه‌ی دیتوس-بولتر برای محاسبه‌ی عدد ناسلت در جریان مغشوش مجتمع‌های سوخت مورد استفاده قرار می‌گیرد، در شکل ۲۰ عدد ناسلت دو حالت با و بدون شبکه‌ی



شکل ۱۵. مقایسه‌ی افت فشار در دو حالت با و بدون شبکه‌ی نگه‌دارنده.



شکل ۱۶. توزیع فشار به صورت رابطه‌ی بدون بعد برای حالت با شبکه‌ی نگه‌دارنده.



شکل ۱۷. تغییرات دمای سطح میله در راستای خط B برای ۳ مدل تلاطم مختلف.

عدد ناسلت محاسبه شده از رابطه‌ی تجربی دیتوس- بولتر برابر 40762 است که در مرجع [۱۳] با خطای ۲۵٪ برابر 40762 ± 1019 است. با توجه به شکل ۲۰ می‌توان نتیجه گرفت که عدد ناسلت محاسبه شده از رابطه‌ی دیتوس- بولتر به طور تقریبی با متوسط عدد ناسلت در حالت با و بدون شبکه‌ی نگه‌دارنده برابر است و این خود دلیلی بر صحت و درستی نتایج است.

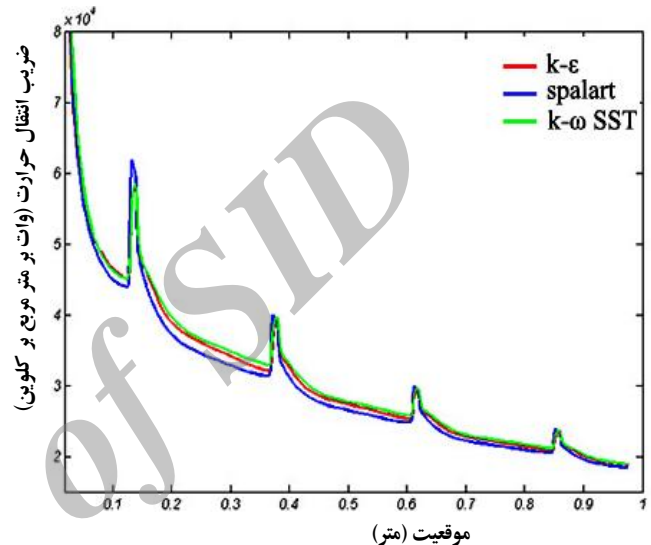
شبکه‌های نگه‌دارنده با افزایش ضریب انتقال حرارت، در کل باعث افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط از میله‌های سوخت به سیال می‌شوند. البته با فاصله گرفتن از شبکه به دلیل تأثیرپذیری کم‌تر سیال از شبکه‌ی نگه‌دارنده این مقدار کاهش می‌یابد. همان‌طور که از شکل‌های ۱۴، ۱۷ و ۱۹ مشاهده می‌شود نتایج حاصل از ۳ مدل تلاطم مختلف با تقریب خوبی با یک‌دیگر مطابقت دارند. اختلاف اندکی که بین آن‌ها وجود دارد بیشتر به خطای مدل‌سازی و خطای محاسبه مربوط می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

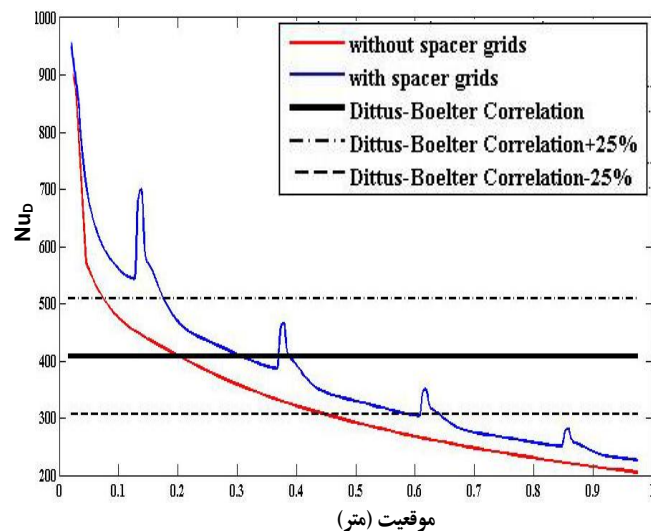
پارامتر افت فشار در طول دسته میله‌ی سوخت در راستای خط A به همراه ۴ شبکه‌ی نگه‌دارنده در حالتی که از ۳ مدل اغتشاش مختلف برای محاسبه‌ی جریان سیال استفاده شد به علت تفاوت در روش با هم تفاوت اندکی دارند. این اختلاف در ابتدای دسته میله به خاطر همگرایی سرعت و وجود شبکه‌های بزرگ‌تر نسبت به نواحی مرزی بیش‌تر است. دمای سطح میله در ابتدا به خاطر فاصله‌ی زیاد با شبکه‌ها و در نتیجه اثر کم اغتشاش ناشی از شبکه‌ها روی سیال و انتقال حرارت، کم‌تر در حال افزایش بود که با رسیدن به شبکه‌ها افت دمایی مشاهده شد. ضریب انتقال حرارت به خاطر افت دمایی سطح میله در محل هر شبکه‌ی نگه‌دارنده و افزایش اختلاف دمای سطح میله با سیال افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که وقتی از شبکه‌های نگه‌دارنده در طول دسته میله‌ی سوخت استفاده می‌شود؛ ضریب انتقال حرارت 49.55 درصد افزایش می‌یابد. البته با وجود این شبکه‌ها افت فشار 80 درصد افزایش پیدا می‌کند. دمای سیال خروجی در این حالت نسبت به حالت بدون شبکه‌های نگه‌دارنده 6.096 کلوین کم‌تر است.

نگه‌دارنده با رابطه‌ی تجربی دیتوس- بولتر مقایسه شده است. (با توجه به تعریف عدد ناسلت در مسئله برحسب قطر هیدرولیکی و هم‌چنین تغییرات h در طول دسته میله‌ی سوخت، در این نمودار تغییرات Nu_D برحسب x رسم شده است). رابطه‌ی دیتوس- بولتر برای جریان توسعه یافته چنین است

$$Nu_D = 0.723 Re^{1/4} Pr^{1/4} \quad (7)$$



شکل ۱۹. تغییرات ضریب انتقال حرارت سطح میله در راستای خط B برای ۳ مدل تلاطم مختلف.



شکل ۲۰. مقایسه‌ی عدد ناسلت دو حالت با و بدون شبکه‌ی نگه‌دارنده با رابطه‌ی تجربی دیتوس- بولتر (با توجه به تعریف عدد ناسلت برحسب قطر هیدرولیکی و هم‌چنین تغییرات h در طول دسته میله‌ی سوخت، در این نمودار تغییرات Nu_D برحسب x رسم شده است).



مرجع‌ها:

1. M. Asgari, M. R. Abdi, M. Talebi, Survey of increase Reynolds number in thermo hydraulic parameters of fluid flow around fuel bundle of VVER-440 reactor with three spacer grids, 17th Iranian Nuclear Conference, Iran Uranium Processing & Nuclear Fuel Manufacturing Co, Isfahan (2010).
2. M. Asgari, M. R. Abdi, M. Talebi, H. Ahmadikia, Thermal hydraulic simulation of fluid flow and heat transfer around fuel bundle of PWR reactor and sarvey the effect of spacer grids, 19th International Medanic Conterence, 15-16 (2010).
3. K. Ikeda, M. Hoshi, Development of Mitsubishi high thermal performance grid, JSME International Journal, 45(3) (2002).
4. E. Baglietto, H. Ninokata, A turbulence model study for simulating flow inside tight lattice rod bundles, Nuclear Engineering and Design, 235 (2005) 773–784.
5. D. Chang, S. Tavoularis, Simulations of turbulence, heat transfer and mixing across narrow gaps between rod-bundle subchannels, Nuclear Engineering and Design, 238 (2008) 109–123.
6. F. Baratto, S. Bailey, S. Tavoularis, Measurements of frequencies and spatial correlations of coherent structures in rod bundle flows, Nuclear Engineering and Design, 236 (2006) 1830–1837.
7. A. Aszodi, S. Toth, “CFD study on coolant mixing in VVER-440 fuel rod bundles and fuel assembly heads, Nuclear Engineering and Design, 240 (2009) 2194–2205.
8. A. Aszódi, S. Tóth, CFD analysis of flow field in a triangular rod bundle, Nuclear Engineering and Design, 21 (2008) 352–363.
9. C. Tzanos, Performance of $k-\epsilon$ turbulence models in the simulation of LWR fuel-bundle flows, Nuclear Engineering and Design, 84 (2001) 197–199.
10. S. Chang, A. Moon, Phenomenological investigations on the turbulent flow structures in a rod bundle array with mixing devices, Nuclear Engineering and Design, 238 (2006) 600–609.
11. Ansys, Fluent 6.3 user’s guide, (2006).
12. M. M. EL-Wakil, Nuclear energy conversion, 4th Edition, American Nuclear Society (1982).
13. Incropera, F. De Witt, Introduction to heat transfer, 4th Edition, USA (2002).
14. S. Tóth, A. Aszódi, Calculations of Coolant Flow in a VVER-440 Fuel Bundle with the Code Ansys CFX 10.0, Proc. Technical Meeting on Use of CFD Codes for Safety Assessment of Reactor Systems, Pisa Italy.

فهرست علائم

- u: سرعت (m/s)
- T: دما (K)
- E: انرژی (J)
- F: نیروی خارجی (N)
- t: زمان
- P: فشار
- S: چشمه‌ی تولیدی یا افزایش جرم
- k: ضریب هدایت حرارتی
- h: ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی
- x: مؤلفه‌ی مکانی در طول دسته میله
- Pr: عدد پرانتل
- ρ : چگالی یونانی (kg/m^3)
- τ : تنش (N/m)
- μ : ویسکوزیته (N.s/m^2)

پی‌نوشت‌ها:

۱. Pressurized Water Reactor (PWR)
۲. Spacer Grids
۳. Heat Transfer
۴. Fuel Assembly
۵. Thermal Hydraulic
۶. Pressure Drop
۷. Simulation
۸. VVER Type Reactor
۹. Pitch
۱۰. 2nd Order Upwind
۱۱. Spalart-Allmaras
۱۲. Elwakil