



بررسی عددی اثرات ترموهیدرولیکی مغشوش کننده سیم‌پیچشی با گام‌های مختلف در مجتمع سوخت شش‌وجهی

منصور طالبی^{۱*}، رضا عبدالهی^۲، محمدامین برهانی^۳

^۱ دانشیار مهندسی مکانیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، تهران، ایران

^۲ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

^۳ کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱

چکیده

در این پژوهش اثرات ترموهیدرولیکی مغشوش کننده‌های سیم‌پیچشی با گام‌های مختلف در شرایط ترموهیدرولیکی متفاوت برای یک مجتمع سوخت شش‌وجهی با هفت میله سوخت بررسی شده است. تحلیل حرارتی و سیالاتی برای چهار گام ۶۶، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ انجام گرفته و سپس نتایج بدست آمده با حالت بدون مغشوش کننده مقایسه شده است. برای انجام این شبیه سازی از مدل آشفتگی k-ε استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز نسبت افت فشار مجتمع سوخت دارای سیم‌پیچ به بدون سیم‌پیچ در رینولدز ۱۰۰۰۰۰ افزایش ۱۰۰ درصدی دارد. کانتورهای سرعت نشان می‌دهد کاهش گام مغشوش کننده سیم‌پیچشی باعث اختلاط بهتر جریان و چرخش سیال در طول کانال می‌شود. کاهش گام در رینولدز ثابت نیز باعث افزایش افت فشار است (افزایش ۶۰ درصدی برای کاهش گام از ۲۰۰ به ۱۰۰ میلی‌متر). با استفاده از کانتورهای انتقال حرارت سیال در طول کانال اثرات بهبود انتقال حرارت با حضور سیم‌پیچ را می‌توان مشاهده کرد. همچنین کاهش گام باعث توزیع یکنواخت‌تر دما در هر مقطع از مجتمع می‌شود.

کلمات کلیدی: مغشوش کننده سیم‌پیچشی؛ انتقال حرارت؛ افت فشار؛ شبیه‌سازی عددی؛ ترموهیدرولیک.

Numerical Study of Thermo Hydraulic Effect of Wire Wrap Spacer with Different Pitch in Hexagonal Fuel Assembly

Mansour Talebi¹, Reza Adollahi², Mohammad Amin Borhani³

¹ Assoc., Prof., Mech. Eng., Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

² MSc. Mech. Eng, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

³ MSc. Nuc. Eng., Shahid Beheshti University., Tehran, Iran

Abstract

In this paper, thermo-hydraulic effects of the wire-wrap spacer in a hexagonal fuel assembly with seven fuel rods have been investigated. The effects of wire-wrap pitch and Reynolds number on fluid flow, pressure drop, and temperature distribution have been analyzed. Thermal and fluid analysis has been studied for 66, 100, 200, and 400 wire-wrap pitches. K-ε turbulence model is used to perform this numerical simulation. The results are compared with a no-wire-wrap state. The results show that by increasing the Reynolds number, the pressure drop of the assembly with and without wire-wrap increases (100% increase in Reynolds number of 100,000). At a constant Reynolds number, decreasing the pitch of wire-wrap increases the pressure drop (60% increase by reducing the pitch from 200 to 100 mm). Wire-wrap improves flow mixing and heat transfer, and by reducing the pitch of the wire-wrap, the results have a more uniform distribution of temperature in each section of the assembly.

Keywords: Wire Wrap Spacer; Heat Transfer; Pressure Drop; Numerical Simulation; Thermo-Hydraulic.

۱- مقدمه

در یک نیروگاه هسته‌ای، گرمای حاصل از میله‌های سوخت در قلب راکتور، توسط سیال خنک‌کننده دریافت می‌شود. سیال خنک‌کننده به مولد بخار وارد شده و بخار موردنیاز توربین تولید می‌شود. برای بهبود عملکرد انتقال حرارت، مهندسان همواره دنبال راهکارهای جدید برای افزایش ضریب انتقال حرارت سیال هستند. این بهبود عملکرد با استفاده از ابزاری که در مسیر جریان سیال که منجر به اختلاط و آشفتگی جریان سیال شود، امکان‌پذیر است.

استفاده از مغشوش‌کننده‌های سیم‌پیچی^۱ دو کاربرد دارد، یکی به ایجاد فاصله بین میله‌ها کمک می‌کند و دیگری سبب افزایش اختلاط خنک‌کننده می‌شود [۱]. در مجتمع سوخت راکتورهای معمول از نگهدارنده‌هایی با فواصل مختلف استفاده می‌شود [۲، ۳]. نوع نگهدارنده در در راکتورهای سریع به صورت سیم‌پیچ است. این سیم‌پیچ‌ها باعث افزایش افت فشار شده که تأثیر منفی در عملکرد ترموهیدرولیک راکتور دارد. از این‌رو در طراحی آن‌ها باید محاسبات بهینه‌سازی انجام شود. مغشوش‌کننده‌های سیم‌پیچی سیال را وادار می‌کند تا در اطراف میله‌های سوخت بچرخد و عملکرد انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. اثرات این سیم‌پیچ‌ها در قلب راکتور، نوع حرکت جریان سیال و انتقال حرارت میله‌های سوخت باید برای طراحی بهینه بررسی شود.

نیجسینگ و همکاران [۴] یک روش عددی برای پیش‌بینی خواص ترموهیدرولیک جریان تک فاز و یکنواخت در اطراف میله‌های سوخت یک راکتور سریع با خنک‌کننده نمک مذاب ارائه کردند. نتایج نشان داد که در مجتمع‌های سوخت با سیم‌پیچ‌هایی که فاصله بین دیوار و مرکز میله سوخت برابر یا بیشتر از فاصله دو میله مجاور است، دمای میله‌های سوخت به‌طور قابل‌توجهی (۷۰ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر) تغییر می‌کند. جریان چرخشی در کانال‌های فرعی که ناشی از سیم‌پیچ است باعث کاهش دمای میله‌ها می‌شود. مطالعه تجربی ضریب اصطکاک و انتقال حرارت در جریان آرام و آشفتده روی یک مجتمع سوخت ۶۱ میله‌ای با سیم‌پیچ در یک مدار آب توسط آرمیکار و فنچ [۵] انجام شد. آن‌ها مشاهده کردند که پروفیل فشار (فشار اطراف میله سوخت) دارای افت قابل‌توجهی با حضور سیم‌پیچ است. همچنین سیم‌پیچ باعث

افزایش انتقال حرارت می‌شود. ضریب اصطکاک محاسبه‌شده در جریان آرام بسیار نزدیک به ضریب اصطکاک لوله‌های صاف است و با نتایج نیمه تجربی ناوندسترن [۶] مطابقت دارد. فنچ [۷] انتقال حرارت موضعی را روی مجتمع سوخت با سیم‌پیچ به‌صورت تجربی مطالعه کرد. در این مطالعه، هشت میله سوخت در یک کانال شش‌ضلعی قرار گرفتند تا دمای بالک دقیق‌تری در کانال به دست آید. او همچنین رابطه دقیق‌تری را برای عدد ناسلت در مقایسه با تحقیقات قبلی به دست آورد [۶]. شیمیزو و همکاران [۸] یک روش عددی را به‌منظور محاسبه توزیع دمایی جریان تک فاز و یکنواخت در یک راکتور سریع با خنک‌کننده نمک مذاب و مغشوش‌کننده سیم‌پیچی ارائه کردند. آن‌ها اشاره کردند در رینولدزهای کوچک‌تر از ۱۲۰۰ نتایج آزمایشگاهی و عددی بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند.

نتایج لافای و همکاران [۹] با تحلیل سه‌بعدی توزیع جریان در اطراف مجتمع سوخت ۷ میله‌ای با سیم‌پیچ نشان دادند که بیشتر جریان متقاطع چرخشی در فاصله خالی دیواره کانال شش‌ضلعی مشاهده می‌شود. گاجاپاسی و همکاران [۱۰] با استفاده از کد CFD، جریان سیال و دمای در مجتمع سوخت ۷ میله‌ای با مغشوش‌کننده سیم‌پیچی را بررسی کردند. در این آزمایش سدیم مذاب به‌عنوان خنک‌کننده استفاده شد. نتایج نشان داد که ضریب اصطکاک محاسبه‌شده در هر دو مورد با سیم‌پیچ و بدون آن با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد. افت فشار ناشی از سیم‌پیچی برای جریان آشفتده بیشتر از جریان آرام است. علاوه بر این، سرعت و توزیع دما به‌دست‌آمده، این نوع مغشوش‌کننده، جریان چرخشی را در اطراف میله‌های سوخت ایجاد می‌کند که اختلاط سیال را افزایش می‌دهد و پروفیل دما را تخت می‌کند. بررسی گسترده‌ای در زمینه ترموهیدرولیک جریان یکنواخت و گذرا در قلب راکتور با مغشوش‌کننده سیم‌پیچی توسط دیلر و همکاران [۱۱] انجام‌شده است. در این تحقیق از دو نوع سوخت (سوخت‌های اکسیدی و هیبریدی) استفاده‌شده و توان راکتور به‌صورت تابعی از قطر میله سوخت و نسبت فاصله به قطر محاسبه‌شده است. نتایج نشان داد که تفاوت در نوع سوخت تأثیری بر عملکرد ترموهیدرولیک ندارد. بالاترین توان راکتور برای نسبت فاصله سیم‌پیچ به قطر برابر با ۱،۴۲ به دست

^۱ Wire-wrap spacer

سرعت جریان در نزدیکی تماس سیم‌پیچ و میله سوخت بسیار کم است و باعث افزایش دما در آن نقاط می‌شود. لیو و همکاران [۱۸] یک الگوی جدید با قطر سیم‌پیچشی کوچک‌تر برای میله‌های مجتمع شش‌ضلعی با ۱۹ میله پیشنهاد دادند. با کاهش قطر مغشوش کننده، مایع خنک‌کننده بیشتری به سمت کانال‌های فرعی هدایت می‌شود. این منجر به توزیع یکنواخت‌تر دماهای در کانال‌های مختلف می‌شود.

بوواتی و همکاران [۱۹] به تحلیل انواع روش‌های عددی نگهدارنده سیم‌پیچشی برای راکتورهای سریع خنک شونده با فلز مایع پرداختند. آن‌ها مدل‌سازی را با استفاده از رهیافت آشفتگی با استفاده از مدل‌های توربولانس مختلف برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک با وجود انسداد در کانال استفاده کردند.

اکثر مطالعات عددی انجام‌شده در زمینه بررسی مغشوش‌کننده‌های سیم‌پیچشی با سیال فلز سدیم مذاب به‌عنوان سیال خنک‌کننده بوده است. تحقیق حاضر بررسی اثرات مغشوش‌کننده سیم‌پیچشی بر جریان سیال و انتقال حرارت آن در یک مجتمع سوخت با خنک‌کننده آبی است. همچنین تأثیرات دمایی و افت فشار برای چهار گام ارتفاعی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش پس از مدل‌سازی سه‌بعدی، به بررسی جامع‌تر اثرات شرایط مرزی بر عملکرد ترموهیدرولیکی مغشوش‌کننده‌ها پرداخته است. شبیه‌سازی و تحلیل ترموهیدرولیکی این نوع مغشوش‌کننده‌ها با خنک‌کننده آبی، می‌تواند به طراحی مجتمع سوخت نوآورانه کمک کند.

۲- مدل فیزیکی و معادلات حاکم

مغشوش‌کننده سیم‌پیچشی یک نوآوری در مغشوش‌کننده‌های جریان سیال برای استفاده در مجتمع‌های سوخت است. در شکل (۱) نحوه قرارگیری این مغشوش‌کننده‌ها بر روی میله‌های گرم شونده مشخص شده است. با توجه به این شکل هر مغشوش‌کننده‌های سیم‌پیچشی دارای دو مشخصه گام محوری (H) و قطر سیم است. گام محوری به فاصله دو سر سیم در یک دور گردش کامل آن به دور میله گرم شونده گفته می‌شود.

می‌آید که ۲۵ درصد بیشتر از راکتور با نگهدارنده^۱ پنجره‌ای است. بر اساس این مطالعه مهم‌ترین مشخصات نگهدارنده سیم‌پیچشی کاهش افت فشار و افزایش شار حرارتی بحرانی است.

ناتسان و همکاران [۱۲] با استفاده از یک شبیه‌سازی سه‌بعدی CFD جریان آشفته به بررسی افت فشار و انتقال حرارت یک مجتمع سوخت ۱۹ تایی در یک راکتور سریع با خنک‌کننده نمک مذاب پرداختند. در این شبیه‌سازی از سه نوع مدل آشفتگی ($k-\omega$, $k-\epsilon$ ، تنش‌های رینولدز) استفاده شد. مقایسه نتایج این سه مدل با رابطه تجربی نشان داد که ضریب اصطکاک محاسبه‌شده با این مدل‌ها به یکدیگر نزدیک بوده و با رابطه تجربی ناوندسترن [۶] حدود ۶ درصد تفاوت دارد. علاوه بر این، اعداد ناسلت به‌دست‌آمده از این سه مدل با یکدیگر هم‌خوانی دارند و با رابطه تجربی فنچ حدود ۱ درصد تفاوت دارند.

رولفو و همکاران [۱۳] شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان سیال را برای مجتمع سوخت ۷، ۱۹، ۶۱ و ۲۷۱ تایی را با مغشوش‌کننده سیم‌پیچشی شده در یک راکتور سریع با خنک‌کننده نمک مذاب انجام دادند. با توجه به نتایج، یک جریان ثانویه چرخشی قوی در کانال‌های فرعی ایجاد می‌شود که در آن ترکیب اثرات سیم‌پیچ و مرزهای بیرونی باعث انحراف جریان می‌شود.

پاسیو و همکاران [۱۴] به‌صورت تجربی یک مجتمع با خنک‌کننده سرب-بیس‌موت را بررسی کردند. نتایج ارائه‌شده در این کار شامل مطالعه توزیع دما با شرایط عملیاتی مشابه راکتور و تجزیه و تحلیل به‌صورت بی‌بعد برای مجموعه‌ای از داده‌ها بود. آن‌ها تفاوت‌های دمایی زیادی در هر سطح اندازه‌گیری مشاهده کردند که ناشی از تأثیر سیم‌پیچشی بر جریان است. همچنین مطابقت بسیار خوبی بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی همبستگی‌های تجربی با روابط ارائه‌شده توسط چنگ و تودریاس [۱۵] و کازیمی و کارلی [۱۶] برای ضریب اصطکاک و عدد ناسلت مشاهده شده است.

وانگ و همکاران [۱۷] ویژگی‌های حرارتی-هیدرولیک مجتمع سوخت ۷ میله‌ای را برای راکتور سریع با خنک‌کننده با سدیم مذاب توسط دینامیک سیالات محاسباتی تجاری و نرم‌افزار فلونت مورد بررسی عددی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند

^۱ Spacer

در نظر گرفته شده است. ۱۰۵ مغشوش کننده عدد رینولدز همچنین روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل با استفاده از نرم‌افزار فلونتت برای حل عددی معادلات به کاررفته است. معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان آشفته و انتقال حرارت با فرض جریان ثابت و تراکم ناپذیر به صورت زیر است. [۲۰]

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

معادله تکانه حرکت:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + (\mu + \mu_t) \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

بقای انرژی:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

معادله جابه‌جایی:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (4)$$

نرخ اتلاف آشفتنگی:

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

ویسکوزیته آشفتنگی:

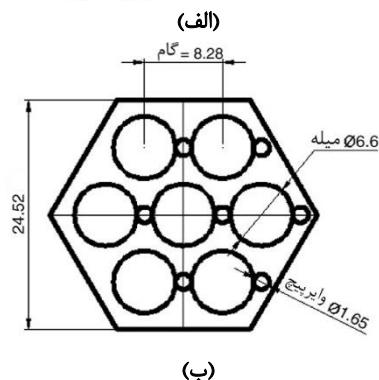
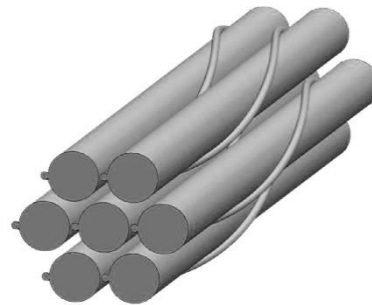
$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

جدول (۱) مقادیر ثابت به کاررفته در معادلات بالا را نشان می‌دهد. که مطابق استاندارد فلونتت می‌باشد.

جدول ۱- مقادیر ثابت به کاررفته در معادلات

آشفتنگی

$\sigma_{\omega,2}$	$\sigma_{k,2}$	$\sigma_{\omega,1}$	$\sigma_{k,1}$
۱,۱۶۸	۱,۰	۲,۰	۱,۱۷۶



شکل ۱- الف) نمای سه بعدی از هندسه مجتمع سوخت با مغشوش کننده سیم پیچشی ب) نمای از سطح مقطع

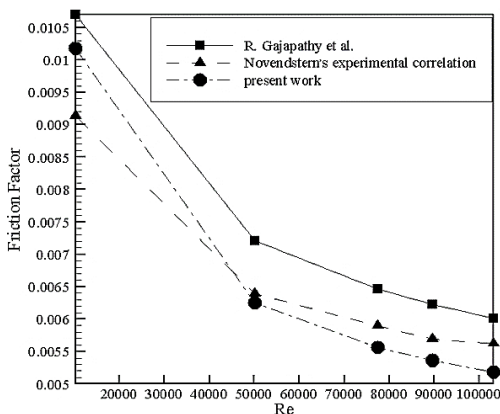
هندسه مدل شبیه‌سازی شده شامل یک کانال شش‌وجهی دارای هفت میله گرم شونده با مغشوش کننده سیم پیچشی است که بر اساس استاندارد راکتور هسته‌ای طراحی شده است. شرایط مرزی در این شبیه‌سازی شامل شرط مرزی سرعت ورودی (از ۰,۸۵۲ m/s تا ۸,۵۲۲ m/s) است. همچنین دیواره‌های کانال عایق فرض شده و شار حرارتی یکنواخت بر روی سطح میله‌های گرم شونده (از ۲۰۰ KW تا ۱۸۰۰ KW) در نظر گرفته شده و روی سطح میله‌ها اعمال شده است. به علت نیاز به حافظه کامپیوتری بالا در انجام محاسبات و محدودیت در این زمینه طول کانال به اندازه یک گام مغشوش کننده سیم پیچشی در نظر گرفته شده است.

۲-۱- معادلات حاکم

k-ε برای مدل‌سازی جریان مغشوش از مدل آشفتنگی استفاده شده است. این مدل عددی دارای همگرایی سریع‌تری نسبت به سایر مدل‌ها است [۳]. همچنین تحقیقات انجام شده در گذشته نشان می‌دهد که این مدل آشفتنگی از نتایج قابل قبولی برخوردار است [۱۲]. برای بررسی اثر گام هندسی

مدل مشابه با تحقیق حاضر در شکل (۳) مقایسه شده است. معادله (۷) نحوه محاسبه ضریب اصطکاک را نشان می‌دهد. خطا بدست آمده کمتر از ۱۰ درصد با نتایج تجربی است.

$$f = 2 \left(\frac{\Delta P}{\rho V^2} \right) \left(\frac{d_h}{L} \right) \quad (7)$$



شکل ۳- مقایسه ضریب اصطکاک بین نتایج کار حاضر و کارهای انجام شده [۶, ۱۰]

همان‌طور که از شکل (۳) مشخص است، نتایج مطالعات فعلی بسیار نزدیک به نتایج دو مرجع دیگر است. همچنین روند تغییر ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز کاملاً مشابه نتایج تجربی و عددی است. کمتر بودن مقدار ضریب اصطکاک پژوهش حاضر می‌تواند به دلیل تفاوت دیواره مجتمع واقعی به نسبت شبیه‌سازی باشد که بر ضریب اصطکاک تاثیر می‌گذارد.

۴- نتایج

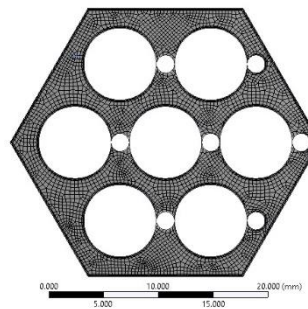
در این بخش به بررسی اثر مغشوش‌کننده‌های سیم‌پیچی بر عملکرد جریان سیال و انتقال حرارت آن در یک مجتمع و مقایسه نتایج آن با نتایج بدون سیم‌پیچ پرداخته شده است

۴-۱- عملکرد جریان سیال در قلب راکتور برای

مغشوش‌کننده سیم‌پیچی با گام ۲۰۰ میلی‌متر شکل (۶) کانتورهای سرعت را در مقاطع با فواصل مختلف از ورودی کانال شش‌وجهی به ترتیب برای دو حالت مجتمع همراه با سیم‌پیچ به گام ۲۰۰ میلی‌متر و بدون آن در رینولدز

۲-۲- بررسی شبکه و استقلال آن

برای شبکه بندی مجتمع سوخت از نرم افزار انسیس و ابزارهای مختلف از جمله شبکه ریزتر در نزدیکی مرز بین سیال و جامد برای بالا بردن دقت شبکه استفاده شده است. نمایی از شبکه طراحی شده برای این مجتمع در شکل (۲) آمده است.



شکل ۲- ساختار شبکه‌بندی برای مجتمع سوخت

برای بررسی تعداد شبکه مناسب برای تحلیل سیالاتی برای چهار شبکه بندی مختلف این بررسی انجام گرفته است. نتایج بدست آمده برای این چهار شبکه بندی برای حالت رینولدز ۱۰۳۰۸ با حضور مغشوش‌کننده در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲- بررسی شبکه برای ضریب اصطکاک و افت فشار

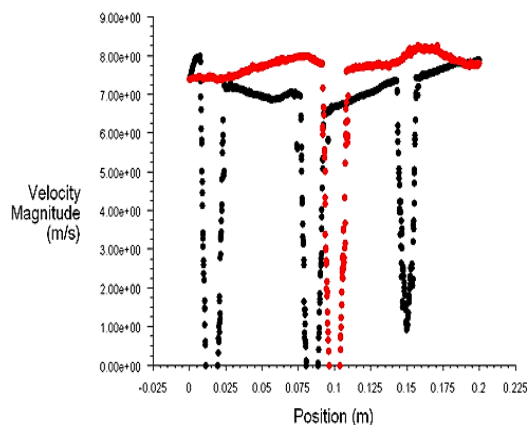
شماره	تعداد شبکه (برحسب هزار)	ضریب اصطکاک	افت فشار
۱	۲۲۱,۲۱۵	۰,۰۱۰۱۰	۵۳۰
۲	۸۵۴,۳۱۰	۰,۰۱۱۳۹	۵۹۶
۳	۹۶۵,۲۱۸	۰,۰۱۱۲۱	۵۸۹
۴	۱۱۵۲,۱۲۰	۰,۰۱۱۴۳	۶۰۲

اطلاعات بدست آمده از جدول (۲) نشان می‌دهد برای شبکه‌ها بیشتر از ۸۰۰ هزار تا نتایج مربوط به افت فشار دارای اختلاف کمتر از ۳ درصد است.

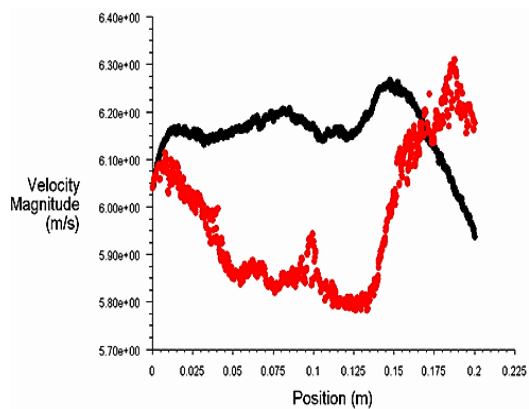
۳- اعتبارسنجی مدل

برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام شده، مقادیر تغییرات ضریب اصطکاک مدل حاضر با نتایج عددی ارائه شده توسط گاجاپاسی و همکاران [۱۰] و نتایج تجربی ناوندسترن [۶] برای

به نمودار مشخص است که میزان افت فشار در حالت با سیم‌پیچ بیشتر از بدون سیم‌پیچی است و با افزایش رینولدز هر دو منحنی روند صعودی مشابهی را نشان می‌دهند.



شکل ۴- توزیع سرعت در کانال میله‌های گرم شونده با سیم‌پیچ (قرمز میله مجاور دیوار و مشکی مرکز) ($Re=89618$)



شکل ۵- توزیع سرعت در کانال میله‌های گرم شونده بدون سیم‌پیچ (قرمز میله مجاور دیوار و مشکی مرکز) ($Re=89618$)

۸۹۶۱۸ نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶) سرعت سیال در نواحی از کانال که مغشوش‌کننده‌های سیم‌پیچی به دیواره نزدیک است بیشتر از نواحی دیگر است؛ این نواحی با رنگ قرمز در شکل مشخص شده است. موقعیت سرعت بیشینه در طول کانال با چرخش سیم‌پیچ تغییر می‌کند که نشان می‌دهد چرخش سیال در طول کانال وجود دارد. این در حالی است که موقعیت بیشینه سرعت سیال در طول کانال بدون سیم‌پیچی یکسان است. به عبارت دیگر سیال بدون چرخش و اختلاط در طول کانال جریان دارد و سرعت بیشینه در این حالت کمتر از سرعت سیال در کانال با مغشوش‌کننده است.

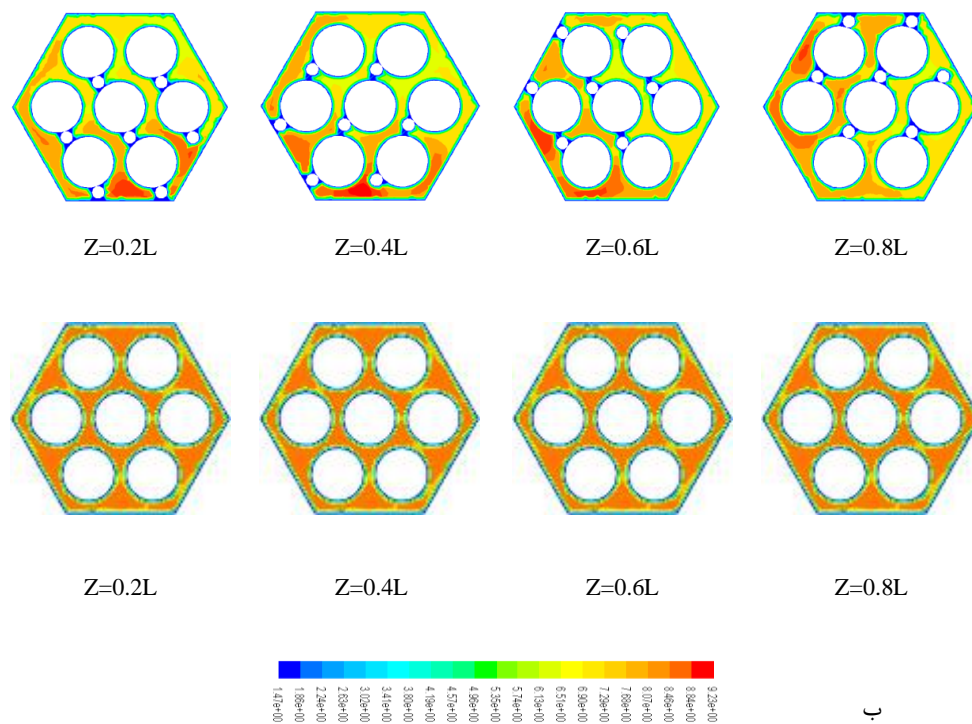
مقایسه مقادیر افت فشار و ضریب اصطکاک بین دو حالت با سیم‌پیچ و بدون آن در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به مقادیر داده شده افت فشار در کانال با مغشوش‌کننده‌های سیم‌پیچی در رینولدز 10^5 دو برابر کانال بدون سیم‌پیچ است. همچنین با افزایش سرعت سیال مقدار افت فشار نیز افزایش می‌یابد. نسبت افت فشار مجتمع با سیم‌پیچی به بدون آن نیز با افزایش عدد رینولدز روند صعودی دارد.

شکل (۴) مقدار سرعت را در طول کانال شش‌وجهی با سیم‌پیچ به ترتیب برای دو موقعیت مجاور میله مرکزی کانال (خط سیاه) و مجاور دیواره کانال (خط قرمز) نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴) تغییرات سرعت در طول کانال برای هر دو موقعیت تقریباً مشابه است ولی مقدار سرعت در مجاور دیواره کانال بیشتر از مرکز آن است که این به علت حرکت چرخشی سیال در اثر وجود مغشوش‌کننده است. نقاطی که مقدار سرعت صفر می‌شود محل عبور سیم‌پیچی است.

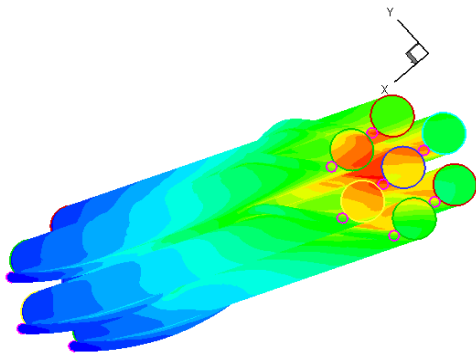
مقدار سرعت را در طول کانال شش‌وجهی بدون مغشوش‌کننده سیم‌پیچی به ترتیب برای دو موقعیت مجاور میله مرکزی کانال (خط سیاه) و مجاور دیواره کانال (خط قرمز) در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵) تغییرات سرعت در طول کانال برای هر دو موقعیت غیریکنواخت است و مقدار سرعت در مجاور دیواره کانال کمتر از مرکز آن است. در شکل (۷) میزان افت فشار در رینولدزهای مختلف برای هر دو حالت با سیم‌پیچ و بدون آن نشان داده شده است. با توجه

جدول ۳- مقایسه افت فشار و ضریب اصطکاک در کانال با و بدون مغشوش کننده سیم پیچی

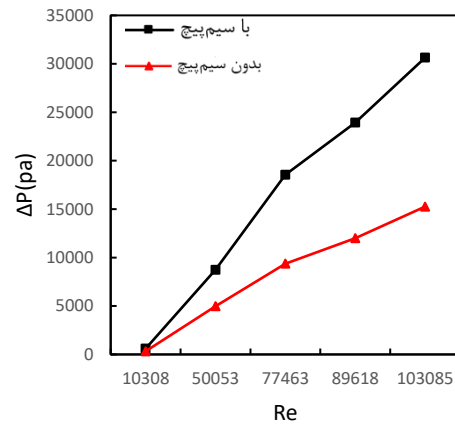
Re	F		$\Delta P(\text{pa})$	
	با سیم پیچ	بدون سیم پیچ	با سیم پیچ	بدون سیم پیچ
۱۰۳۰۸	۰/۰۱۱۴۳	۰/۰۱۰۱۸	۶۰۲	۳۲۹
۵۰۰۵۳	۰/۰۰۶۷۸	۰/۰۰۶۲۳	۸۷۳۷	۴۹۷۲
۷۷۴۶۳	۰/۰۰۵۷۷	۰/۰۰۵۵۶	۱۸۵۵۰	۹۳۷۱
۸۹۶۱۸	۰/۰۰۵۵۲	۰/۰۰۵۳۶	۲۳۹۲۶	۱۲۰۰۱
۱۰۳۰۸۵	۰/۰۰۵۲۹	۰/۰۰۵۱۸	۳۰۶۳۳	۱۵۲۶۰



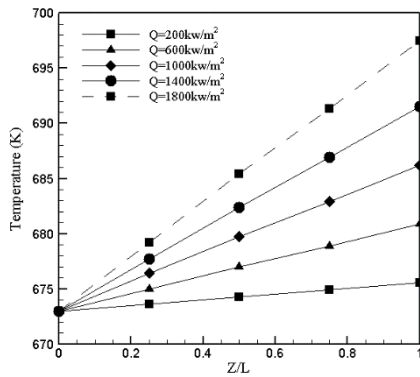
شکل ۶- توزیع سرعت روی میله‌های گرم شونده الف) با سیم پیچ ب) بدون سیم پیچ ($Re=89618$)



شکل ۸- کانتور دما برای همه میله‌های داخل مجتمع



شکل ۷ - میزان افت فشار برای مجتمع سوخت در دو حالت با سیم‌پیچ و بدون آن در رینولدزهای مختلف



شکل ۹- توزیع دمای سیال در طول مسیر برحسب شارهای مختلف خروجی از میله‌های گرم شونده

تغییرات متوسط ضریب انتقال حرارت سطح و عدد ناسلت متوسط روی میله سوخت میانی با سیم‌پیچ در کانال شش‌وجهی برای رینولدزهای مختلف در شکل (۱۱) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز متوسط ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات متوسط ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت متوسط روی میله سوخت میانی با سیم‌پیچ در کانال شش‌وجهی برای شار حرارتی مختلف در شکل‌های (۱۱) نشان داده شده است. افزایش شار حرارتی منجر به افزایش میزان متوسط ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت متوسط می‌شود. همچنین نسبت اعداد ناسلت مجتمع با سیم‌پیچ به بدون آن

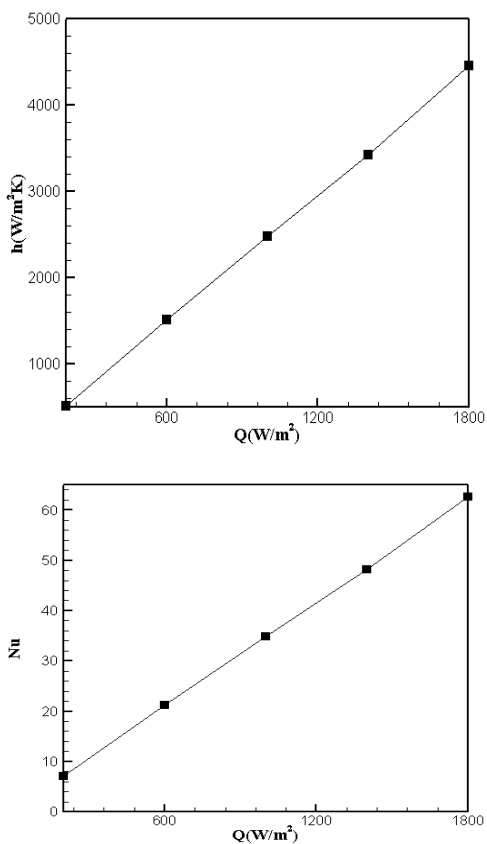
۲-۴- عملکرد انتقال حرارت سیال خنک‌کننده در قلب راکتور

برای سیم‌پیچش با گام ۲۰۰ میلی‌متر

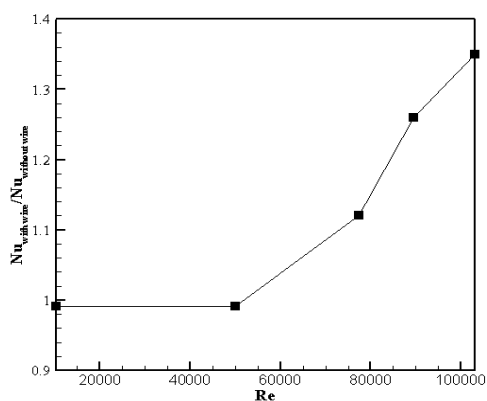
دمای سیال در مرکز کانال با مغشوش‌کننده‌های سیم‌پیچی به علت وجود شار حرارتی میله‌ی سوخت بیشینه است. همچنین با حرکت چرخشی سیال در طول کانال دمای سیال مجاور دیواره‌های کانال که شار حرارتی کمتری دریافت می‌کنند، افزایش می‌یابد. این در حالی است که در حالت بدون مغشوش‌کننده‌های سیم‌پیچی دمای سیال در مرکز کانال بیشینه است ولی دمای سیال مجاور دیواره‌های کانال نزدیک به دمای سیال ورودی به کانال است.

در محل اتصال سیم‌پیچ به میله‌های گرم شونده نقاطی با بیشترین دما مشاهده می‌شود که نقاط داغ نامیده می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده 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 (۹) تغییرات دمای سیال در طول کانال را به ازای مقدار مختلف شار حرارتی میله‌های گرم شونده با مغشوش‌کننده سیم‌پیچی نشان می‌دهد.

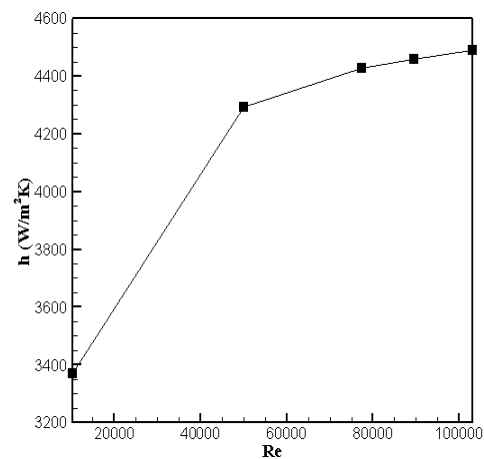
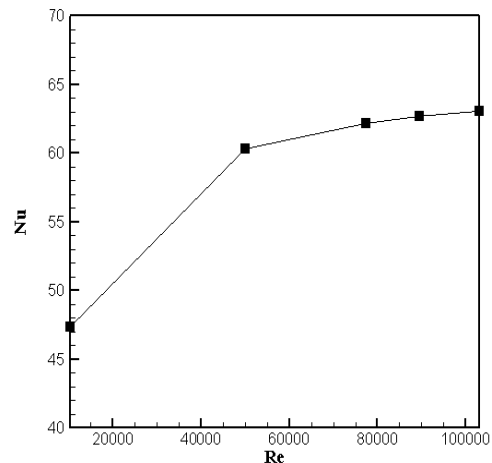


شکل ۱۱- توزیع ضریب انتقال حرارت سطح و عدد ناسلت متوسط برای شارهای حرارتی مختلف

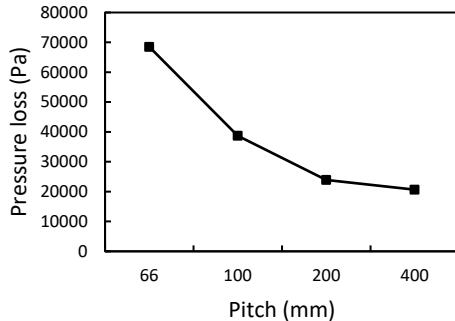


شکل ۱۲- نسبت عدد ناسلت میله‌های با سیم‌پیچ به عدد ناسلت بدون سیم‌پیچ در اعداد رینولدز مختلف

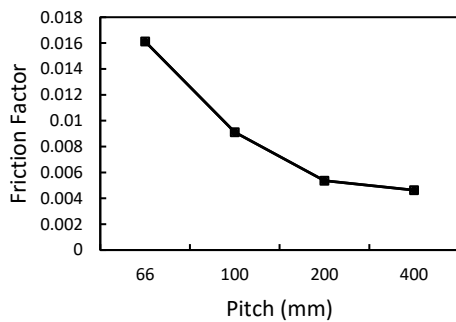
در رینولدزهای مختلف در شکل (۱۲) آمده است. در شکل (۱۳) تغییرات ضریب انتقال حرارت محلی روی سطح میله سوخت میانی بدون سیم‌پیچ را برای شارهای حرارتی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این شکل روند تغییرات ضریب انتقال حرارت محلی برای شار حرارتی مختلف مشابه است.



شکل ۱۰- توزیع ضریب انتقال حرارت سطح و عدد ناسلت متوسط در رینولدزهای مختلف



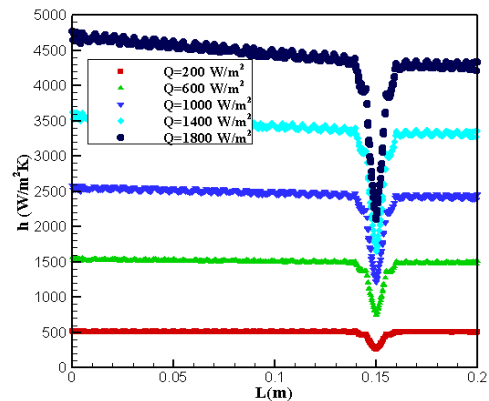
شکل ۱۴- افت فشار برای گام های مختلف سیم پیچ



شکل ۱۵- ضریب اصطکاک برای گام های مختلف سیم پیچ

۴-۴- اثر تغییر گام بر انتقال حرارت

شکل (۱۷) کانتورهای دما را برحسب درجه کلوین در فواصل مختلف کانال شش وجهی به ترتیب برای چهار گام هندسی مغشوش کننده سیم پیچی ۶۶، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی متر و برای عدد رینولدز ۱۰۰۰۰۰ نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که با افزایش گام هندسی مغشوش کننده سیم پیچی اختلاف دمای سیال خنک کننده افزایش می یابد. به عبارت دیگر با کاهش گام هندسی مغشوش کننده اختلاط سیال خنک کننده در طول کانال بیشتر و در نتیجه دمای آن یکنواخت تر و اختلاف دمای بین سیال و میله های گرم شونده کمتر می شود.



شکل ۱۳- توزیع ضریب انتقال حرارت محلی روی سطح میله میانی بدون سیم پیچ در شارهای حرارتی مختلف

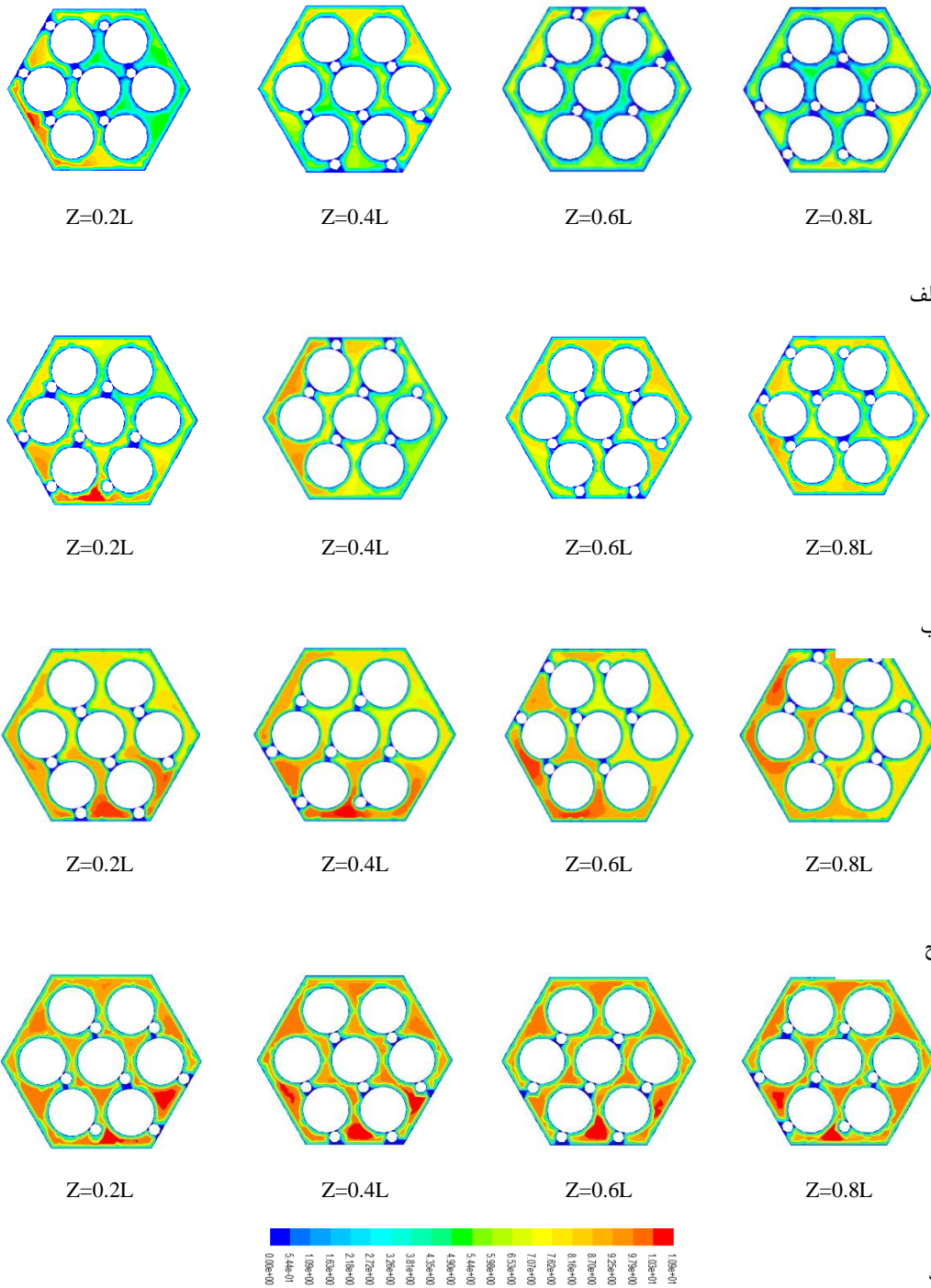
۴-۳- اثر تغییر گام بر عملکرد جریان سیال

شکل (۱۶) کانتورهای سرعت را در ارتفاع های مختلف از ابتدای جریان به فاصله یک گام از مغشوش کننده کانال شش وجهی انجام شده است. در تحقیقات گذشته [۸] و [۹] از گام های ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی متر برای شبیه سازی استفاده شده است. پژوهش حاضر، برای چهار گام هندسی مغشوش کننده سیم پیچی ۶۶، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ میلی متر و در عدد رینولدز ۱۰۰۰۰۰ انجام شده است. با توجه به این اشکال موقعیت حداکثر سرعت در طول کانال با چرخش سیم پیچ تغییر می کند. علاوه بر این، این اعداد نشان می دهد که مقدار حداکثر سرعت با کاهش گام سیم پیچ افزایش می یابد. به بیان دیگر کاهش گام، باعث اختلاط بیشتر مایع خنک کننده می شود. مقادیر افت فشار و ضریب اصطکاک برای گام های مختلف سیم پیچ در جدول (۴) نشان داده شده است. در شکل (۱۴) و (۱۵) روند افت فشار و ضریب اصطکاک برای گام های مختلف آمده است. این نتایج نشان می دهد با افزایش گام مقدار افت فشار و ضریب اصطکاک کاهش می یابد.

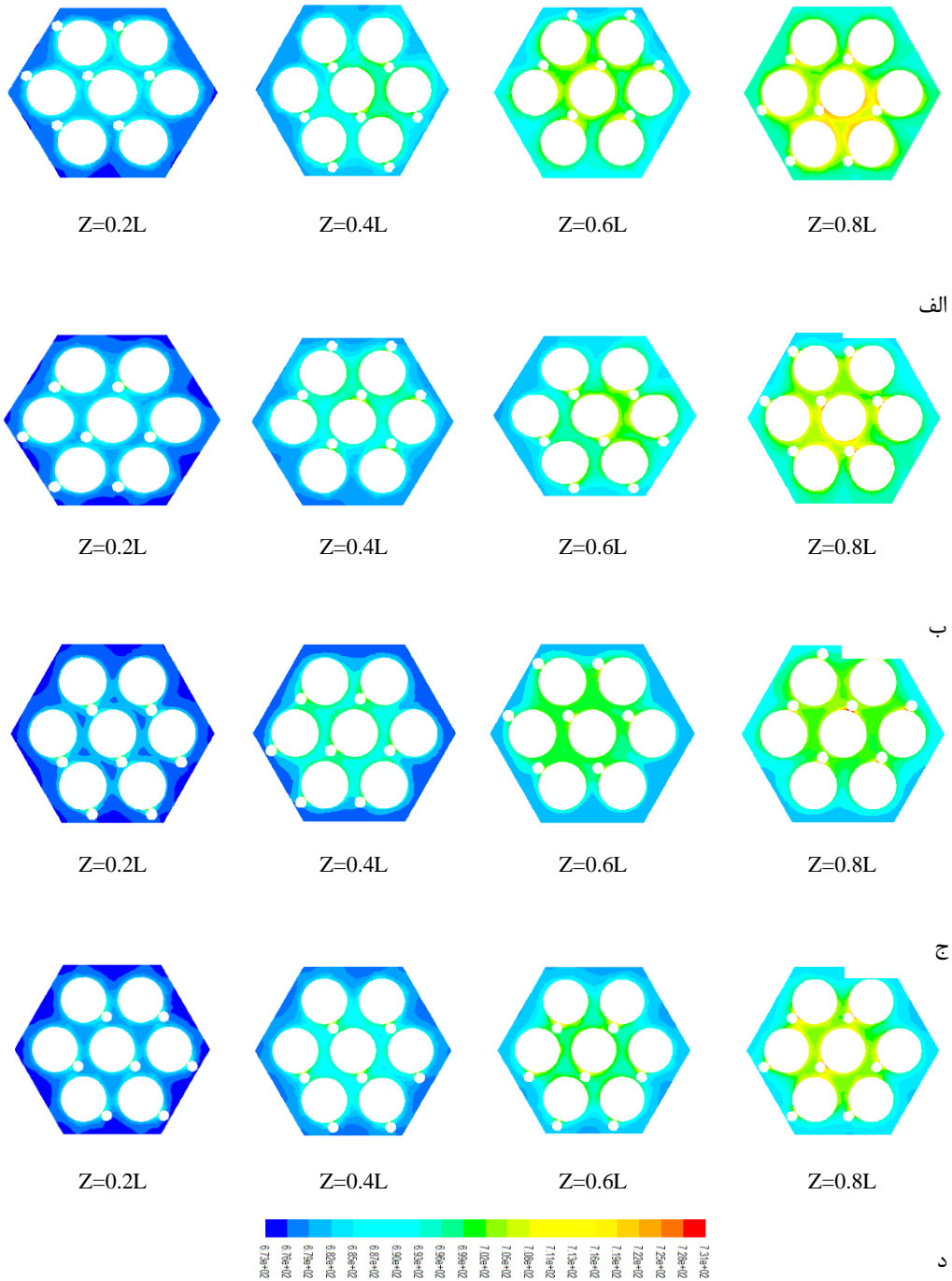
جدول ۴- مقایسه افت فشار و ضریب اصطکاک سیال در

گام های مختلف مغشوش کننده سیم پیچی

گام سیم پیچ	f	ΔP (pa)
۴۰۰	۰/۰۰۴۶۳	۲۰۶۵۷
۲۰۰	۰/۰۰۵۳۶	۲۳۹۲۶
۱۰۰	۰/۰۰۹۱۱	۳۸۷۰۸
۶۶	۰/۰۱۶۱۲	۶۸۵۰۲



شکل ۱۶- کانتور سرعت (m/s) مجتمع با گام‌های الف) ۶۶ (ب) ۱۰۰ (ج) ۲۰۰ (د) ۴۰۰ میلی‌متر برای رینولدز ۱۰۰۰۰۰



شکل ۱۷- کانتور دما (k) در مجتمع با گام هندسی الف) ۶۶ ب) ۱۰۰ ج) ۲۰۰ د) ۴۰۰ میلی‌متر برای رینولدز 100000

۵- نتیجه‌گیری

- [8] Shimizu, T., H. Ninokata, and H. Shishido, (1990) Distributed parameter analysis for the prediction of the fine structure of flow and temperature fields in wire-wrapped fuel pin bundle geometries. Nucl Eng Des, 120(2-3): p. 369-383.
- [9] Lafay, J., B. Menant, and J. Barroil, (1975) Local pressure measurements and peripheral flow visualization in a water 19-rod bundle compared with FLICA II B calculations: influence of helical wire-wrap space system., CEA Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble.
- [10] Gajapathy, R., et al., (2007), CFD investigation of helical wire-wrapped 7-pin fuel bundle and the challenges in modeling full scale 217 pin bundle. Nucl Eng Des. 237(24): p. 2332-2342.
- [11] Diller, P., N. Todreas, and P. Hejzlar, (2009) Thermal-hydraulic analysis for wire-wrapped PWR cores. Nucl Eng Des. 239(8): p. 1461-1470.
- [12] Natesan, K., et al. (2010), Turbulent flow simulation in a wire-wrap rod bundle of an LMFBR. Nucl Eng Des, 2010. 240(5): p. 1063-1072.
- [13] Rolfo, S., et al., (2012) Thermal-hydraulic study of a wire spacer fuel assembly. Nucl Eng Des. 243: p. 251-262.
- [14] Pacio, J., et al., (2016) Experimental study of heavy-liquid metal (LBE) flow and heat transfer along a hexagonal 19-rod bundle with wire spacers. Nucl Eng Des. 301: p. 111-127.
- [15] Cheng, S.-K. and N.E. (1986) Todreas, Hydrodynamic models and correlations for bare and wire-wrapped hexagonal rod bundles—bundle friction factors, subchannel friction factors and mixing parameters. Nucl Eng Des. 92(2): p. 227-251.
- [16] Kazimi, M. and M. Carelli, (1976) Heat transfer correlation for analysis of CRBRP assemblies. Westinghouse Report.
- [17] Wang, D., C. Peng, and Y. Guo, (2020) Thermal-hydraulic analysis of a 7-pin sodium-cooled fast reactor wire-wrapped fuel bundle. Int J Heat Mass Transf. 160: p. 120178.
- [18] Lyu, K., et al., (2021) Numerical investigation of thermal hydraulic behaviors in wire-wrapped bundle with smaller wire diameter of peripheral rods. Ann Nucl Energy. 163: p. 108526.
- [19] Bovati, O., et al., (2022) Pressure drop and flow characteristics in partially blocked wire wrapped rod bundles. Ann Nucl Energy, 165: p. 108671.
- [20] Sreenivasulu, T. and B. Prasad, (2009) Flow and heat transfer characteristics in an annulus wrapped with a helical wire. Int J Therm Sci, 48(7): p. 1377-1391.

در این پژوهش شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی جریان سیال در مجتمع سوخت شش‌ضلعی با سیم‌پیچ و بدون آن انجام شده است. برای انجام این شبیه‌سازی از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است و در گام‌ها، رینولدزها و شرایط مرزی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی نشان داد که حضور مغشوش‌کننده سیم‌پیچی باعث چرخش بیشتر مایع خنک‌کننده در طول کانال شده که منجر به اختلاط بیشتر و توزیع یکنواخت‌تر دما می‌شود. همچنین استفاده سیم‌پیچ باعث ایجاد نقاط داغ در مناطق تماس می‌شود. همچنین حضور سیم‌پیچ باعث افزایش افت فشار تا در رینولدز ۱۰۰۰۰۰ دو برابر می‌شود. این افت فشار با کاهش گام سیم‌پیچ افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد با کاهش گام توزیع یکنواخت‌تر دما در طول کانال اتفاق می‌افتد. این تحلیل با توجه به بررسی میزان افت فشار و تاثیرات حرارتی با انتخاب گام‌های مختلف به طراحی بهینه برای چنین مغشوش‌کننده ای کمک می‌کند.

۶- مراجع

- [1] Todreas, N.E. and M.S. Kazimi, (2021) Nuclear systems volume I: Thermal hydraulic fundamentals.: CRC press.
- [۲] م. طالبی، ع. حاتمی، (۱۴۰۰) تحلیل نیروهای ارتعاشی القایی غیردائم وارد بر یک مجتمع سوخت هسته ای در جریان محوری مغشوش. نشریه مهندسی و مدیریت انرژی.
- [۳] م. عسگری، م. طالبی، م. عبدی، (۱۳۹۲) شبیه‌سازی عددی افت فشار و انتقال حرارت اجباری حول میله های یک مجتمع سوخت هسته ای به همراه شبکه های نگه دارنده. مجله علوم و فنون هسته ای.
- [4] Nijssing, R. and W. Eifler, (1974) A computation method for the steady state thermohydraulic analysis of fuel rod bundles with single phase cooling. Nucl Eng Des. 30(2): p. 145-185.
- [5] Arwika, K. and H. Fenech, (1979) Heat transfer, momentum losses and flow mixing in a 61-tube bundle with wire-wrap. Nucl Eng Des. 55(3): p. 403-417.
- [6] Novendstern, E. (1972) Turbulent flow pressure drop model for fuel rod assemblies utilizing a helical wire-wrap spacer system. Nucl Eng Des. 22(1): p. 28-42.
- [7] Fenech, H., (1985) Local heat transfer and hot-spot factors in wire-wrap tube bundle. Nucl Eng Des, 88(3): p. 357-365.