

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۲

تحلیل نیروهای ارتعاشی القایی غیردائم وارد بر یک مجتمع سوخت هسته‌ای در جریان محوری مغشوش

منصور طالبی^{۱*}، علی حاتمی^۲

^۱ استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، تهران، ایران

mstalebi@aeoi.org.ir

^۲ کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران

hatamientc@yahoo.com

چکیده: در قلب (مرکز راکتور) یک نیروگاه‌های هسته‌ای، مجموعه‌ای از میله‌های سوخت که توسط شبکه‌های نگهدارنده در کنار هم نگه داشته شده‌اند، یک مجتمع سوخت را تشکیل می‌دهند. عبور جریان خنک‌کننده از اطراف میله‌ها و ایجاد آشفتگی جریان، به خصوص در اطراف شبکه‌های نگهدارنده، نیروهای عرضی، ارتعاشی و غیردائم به میله‌ها اعمال می‌کند. تنش دوره‌ای ناشی از این ارتعاشات، علاوه بر خوردگی سایشی غلاف میله‌ها، باعث خستگی و کاهش استحکام مکانیکی آن‌ها خواهد شد. در این پژوهش، اندازه، دامنه و شدت نوسانات این نیروها به دست آمده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برای بررسی اثر پره‌های مغشوش‌کننده موجود روی شبکه‌های نگهدارنده، شبیه‌سازی‌ها برای دو نوع شبکه نگهدارنده با پره‌های مغشوش‌کننده و بدون پره‌های مغشوش‌کننده انجام شده است. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج تجربی، تطابق خوبی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که وجود پره‌های مغشوش‌کننده باعث افزایش حدود ۱۷٪ در افت فشار می‌شود. نیروهای وارد شده بر شبکه نگهدارنده که در پایین دست جریان قرار دارد، ۱۰٪ کمتر از نیروهای وارد شده به شبکه نگهدارنده بالادستی است. آنالیز نوسانات نیروهای وارد شده به مجتمع سوخت نشان می‌دهد که دامنه ارتعاشات در فرکانس‌های کمتر از ۳۰۰ هرتز، نسبتاً بالاست.

واژه‌های کلیدی: ارتعاشات القایی جریان، مجتمع سوخت هسته‌ای، شبکه نگهدارنده، پره‌های مغشوش‌کننده.

۱. مقدمه

هم از نظر اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. به طور خلاصه می‌توان گفت که وجود اغتشاشات در جریان سیال خنک‌کننده به‌رغم منافی که دارد خطراتی را نیز به‌همراه خواهد داشت که بایستی با مطالعه آن‌ها، از ایمنی عملکرد راکتورهای مشابه، اطمینان حاصل شود. مطالعات فراوانی بر روی پارامترهای مهم در شدت اغتشاشات و رفتار سیال مغشوش در ایجاد نیروهای ارتعاشی غیردائم بر میله‌های گرم‌شونده، به‌ویژه میله‌های سوخت صورت گرفته است. در ادامه با ارائه موارد مربوط، سابقه مطالعاتی نیز مرور می‌شود.

به دلیل وجود محدودیت‌های آزمایشگاهی، در اغلب آزمایش‌های طرح‌شده، بخشی از کل یک مجتمع مورد بررسی قرار گرفته و با انجام محاسبات تکمیلی، نتایج به‌دست‌آمده برای کل مجتمع لحاظ گردیده است. آزمون‌ها بر روی مدل‌های مقیاس کامل یا مدل‌های ابعادی از دسته میله‌ها با قرص‌های فرضی نیز انجام شده است. هدف از انجام این آزمایش‌ها به دست آوردن مدل‌های ارتعاشی، فرکانس‌های تشدید و میزان خوردگی سایشی ناشی از اغتشاشات جریان سیال خنک‌کننده یا به‌طور کلی بهبود طراحی و اطمینان از صحت عملکرد مجتمع تولیدشده است. انجام دادن برخی از آزمایش‌ها، امری مرسوم در سراسر دنیاست. با این حال این آزمایش‌ها بسیار پرهزینه است و نتایج حاصل در دسترس سایرین قرار نمی‌گیرند. علاوه بر راکتورهای هسته‌ای، رفتار ارتعاشی سیال خنک‌کننده در سایر تجهیزات صنعتی که در آن‌ها برای خنک‌سازی از جریان‌های سیال مغشوش استفاده می‌شود، از اهمیت بالایی برخوردار است.

پیتارد و همکاران [۱] به‌صورت عددی و تجربی، ارتعاشات ناشی از جریان مغشوش توسعه‌یافته درون یک لوله را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که رابطه ریاضی حاکم بر نوسانات فشار وارده بر دیواره داخلی لوله و سرعت جریان، تقریباً از یک معادله درجه دو تبعیت می‌کنند. ژانگ و همکاران [۲] به‌صورت تجربی ارتعاشات القایی ناشی از جریان را بر روی یک منشور مثلثی اندازه‌گیری کردند. آن‌ها میزان تغییرات دامنه ارتعاشات را اندازه‌گیری کرده و نشان داده‌اند که بیشترین دامنه جابه‌جایی‌ها ۳/۱۷ برابر قطر هیدرولیکی منشور بسیار بلند است. نسبت فرکانس‌های پاسخ به فرکانس‌های طبیعی، برابر با ۰/۶ است. آن‌ها از مدل ارتعاشی جریان متقاطع^۴ برای استخراج مدل‌ها استفاده کردند. کورکیشکو و همکاران [۳] نیز در مطالعه تجربی خود، اثر وایرهای پیچشی بر ارتعاشات القایی ناشی از جریان حول یک میله را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پارامترهای

ارتعاشات القایی جریان^۱ در اطراف یک جسم جامد پدیده‌ای غیرخطی، خودمحرک و با چند درجه آزادی است. با هدف بهبود طراحی و اطمینان از عملکرد مطلوب اجزای مختلف یک راکتور هسته‌ای، بخشی از پژوهش‌های انجام‌گرفته در صنعت هسته‌ای، به رفتارشناسی جریان‌های سیال مغشوش و ارتعاشات القایی ناشی از آن اختصاص یافته است. راکتورهای هسته‌ای با اعمال استانداردهای ایمنی بسیار سختگیرانه‌ای طراحی، اجرا و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. با این حال خطر نشست مواد هسته‌ای بسیار خطرناک از غلاف میله‌ها به سیال اطراف آن همواره راکتورهای هسته‌ای را تهدید می‌کند. در راکتورهای هسته‌ای قدرت، از نوع آب تحت فشار^۲، جریان سیال خنک‌کننده در اطراف میله‌ها به دلیل سرعت و فشار بالای سیال و هندسه مسیر، مغشوش است. مغشوش بودن جریان سیال خنک‌کننده، از نظر برداشت انرژی، امری بسیار مطلوب است و حتی طراحی‌ها به‌گونه‌ای انجام می‌گیرد که میزان اغتشاش سیال افزایش یابد؛ اما مشکل زمانی خودنمایی می‌کند که شرایطی مثل بالا بودن فشار و دما و همچنین اغتشاشات جریان به‌طور همزمان، باعث ایجاد ارتعاشات خطرناک در میله‌ها یا کل قلب راکتور می‌شوند. ارتعاشات میله‌ها را می‌توان به یک بارگذاری لرزه‌ای بر روی یک استوانه با مقیاس طولی کم (نسبت قطر استوانه به ارتفاع آن یک به چهار صد است) تشبیه کرد که در فواصل مشخصی دارای تعدادی تکیه‌گاه است. مشکل اصلی در همین تکیه‌گاه‌ها می‌تواند بروز کنند. این مشکل در تجهیزات مشابه دیگر به‌وسیله یاتاقان‌های با کیفیت ساختاری و تنش‌خستگی بالا، قابل رفع خواهد بود. اما در اینجا از تعدادی شبکه‌های نگهدارنده^۳ به‌عنوان تکیه‌گاه استفاده می‌شود. شکل هندسی این شبکه‌های نگهدارنده به‌گونه‌ای است که حالت فنریت دارند و همین خاصیت فنری باعث تماس محکم با بدنه غلاف میله‌ها و نگه داشتن آن‌ها خواهد شد. البته شایان ذکر است که تماس این شبکه‌های نگهدارنده با میله‌ها باعث ایجاد تنش‌های سایشی می‌شوند. همزمان به‌علت تناوبی بودن تنش‌ها، دیواره میله‌ها در نقطه تماس، دچار پدیده مخرب خستگی نیز می‌شوند. با گذشت زمان خستگی باعث کاهش استحکام و همچنین خوردگی سایشی فاز غلاف میله‌ها شده و حتی می‌تواند باعث ترک‌خوردگی غلاف در ناحیه تماس گردد. غلاف به‌عنوان اولین سد در برابر نفوذ مواد خطرناک به جریان سیال خنک‌کننده شناخته می‌شود. هرگونه آسیب یا تخریب غلاف هم از نظر ایمنی و

1. Flow Induced Vibration(FIV)
2. Pressurized Water Reactor (PWR)
3. Spacer grids

مختلفی از این مارپیچها مانند گام مارپیچ، تعداد مارپیچها و سایر عوامل اثرگذار را بررسی کردند.

فرانزینی و همکاران [۴] نیز با استفاده از روشهای آزمایشگاهی میزان ارتعاشات القایی ناشی از جریان را برای میله استوانه‌ای مورب ارائه کرده‌اند. آن‌ها عدد رینولدز را بین بازه ۲۰۰۰ تا ۸۰۰۰ تغییر دادند تا اثر میزان سرعت و دبی را بر روی ارتعاشات القایی مشاهده کنند. آسی و همکاران [۵] نیز با مطالعه آزمایشگاهی میزان اغتشاشات ناشی از جریان عرضی را برای دو استوانه با مقطع دایروی که در فاصله مشخصی از یکدیگر قرار گرفته بودند، اندازه‌گیری کرده‌اند. آن‌ها عدد رینولدز را بین بازه ۳۰۰۰ تا ۱۳۰۰۰ تغییر دادند تا اثر میزان سرعت و دبی را بر روی ارتعاشات القایی مشاهده کنند. آن‌ها اثر پارامترهایی همچون فاصله بین دو استوانه، قطر استوانه‌ها و طول استوانه‌ها و موقعیت آن‌ها را نیز بررسی کردند. سلواکومار و همکاران [۶] نیز به‌صورت تجربی، اثر ارتعاشات القایی جریان را در آرایه‌ای از استوانه‌های هم‌جهت با جریان مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها آزمایش‌های خود را در تونل باد انجام داده و مشاهده کردند استوانه‌های در بالادست جریان، اثر بیشتری از ارتعاشات القایی می‌پذیرند. شورتر و همکاران [۷] با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ^۱ و با تحلیل المان محدود، ارتعاشات القایی ناشی از جریان مغشوش کاملاً توسعه‌یافته را بررسی کردند. کوی و همکاران [۸] با استفاده از روش‌های عددی دوبعدی، ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها را در میله‌هایی با مقطع مربعی و مستطیلی، مورد مطالعه قرار داده و اثر نسبت اضلاع مستطیل را در اندازه ارتعاشات بررسی نمودند. آن‌ها از معادلات ناویر استوکس به‌همراه مدل اغتشاشاتی غیردائم $k-\omega$ استفاده کرده و مدل عددی خود را با استفاده از نتایج تجربی سایر محققان راستی‌آزمایی کرده‌اند. آن‌ها همچنین اثر زاویه برخورد جریان را بر روی ارتعاشات مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها با دقت مناسبی با داده‌های تجربی در زاویه‌های ۲۲ درجه و ۴۵ درجه همخوانی داشت. اثر سرعت جریان نیز یک پارامتر بسیار مهم است که آن‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند. در مطالعه‌ای که توسط کاجا و همکاران [۹] صورت گرفته است، شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی ارتعاشات ناشی از اغتشاشات گردابه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. هندسه به‌کاررفته یک مخروط بود. محاسبات آن‌ها برای جریان با عدد رینولدز ثابت ۵۰۰ انجام شده است. هدف از مطالعه آن‌ها مقایسه نیروهای اعمال‌شده به مخروط با نیروهای اعمال‌شده به میله استوانه‌ای بوده است. در این شبیه‌سازی‌ها دامنه و فرکانس نیروهای

اعمال‌شده به میله‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. از نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق می‌توان در تعیین رفتار نوسانی میله‌هایی که در معرض ارتعاشات القایی ناشی از جریان مغشوش قرار می‌گیرند استفاده کرد. ژیانگ و همکاران [۱۰] با استفاده از مدل‌های شبکه‌ای بولتزمن به‌صورت عددی، ارتعاشات القایی ناشی از اغتشاشات را برای یک دسته میله استوانه‌ای با چینش مربعی و شش‌گوشی مورد بررسی قرار دادند. نیروهای اعمال‌شده بر استوانه‌ها با چینش مربعی شکل و با جریان عمود بر استوانه‌ها محاسبه شد. آن‌ها از روش مرزهای جابه‌جاشونده استفاده کردند و تکنیک شبکه بولتزمن برای سیال تراکم‌پذیر و با مرزهای جابه‌جاشونده را با استفاده از داده‌های تجربی، راستی‌آزمایی کرده‌اند.

در مطالعه عددی دیگر، دوان و همکاران [۱۱] مکانیزم افزایش انتقال حرارت از یک صفحه نوسانگر ناشی از ارتعاشات القایی جریان، با استفاده از یک مدل دوراهه برهم‌کنش سیال و جامد را بررسی کردند. معادلات ناویر استوکس به‌همراه مدل اغتشاشاتی غیردائم $k-\omega$ ، با استفاده از روش حجم محدود و معادلات دینامیک و تعادل بخش جامد با استفاده از مدل المان محدود، به‌صورت عددی حل شده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که ارتعاشات القایی ناشی از جریان ابتدایی و جریان‌های ثانویه به‌شدت در افزایش انتقال حرارت دخیل هستند. مولایی و همکاران [۲۱] انتقال حرارت در یک مبدل لوله‌پسته‌ای با لوله‌های بیضوی را به روش عددی بررسی کردند. استفاده از لوله‌های بیضوی می‌تواند روشی برای کاهش ارتعاشات باشد. جیادونگ و همکاران [۱۳] ارتعاشات القایی سمت پوسته در یک مبدل حرارتی را بررسی کردند. ویشوانادانگ و همکاران [۱۴] ارتعاشات یک دسته لوله الاستیک مارپیچ را بررسی کردند. همچنین جیادونگ و همکاران [۱۵] ارتعاشات ناشی از جریان عرضی در دسته لوله الاستیک یک مبدل حرارتی را بررسی کردند.

در اکثر مطالعات ذکرشده، بررسی ارتعاشات القایی ناشی از جریان عرضی مغشوش انجام شده و مدل‌های به‌کاررفته برای تحلیل صحیح نیروهای وارده و عوامل موثر بر رفتار آن، مورد توجه بوده است. در پژوهش حاضر جریان سیال خنک‌کننده موازی مجتمع‌های سوخت و اطراف شبکه نگهدارنده برای تحلیل نیروهای غیردائم واردشده، بررسی خواهد شد. در این مطالعه از شبیه‌سازی عددی و حل معادلات غیردائم متوسط‌گیری‌شده ناویر-استوکس^۲ استفاده خواهد شد. نیروهای گذرای واردشده به میله سوخت را که از روش عددی محاسبه می‌شوند، می‌توان برای آنالیز ارتعاشی به کمک کدهای

2. Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes (URANS)

1. Large Eddy Simulation (LES)

که در آن Φ تابع اتلاف ویسکوز است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Phi = 2\mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (4)$$

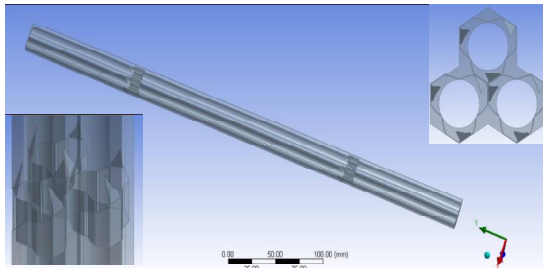
با توجه به اینکه جریان مغشوش می‌باشد برای مدل کردن اغتشاشات جریان از مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شده است که معادلات آن عبارت‌اند از:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (6)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

شبیه‌سازی غیردائم یک مجتمع سوخت کامل، به توان محاسباتی بسیار بالا، زمان زیاد و همچنین حافظه کامپیوتری وسیع نیاز دارد که اگر غیرممکن نباشد، با توجه به سخت‌افزارهای موجود، بسیار بعید است. بنابراین نیاز است تا از یک مدل ساده‌تر برای تعیین نیروهای واردشده بر میله سوخت استفاده کرد. برای ساده‌سازی هندسه مسئله بخشی از قلب راکتور را که شامل یک یا چند شبکه نگهدارنده و یک یا چند میله سوخت است، انتخاب می‌شود. در این تحقیق برای شبیه‌سازی نیروهای واردشده بر میله‌ها، ناحیه‌ای از مجتمع سوخت شامل سه میله و دو نگهدارنده در نظر گرفته شده است (شکل ۱).



شکل (۱): بخشی از مجتمع سوخت شامل سه میله سوخت و دو

شبکه نگهدارنده

بخشی از یک شبکه نگهدارنده که دربرگیرنده سه میله است در شکل (۲) نشان داده شده است. موقعیت استقرار پره‌های مغشوش‌کننده در این شکل دیده می‌شود. هندسه مسئله مورد بررسی، شامل دو عدد شبکه نگهدارنده نیز هست.

برای شبکه‌بندی هندسه مورد بررسی به‌علت پیچیدگی‌هایی که در هندسه شبکه نگهدارنده وجود دارد، از شبکه‌بندی ترکیبی یا شبکه‌بندی چندوجهی استفاده می‌شود. نوع المان‌های به‌کاررفته، المان‌های مثلثی است که در نزدیکی مرزها به المان‌های مربعی موازی مرز تبدیل می‌شوند. نمونه‌ای از شبکه‌بندی چندوجهی ایجادشده در

ارتعاشی مربوط مانند کد تحلیل غیرخطی ارتعاشات گذرا^۱ به کار برد.

۲. بیان مسئله و روش حل

هندسه مورد بررسی در این تحقیق با هندسه مجتمع سوخت یک راکتور ۱۰۰۰ مگاواتی آب تحت فشار مطابقت دارد. آرایش میله‌های سوخت این نوع راکتور به صورت شش‌وجهی است. شبیه‌سازی گذرای یک مجتمع سوخت کامل نیاز به توان محاسباتی بسیار بالا، زمان زیاد و همچنین حافظه کامپیوتری زیاد دارد که اگر غیرممکن نباشد با توجه به سخت‌افزارهای قابل استفاده بسیار بعید است. بنابراین نیاز است تا از یک مدل ساده‌تر برای تعیین نیروهای واردشده بر میله سوخت استفاده کرد. برای اینکه بتوان از یک هندسه ساده‌تر استفاده کرد معمولاً بخشی از راکتور که شامل یک یا چند شبکه نگهدارنده و یک میله سوخت است، به‌عنوان هندسه مسئله انتخاب می‌شود. بنابراین برای بررسی پارامترهای ترموهیدرولیکی که قابلیت اندازه‌گیری ندارند و همچنین مقایسه روش‌های عددی با داده‌های تجربی جریان، برای سه میله سوخت به‌همراه دو شبکه‌های نگهدارنده با پره‌های مغشوش‌کننده^۲ شبیه‌سازی عددی انجام می‌شود.

به‌این منظور، معادلات بقای جرم و مومنتم و همچنین معادله انرژی برای هندسه مذکور حل خواهند شد. معادلات به‌صورت سه‌بعدی و غیردائم هستند. بعد از حل معادلات مذکور و به دست آمدن میدان جریان و همچنین میدان دما، پارامترهای دیگر همچون توزیع فشار و ضریب اصطکاک و میزان انتقال حرارت و همچنین ضریب انتقال حرارت به دست خواهند آمد. سرانجام تحلیل نیروهای نوسانی در طی زمان انجام خواهد شد. معادلات حاکم ذکرشده در

مختصات کارتزین عبارت‌اند از [۱۶]:

معادله پیوستگی:

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

معادلات مومنتم:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

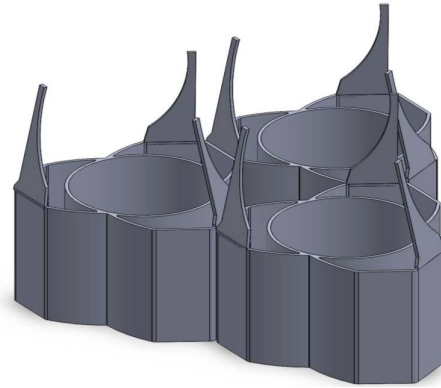
$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

و معادله انرژی:

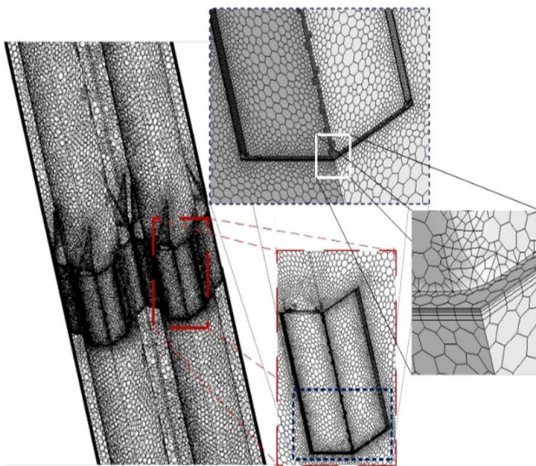
$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \Phi + \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \left(u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (3)$$

شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۲): بخشی از شبکه‌های نگهدارنده

دمای ورودی نیز برابر ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است. فشار در خروجی ثابت فرض شده است. سرعت روی دیواره‌های سیستم با توجه شرط عدم لغزش، صفر می‌باشد. دیواره‌ها صاف در نظر گرفته شده‌اند. از نظر حرارتی این دیواره‌ها به‌طور کامل، عایق هستند و شار حرارتی عبوری از آن‌ها صفر است. بر روی سطوح میله‌های سوخت که در حقیقت مرز انتقال حرارتی هستند، شار حرارتی کسینوسی است. این شروط مرزی بر اساس مشخصات فنی راکتورهای آب سبک تحت فشار ۱۰۰۰ مگاواتی نوع شرقی و اکثر راکتورهای آب سبک تحت فشار نوع غربی، اعمال شده است. همچنین به‌دلیل وجود هندسه تکرارشونده، مرزهای بیرونی سیستم به‌عنوان مرز تناوبی و پرودییک انتخاب شده‌اند.



شکل (۳): نمونه‌ای از شبکه‌بندی هندسه

معادلات حاکم بر مسئله به روش حجم محدود و بر اساس شیوه تراکم‌ناپذیر فشار-مبنا برای جریان‌های داخلی، حل شده و کوپلینگ فشار و سرعت با استفاده از الگوریتم سیمپل سی در نرم‌افزار Ansys-Fluent البته با نوشتن توابع تعریف‌شده کاربر انجام شده است. گسسته‌سازی مکانی همه پارامترها با دقت مرتبه دوم آب ویند انجام گرفته است. برای شرایط اولیه نیز سرعت صفر و دمای ۲۹۱ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

۳. نتایج

در ابتدا برای اعتبارسنجی نتایج، برای حالتی که پرها وجود ندارد، میزان افت فشار با مطالعه گنجیانی و همکاران [۱۷] مورد مقایسه قرار گرفت. تغییرات ضریب افت فشار در امتداد جریان در شکل (۴) نشان داده شده است. ضریب افت فشار به‌صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود:

در نزدیکی دیواره‌ها، برای در نظر گرفتن اثر دیواره که مهم‌ترین شاخص در شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی است، از شبکه‌بندی لایه‌ای استفاده شده است. بایستی اندازه این لایه‌ها به‌شکلی باشد که بتوان به مقدار $y^+ > 5$ مورد نظر رسید تا نتایج نزدیک دیوار قابل قبول باشد. تأثیر تعداد المان‌های مورد تحلیل قرار گرفته، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): بررسی استقلال شبکه

ردیف	تعداد سلول‌ها	افت فشار pa	زمان همگرایی min
۱	1.6×10^6	۱۳/۵	۰/۵
۲	1.2×10^6	۱۴/۶	۵/۱
۳	2.4×10^6	۱۵/۰	۰/۵
۴	4.8×10^6	۱۵/۱	۰/۱۰
۵	9.6×10^6	۱۵/۱	۰/۳۰

در مرحله بعد برای اینکه بازه زمانی مناسبی برای حل گذرا انتخاب کنیم، بازه‌های ۰/۱ ثانیه، ۰/۰۱ ثانیه، ۰/۰۰۱ ثانیه، ۰/۰۰۰۱ ثانیه و ۰/۰۰۰۰۱ ثانیه مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به مقدار ریز بودن شبکه و بحث هم‌گرایی (عدد کورانت)، مشاهده شد که جواب مسئله برای دو حالت ۰/۰۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۱ تفاوت چندانی ندارند؛ بنابراین بازه زمانی برای محاسبات با توجه به امکانات محاسباتی، ۰/۰۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شد.

شبیه‌سازی‌ها برای فشار کاری ۱۵۰ بار انجام شده است. نیروی حجمی که به سیال وارد می‌شود، گرانش است. خواص سیال آب به صورت متغیر با دما اعمال می‌شود. این امر به‌همراه اعمال گرانش باعث در نظر گرفته شدن اثر جابه‌جایی آزاد در نتایج می‌شود. خواص آب برای حالت‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار حل معادلات خطی، استخراج شده است. سرعت ورودی برابر با ۵/۶ متر بر ثانیه و

همان طور که مشاهده می‌شود وجود پره‌های مغشوش‌کننده باعث کاهش بیشتر دمای میله سوخت می‌شود. از آنجاکه شار حرارتی وارد شده به سیال از طریق میله‌ها در دو حالت ثابت است، کم بودن دمای دیواره نشان‌دهنده افزایش ضریب انتقال حرارت کلی می‌باشد. به عبارت دیگر با ثابت نگه داشتن میزان دمای میله‌ها وجود پره‌های مغشوش‌کننده باعث افزایش شار حرارتی می‌شود که البته این موضوع، بسیار مطلوب است.

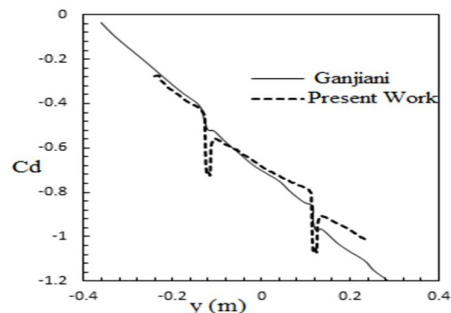
با تمرکز بر روی کانتورهای سرعت و ویسکوزیته اغتشاشی ارائه شده در شکل‌های (۶) و (۷)، می‌توان مشاهده کرد که وجود شبکه نگهدارنده، یکنواختی جریان را بر هم می‌زند. همچنین وقتی شبکه نگهدارنده فاقد پره‌های مغشوش‌کننده هستند، جریان در کوتاه‌ترین مسیر پس از عبور از نگهدارنده، به حالت قبلی خود بازمی‌گردد؛ اما در حالتی که شبکه‌های نگهدارنده دارای پره‌های مغشوش‌کننده هستند، اولاً میزان یکنواختی جریان با شدت بیشتری تغییر می‌کند و ثانیاً این غیر یکنواختی تا ارتفاع‌های بالاتر، با جریان سیال همراه است. پره‌های مغشوش‌کننده تقریباً توسعه‌یافتگی جریان را تا ارتفاع‌های بیشتری به تعویق می‌اندازد. می‌دانیم که ضریب انتقال حرارت در جریان‌های در حال توسعه، بسیار بیشتر از جریان‌های توسعه‌یافته است و در این نواحی برداشت انرژی به صورت بهتری صورت می‌پذیرد.

میزان افزایش اغتشاشات ناشی از پره‌های مغشوش‌کننده چندین برابر شبکه‌های نگهدارنده است. دلیل این مسئله، این است که شبکه‌های نگهدارنده تنها باعث ایجاد تنش‌های برشی و درگ‌های اصطکاکی بر روی جریان می‌شوند، اما پره‌های مغشوش‌کننده، گرچه تنش‌های برشی کمتری به جریان آب اعمال می‌کنند، وجود اختلاف سرعت و فشار زیاد در قبل و بعد از آن‌ها باعث ایجاد تنش‌های فشاری شدید و در نتیجه درگ فشاری می‌شود. این موضوع، اثر پره‌ها بر افزایش اغتشاشات و همچنین بهبود انتقال حرارت را نشان می‌دهد. با این حال این پره‌ها به دلیل همین اثر درگ‌های فشاری، نیروی نسبتاً زیادی را تحمل کرده که باعث ایجاد ارتعاشات القایی ناشی از جریان می‌شود. همچنین به دلیل اینکه خود این پره‌های مغشوش‌کننده در اثر وجود نیروهای مذکور دچار حرکت و نوسان می‌شوند، میزان اغتشاشات را نیز مضاعف می‌کنند.

یک مورد قابل توجه دیگر میزان افت فشار ناشی از شبکه‌های نگهدارنده و پره‌های مغشوش‌کننده است. در جریان با پره‌های مغشوش‌کننده، مجموعه شبکه نگهدارنده و پره‌های مغشوش‌کننده، نزدیک به ۴۰۰۰ پاسکال، افت فشار را ایجاد می‌کنند، درحالی‌که در

$$C_d = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (8)$$

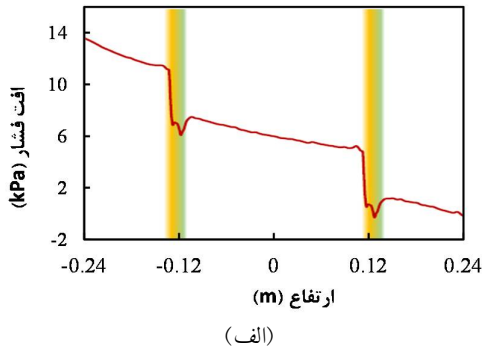
میزان کاهش ضریب فشار ناشی از شبکه نگهدارنده برای مطالعه گنجیانی و همکاران، برابر با ۰/۰۹۱۳ و برای مطالعه حاضر ۰/۰۹۵۷ است. همچنین نتایج به دست آمده توسط کار تجربی ریهم و همکاران [۱۸]، مقدار آن ۰/۰۹۳۷ را نشان می‌دهد؛ مقایسه نتایج اختلافی کمتر از ۵٪ را نشان می‌دهد که تطابق خوبی را نشان می‌دهد. البته علت تفاوت ایجاد شده بین نتایج کار حاضر و مطالعات دیگران را می‌توان به نحوه مدل کردن شبکه‌های نگهدارنده به صورت سه‌بعدی دانست. این در حالی است که در سایر مطالعات، شبکه‌های نگهدارنده تنها به عنوان صفحه در نظر گرفته شده‌اند. فرض شبکه نگهدارنده به عنوان یک صفحه، شبکه‌بندی را راحت‌تر می‌کند اما نتایج از دقت کمتری برخوردار خواهند بود. همچنین در مقایسه با نتایج تجربی، مشاهده شد که میزان افت فشار ناشی از شبکه نگهدارنده با پره‌های مغشوش‌کننده در مطالعه حاضر، برابر با ۲/۵ کیلوپاسکال است و برای کارهای تجربی کاروتا [۱۹]، برابر با ۳ کیلوپاسکال است که اختلافی نزدیک به ۱۵٪ را نشان می‌دهد. همچنین برای حالت وجود پره‌های مغشوش‌کننده، نتایج با کار عسگری و همکاران [۲۰] مقایسه شده است. در هر دو شبیه‌سازی برای پره‌های مغشوش‌کننده، مقدار افت فشار نزدیک به ۱۶ کیلوپاسکال به دست آمده است. در بررسی نتایج افت فشار آنچه مهم است روند تغییرات فشار و کاهش فشار در امتداد میله است.



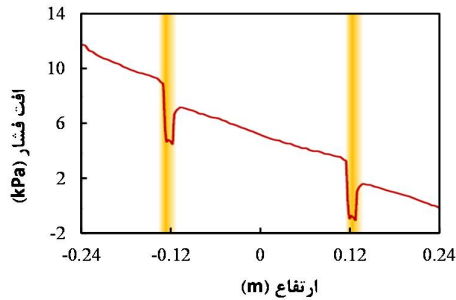
شکل (۴): تغییرات ضریب افت فشار در طول جریان و مقایسه با نتایج گنجیانی [۱۷]

کاهش فشار موضعی در عبور از شبکه‌های نگهدارنده بازیابی شده و در نهایت افت فشار نهایی به یک روند منتهی می‌شود. در شکل‌های (۵ تا ۷) به ترتیب کانتورهای دما، سرعت و ویسکوزیته برای مجتمع سوخت و شبکه نگهدارنده آن که دارای پره‌های مغشوش‌کننده می‌باشد (سمت چپ) به همراه شبکه نگهدارنده بدون پره مغشوش‌کننده (سمت راست) نشان داده شده است.

جریان بدون پره‌های مغشوش‌کننده، افت فشار ناشی از شبکه‌های نگهدارنده برابر با ۱۷۰۰ پاسکال است.

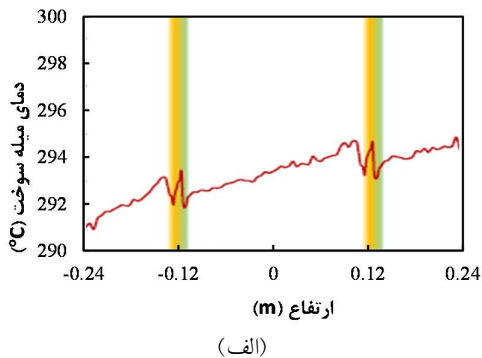


(الف)

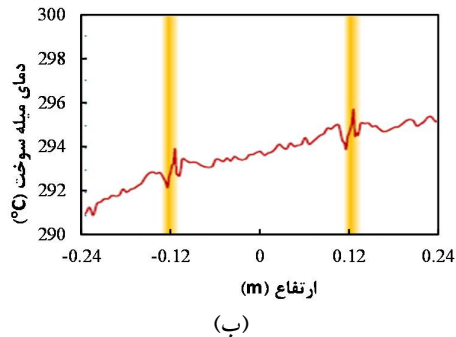


(ب)

شکل (۸): تغییرات فشار برحسب ارتفاع (الف) با پره مغشوش‌کننده؛ (ب) بدون پره مغشوش‌کننده



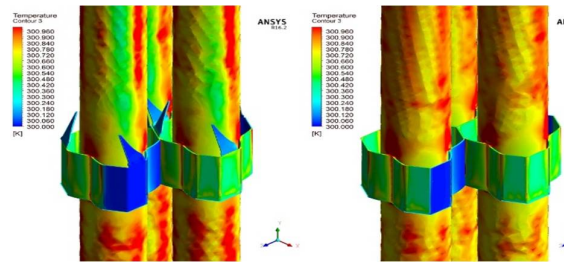
(الف)



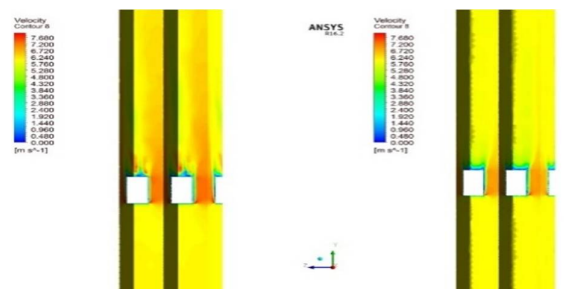
(ب)

شکل (۹): دمای دیواره میله‌ها برحسب ارتفاع (الف) بدون پره‌های مغشوش‌کننده؛ (ب) با پره‌های مغشوش‌کننده

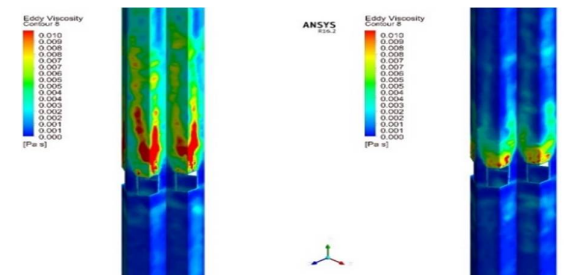
در هر دو حالت، نمودارهای دما رفتار تقریباً یکسانی دارند و با آهنگ بسیار کم افزایش می‌یابند. دلیل آن نرخ کم شار حرارتی در این



شکل (۵): کانتور دما بر روی میله‌های سوخت و شبکه‌های نگهدارنده با پره و بدون پره‌های مغشوش‌کننده



شکل (۶): کانتور سرعت جریان سیال خنک‌کننده بر روی میله‌های سوخت با پره و بدون پره‌های مغشوش‌کننده

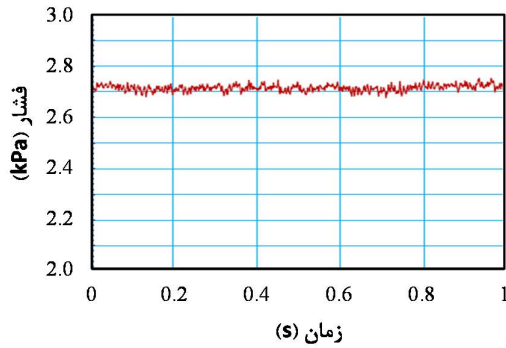


شکل (۷): کانتور ویسکوزیته اغتشاشی جریان سیال خنک‌کننده با پره و بدون پره‌های مغشوش‌کننده

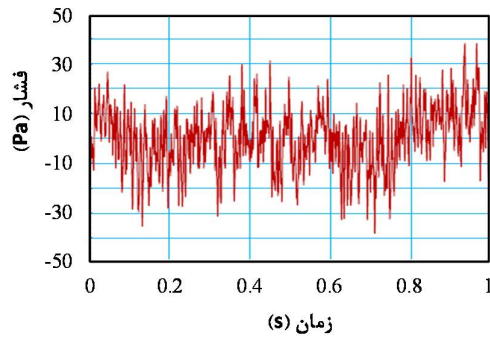
در شکل (۸) توزیع فشار در طول میله‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود جریان در عبور از شبکه‌های نگهدارنده کاهش فشار محسوسی دارد. البته افت فشار کلی در حالت وجود پره‌های مغشوش‌کننده، بیشتر است.

شکل (۹) نشان‌دهنده دمای دیواره میله‌ها برحسب ارتفاع برای حالت شبکه نگهدارنده با پره‌های مغشوش‌کننده و بدون پره‌های مغشوش‌کننده است.

تغییرات زمانی فشار خالص وارد شده به شبکه نگهدارنده اول و نوسانات آن برای حالت وجود پره‌ها در شکل (۱۱) نشان داده شده است. از آنجا که شبکه‌های نگهدارنده همانند صفحه عمل می‌کنند، اختلاف فشار بین قبل و بعد این صفحات، باعث ایجاد نیروی خالص فشاری بر این صفحات می‌شود.



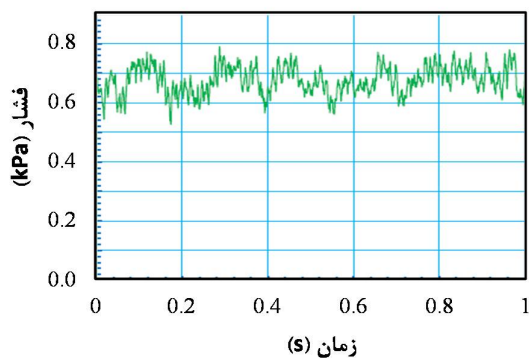
(الف)



(ب)

شکل (۱۱): فشار وارد شده به شبکه نگهدارنده اول با پره‌های مغشوش کننده (الف) فشار خالص؛ (ب) نوسانات فشار

همین نتایج برای حالت بدون پره در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نیروی فشاری خالصی که به شبکه نگهدارنده وارد می‌شود، در حالت وجود پره‌های مغشوش کننده حدود چهار برابر حالت بدون پره است.

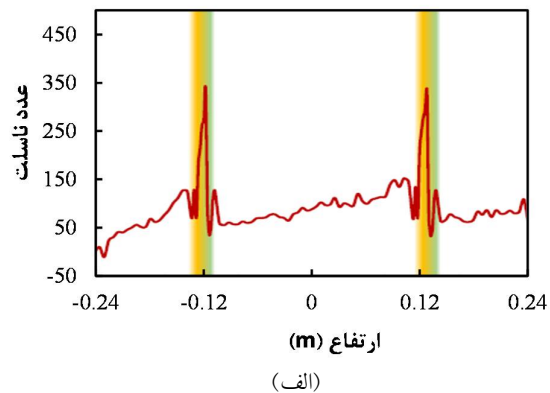


(الف)

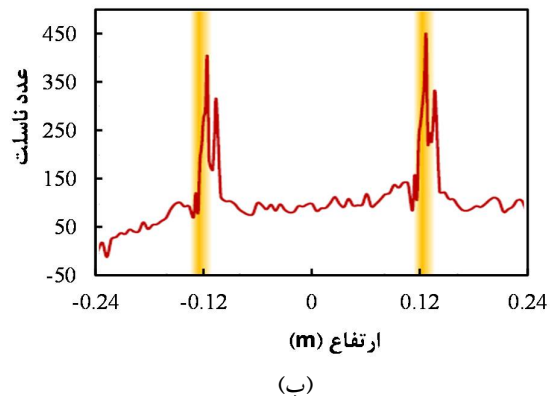
ناحیه است (گرچه شار حرارتی کسینوسی است، به دلیل کوتاه بودن ارتفاع بررسی شده نسبت به ارتفاع کل، تقریباً ثابت است). نکته قابل تأمل دیگر، شیب افزایش دماست. با توجه به اینکه شار حرارتی اعمال شده در هر دو حالت یکسان است، میزان افزایش دما یکسان نیست. دمای دیواره میله سوخت در حالتی که پره وجود دارد کمتر است. این امر بسیار مطلوب است زیرا نشان می‌دهد که وجود پره‌ها باعث کاهش دمای دیواره می‌شود. اگر این کاهش دمای دیواره در نواحی‌ای که دمای میله به ماکزیمم خود می‌رسد اتفاق بیفتد، می‌تواند ریسک رسیدن به شار حرارت بحرانی را کاهش دهد و ایمنی راکتور را افزایش دهد. با این حال وجود پره‌های مغشوش کننده، ارتعاشات القایی را افزایش می‌دهد که باید به آن توجه کرد.

شکل (۱۰) نیز تغییرات عدد ناسلت برای جریان در اطراف میله‌ها را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود در عبور جریان از پره‌ها عدد ناسلت به صورت موضعی افزایش می‌یابد.

دامنه تغییرات عدد ناسلت در ناحیه عبور جریان از شبکه‌های نگهدارنده برای حالت با پره مغشوش کننده ۴۰۰ تا ۴۵۰ است در حالی که برای شبکه‌های نگهدارنده بدون پره، حدود ۳۵۰ است که نشان دهنده افزایش انتقال حرارت در اثر وجود پره‌هاست.



(الف)

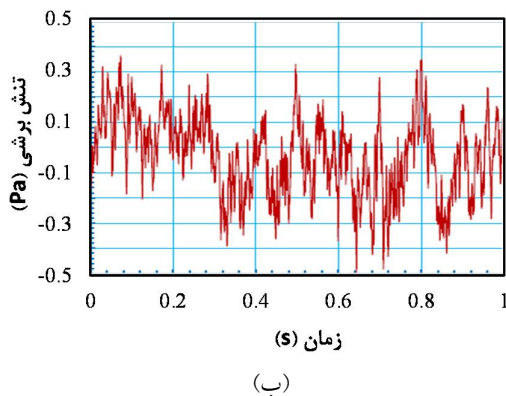
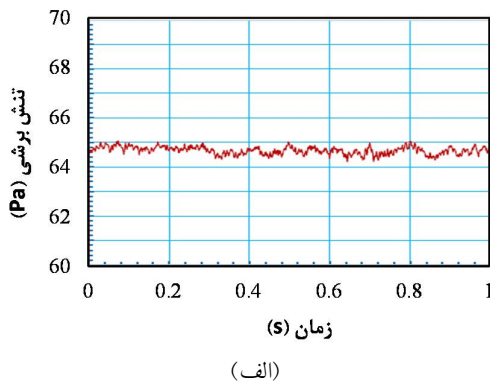


(ب)

شکل (۱۰): عدد ناسلت بر حسب ارتفاع (الف) بدون پره‌های مغشوش کننده؛ (ب) با پره‌های مغشوش کننده

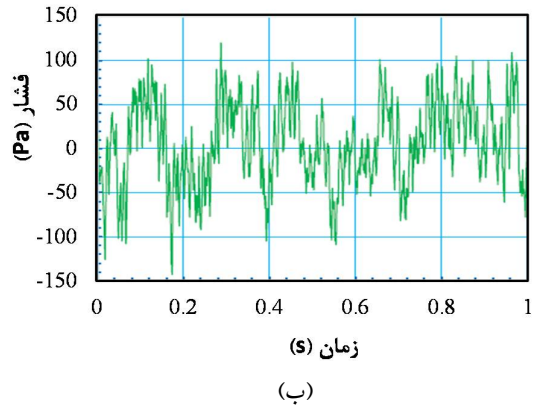
شده‌اند. برخلاف تنش‌های فشاری که تفاضل آن‌ها نیروی خالص واردشده بر شبکه را ایجاد می‌کند، برای محاسبه تنش برشی خالص تنش‌های برشی دو طرف صفحات با هم جمع می‌شود. البته همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار متوسط تنش برشی بسیار کمتر از متوسط تنش فشاری خالص است. بنابراین می‌توان گفت که بیشترین نیرویی که به شبکه نگهدارنده وارد می‌شود، نیروی عمود بر سطح (تنش‌های فشاری) است.

برای اینکه شبکه نگهدارنده در حالت خود باقی بماند، این نیروها توسط میله‌ها و سایر اجزا خنثی می‌شود. بنابراین در ناحیه‌ای که میله‌ها به شبکه نگهدارنده متصل هستند، نیرویی متمرکز به میله‌ها وارد می‌شود که بخشی از آن ناشی از نیروهای اصطکاکی واردشده بر شبکه‌های نگهدارنده است.



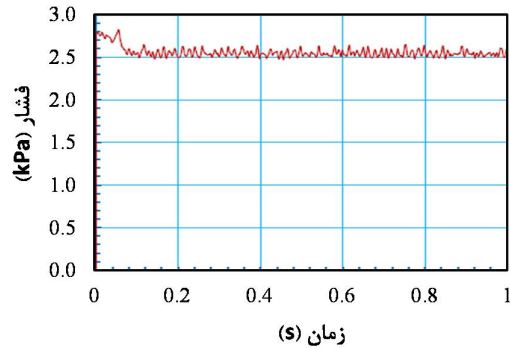
شکل (۱۵): تنش برشی واردشده به شبکه نگهدارنده اول با پره (الف) تنش برشی خالص؛ (ب) نوسانات تنش برشی

تنش‌های برشی واردشده به شبکه نگهدارنده اول و نوسانات آن در حالت بدون پره در شکل (۱۶) نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که تنش‌های برشی که به شبکه نگهدارنده وارد می‌شود، تقریباً برابر تنش‌های برشی واردشده بر شبکه نگهدارنده با پره است. البته دامنه نوسانات این نیرو نیز در همین مقیاس قرار دارد. بنابراین می‌توان اظهار داشت که پره‌های مغشوش‌کننده و ارتعاشات القایی ناشی از

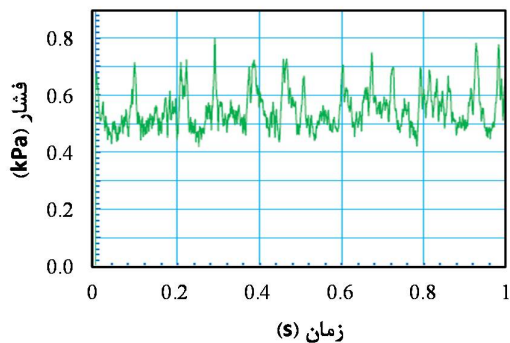


شکل (۱۲): فشار واردشده به شبکه نگهدارنده اول بدون پره‌های مغشوش‌کننده (الف) فشار خالص؛ (ب) نوسانات فشار

همچنین شکل‌های (۱۳) و (۱۴) فشار واردشده به شبکه نگهدارنده دوم را در حالت بودن و نبودن پره‌های مغشوش‌کننده نشان می‌دهد. مقدار متوسط نیروی فشاری واردشده برای هر دو حالت نزدیک به ۱۰٪ کاهش را نسبت به شبکه نگهدارنده اول نشان می‌دهد.

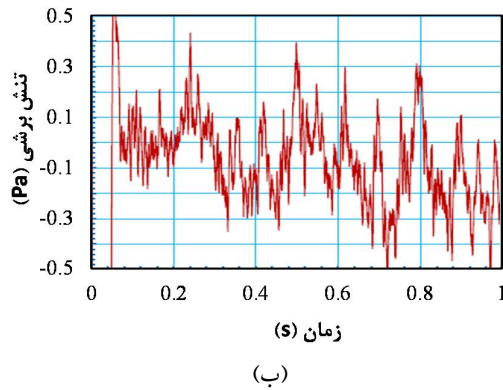


شکل (۱۳): فشار واردشده به شبکه نگهدارنده دوم برای حالت با پره‌های مغشوش‌کننده



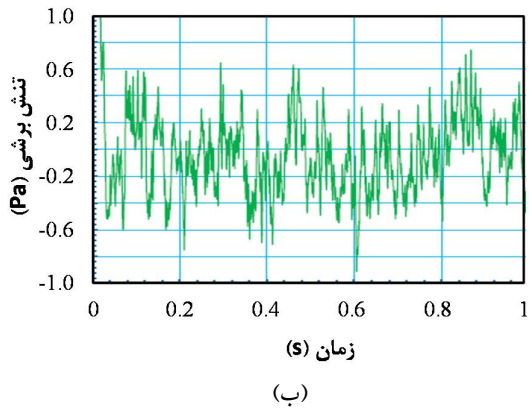
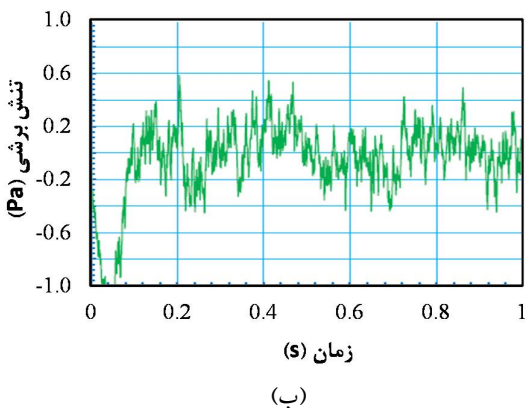
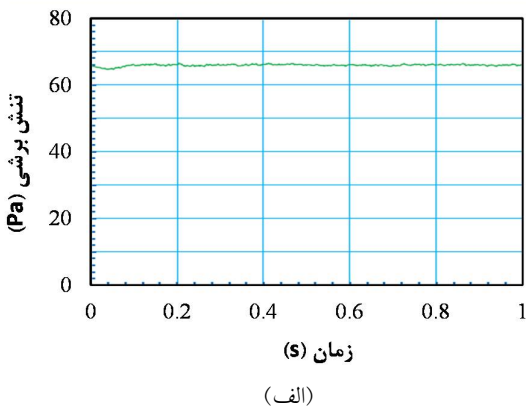
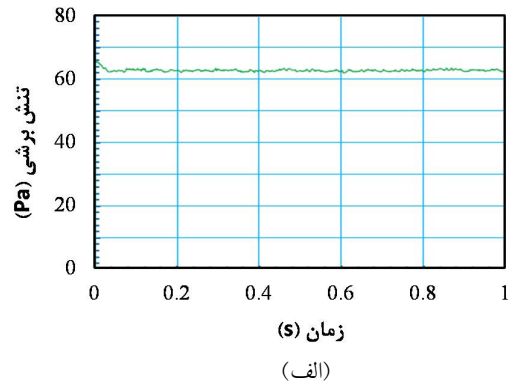
شکل (۱۴): فشار واردشده به شبکه نگهدارنده دوم برای حالت بدون پره‌های مغشوش‌کننده

تنش‌های برشی واردشده به شبکه نگهدارنده اول و نوسانات آن در حالت وجود پره‌های مغشوش‌کننده در شکل (۱۵) نشان داده



شکل (۱۷): تنش برشی وارد شده به شبکه نگهدارنده دوم با پره (الف) تنش برشی خالص؛ (ب) نوسانات تنش برشی

آن‌ها، تنها بر نیروهای فشاری و نوسانات آن‌ها اثر می‌گذارد و تنش‌های برشی مستقل از پره‌های مغشوش‌کننده هستند.

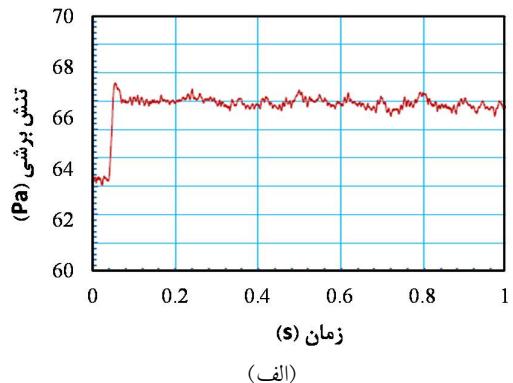


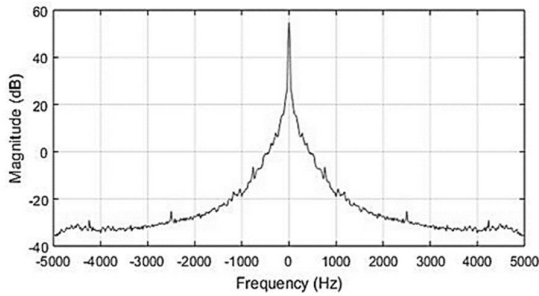
شکل (۱۶): تنش برشی وارد شده به شبکه نگهدارنده اول بدون پره (الف) تنش برشی خالص؛ (ب) نوسانات تنش برشی

شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نیز به ترتیب میزان و نوسان تنش‌های برشی وارد شده بر شبکه نگهدارنده دوم را در حالت با پره و بدون پره نشان داده است. مقدار متوسط تنش برشی وارد شده برای هر دو حالت در شبکه نگهدارنده دوم کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت به شبکه نگهدارنده اول را نشان نمی‌دهد. بنابراین آنالیز نیرویی نشان می‌دهد که مقدار نیروهای وارد شده بر شبکه نگهدارنده بیشتر به نیروهای فشاری مربوط می‌شود تا نیروهای برشی.

شکل (۱۸): تنش برشی وارد شده به شبکه نگهدارنده دوم بدون پره (الف) تنش برشی خالص؛ (ب) نوسانات تنش برشی

برای بررسی ارتعاشات حاصل از نیروهای اعمال شده، با استفاده از توزیع نیروها در طول زمان، آنالیز فرکانسی نیروها انجام شده است. با به دست آوردن چگالی توان طیفی^۱ نیروهای وارد شده نحوه اعمال نیروها و فرکانس ارتعاش و دامنه نوسانات وارد شده به میله‌ها به





شکل (۲۲): توزیع توان طیفی نیروهای فشاری وارد شده به شبکه نگهدارنده دوم بدون پره

۴. نتیجه گیری

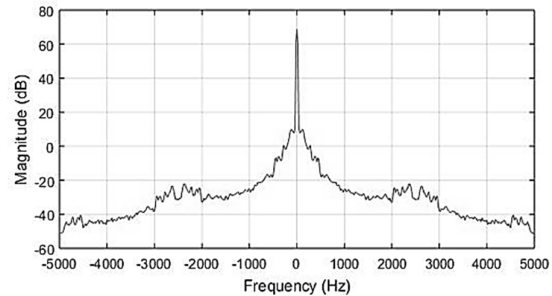
در این تحقیق، تحلیل ترموهیدرولیکی و آنالیز نیرویی برای جریان موازی در اطراف میله‌های یک مجتمع سوخت هسته‌ای با شبکه‌های نگهدارنده در دو حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت اول، شبکه نگهدارنده دارای پره‌های مغشوش کننده بود و در مورد دوم پره‌های مغشوش کننده وجود نداشت. نتایج حاصل با داده‌های تجربی و سایر نتایج نیمه تجربی مقایسه شد و اختلاف کمتر از ۱۰٪ مشاهده شد. که با توجه به فرض‌های صورت گرفته منطقی است. به طور خلاصه نتایج حاصل را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱. گرچه پره‌های مغشوش کننده باعث افت فشار محلی زیادی می‌شوند، با تغییراتی که در جریان بالادست خود ایجاد می‌کنند، تا حدودی باعث کاهش افت فشار در فاصله بین دو شبکه نگهدارنده می‌شوند. اما در هر صورت افت فشار کلی در حالت شبکه نگهدارنده با پره‌های مغشوش کننده، بیشتر از حالتی است که شبکه بدون پره است.

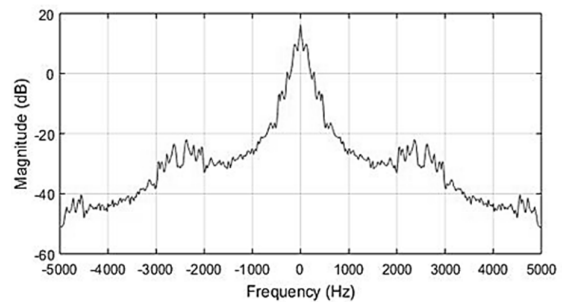
۲. وجود پره‌ها باعث افزایش انتقال حرارت و در نتیجه کاهش دمای دیواره میله‌ها می‌شود. کاهش یافتن دمای میله‌ها می‌تواند ریسک رسیدن به شار حرارت بحرانی را کاهش و ایمنی راکتور را افزایش دهد. با این حال وجود پره‌های مغشوش کننده، ارتعاشات القایی را افزایش می‌دهد.

۳. دامنه ارتعاشات در فرکانس‌های پایین، زیر ۳۰۰ هرتز، بسیار بالاست. در سایر فرکانس‌ها دامنه ارتعاشات بسیار ناچیز است؛ گرچه پرش‌هایی در فرکانس‌های بین ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ هرتز مشاهده شده است. دامنه این نوسانات نیز ناچیز است.

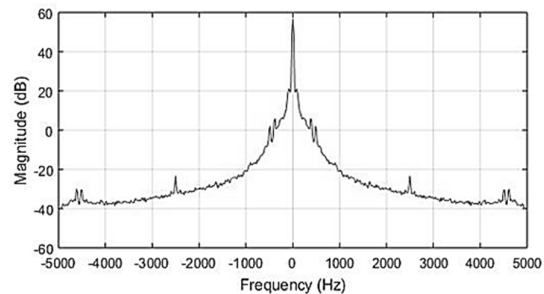
دست آمده است. شکل‌های (۱۹) تا (۲۲) نتایج تحلیل ارتعاشی برای نوسانات نیروهای فشار وارد شده بر میله سوخت را در دو حالت شبکه‌های نگهدارنده با پره و بدون پره نشان می‌دهد. در این شکل‌ها توزیع توان طیفی نیروهای ارتعاشی وارد شده به شبکه‌های نگهدارنده نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، دامنه ارتعاشات در فرکانس‌های زیر ۳۰۰ هرتز، بسیار بالاست ولی در سایر فرکانس‌ها دامنه ارتعاشات ناچیز است. همچنین پرش‌هایی در فرکانس‌های بین ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ هرتز اتفاق افتاده است. دامنه این نوسان نیز کم است.



شکل (۱۹): توزیع توان طیفی نیروهای فشاری وارد شده به شبکه نگهدارنده اول با پره



شکل (۲۰): توزیع توان طیفی نیروهای فشاری وارد شده به شبکه نگهدارنده دوم با پره



شکل (۲۱): توزیع توان طیفی نیروهای فشاری وارد شده به شبکه نگهدارنده اول بدون پره

مراجع

- [1] Pittard, M. T., Evans, T. P., Maynes, R. D. and Blotter, J. D., "Experimental and numerical investigation of turbulent flow induced pipe vibration in fully developed flow", Review of Scientific Instruments, Vol. 75, No. 7, pp. 2393-2401, 2004.
- [2] Zhang, J., Xu, G., Liu, F., Lian, J. and Yan, X., "Experimental investigation on the flow induced vibration of an equilateral triangle prism in Water", Applied Ocean Research, Vol. 61, pp. 92-100, 2016.
- [3] Korkischko, I. and Meneghini, J. R., "Experimental investigation of flow-induced vibration on isolated and tandem circular cylinders fitted with strakes", Journal of Fluids and Structures, Vol. 26, No. 4, pp. 611-625, 2010.
- [4] Franzini, G., Fajarra, A. L. C., Meneghini, J. R., Korkischko, I. and Franciss, R., "Experimental investigation of vortex-induced vibration on rigid, smooth and inclined cylinders", Journal of Fluids and Structures, Vol. 25, No. 4, pp. 742-750, 2009.
- [5] Assi, G., Meneghini, J., Aranha, J., Bearman, P., Casaprima, E., "Experimental investigation of flow-induced vibration interference between two circular cylinders", Journal of Fluids and Structures, Vol. 22, No. 6, pp. 819-827, 2006.
- [6] Selvakumar, K. K. and Kumaraswamidhas, L., "Experimental investigation on flow-induced vibration excitation in an elastically mounted circular cylinder in cylinder arrays", Fluid Dynamics Research, Vol. 47, No. 1, pp. 015508, 2015.
- [7] Shurtz, T., Maynes, D. and Blotter, J., "Analysis of induced vibrations in fully-developed turbulent pipe flow using a coupled LES and FEA approach", in Proceeding of, American Society of Mechanical Engineers, pp. 521-531, 2011.
- [8] CUI, Z.-d. and GUO, C.-q., "Analysis on critical flow velocities and destabilizing deflection curves of an element model for parallel-plate fuel assembly [JJ]", Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition), Vol. 1, pp. 002, 2005.
- [9] Kaja, K., Zhao, M., Xiang, Y. and Cheng, L., "Three-dimensional numerical simulations of vortex-induced vibrations of tapered circular cylinders", Applied Ocean Research, Vol. 60, pp. 1-11, 2016.
- [10] Jiang, X., Andreopoulos, Y., Lee, T. and Wang, Z., "Numerical investigations on the vortex-induced vibration of moving square cylinder by using incompressible lattice Boltzmann method", Computers & Fluids, Vol. 124, pp. 270-277, 2016.
- [11] Duan, D., Ge, P., Bi, W. and Ji, J., "Numerical investigation on the heat transfer enhancement mechanism of planar elastic tube bundle by flow-induced vibration", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 112, pp. 450-459, 2017.
- [12] مولایی اقدام، الهام، فخار، احمد، نوری بیگدلی، حسین، «شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت و افت فشار در مبدل حرارتی پوسته و لوله با دسته لوله بیضوی»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، جلد ۴، شماره ۳، صفحه ۵۹-۴۸، ۱۳۹۳.
- [13] Jiadong, Ji., Peiqu, Ge. and Wenbo, Bi, "Numerical analysis of shell-side flow-induced vibration of elastic tube bundle in heat exchanger", Journal of Hydrodynamics, No. 30, pp:1-8, 2018.
- [14] Vishwanaiadong, K., S. and Balagura, S., "Analysis on Fluid-Induced Vibration and Heat Transfer of Helical Elastic Tube Bundles", Proceedings of ICDMC 2019, pp:621-635, 2019.
- [15] Jiadong, Ji., Unmiao, Gao, Qinghua Chen, Weiqiang Chen and Jingwei, Zhang, "Analysis on Fluid-Induced Vibration and Heat Transfer of Helical Elastic Tube Bundles", Journal of thermophysics and heat transfer, pp:249-257, 2020.
- [16] Robet, W., Fox, Alan T. McDonald, Philip J. Pritchard and John, W., Mitchell, Introduction to Fluid Mechanics, JOHN WILEY & SONS, INC, 2015
- [17] Ganjiani, H., Firoozabadi, B., "Three-dimensional simulation of turbulent flow in 3-sub channels of a VVER-1000 reactor", Scientia Iranica. Transaction B, Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 83, 2010.
- [18] Rehme, K., "The structure of turbulence in rod bundles and the implications on natural mixing between the subchannels", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 35, No. 2, pp. 567-581, 1992.
- [19] Karouta, Z., GU, C.-Y., Schölin, B., 3-D flow analyses for design of nuclear fuel spacer, pp. 1995.

[۲۰] عسگری قورتانی، مجید، طالبی، منصور، عبدی، محمدرضا، احمدی‌کیا،

حسین، شبیه‌سازی عددی جریان مغشوش اطراف دسته میله‌های سوخت

راکتور VVER-440 و بررسی اثر نگهدارنده‌ها روی آن»، نوزدهمین

همایش سالانه مهندسی مکانیک، کد مقاله: ISME19_037 2011.