

بررسی عددی انتقال گرمای جریان سیال در کانال شامل استوانه با دو مولد گردابه انعطاف پذیر تحت شرایط جریان ورودی سینوسی

سجاد آهنگر زنوزی* استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران، s.ahangar@ilam.ac.ir

عبدالحمید عزیزی دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران، ah.azizi@ilam.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، رفتار هیدرودینامیکی و انتقال گرمای جریان سیال جاری در یک کانال با دیواره‌های گرم در حضور پره‌های انعطاف پذیر (مولد گردابه) مورد بررسی قرار گرفته است. جریان سیال ورودی به کانال با پروفیل سینوسی تعریف شده است که منجر به نوسان پره‌های الاستیک و ایجاد گردابه‌هایی در جریان سیال می‌شود. معادلات حاکم بر جریان سیال و تغییر شکل پره‌های الاستیک با استفاده از روش المان محدود همراه با تکنیک لاگرانژی-اولری حل شده‌اند. تحلیل عددی شامل مطالعه رفتار پره‌های انعطاف پذیر و تأثیر آن‌ها بر روی نیروی پسا، عدد ناسلت و افت فشار در کانال است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مدول الاستیسیته پره‌ها باعث افزایش نیروی پسا، عدد ناسلت و کاهش جابجایی نوک انتهایی پره‌ها می‌شود. همچنین با افزایش طول پره‌های الاستیک، انتقال گرما بر روی دیواره‌های گرم بهبود یافته و افت فشار در داخل کانال افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، حضور پره‌های انعطاف پذیر به طول 3 mm منجر به افزایش عددناسلت به میزان ۸۲٪ و بهبود شاخص نسبت عملکرد گرمایی به میزان ۱۰٪ نسبت به حالت پایه (در غیاب پره‌های انعطاف پذیر) گردیده است. **واژه‌های کلیدی:** تعامل سازه-سیال، پره انعطاف پذیر، انتقال گرما، جریان سینوسی سیال، کانال، مولد گردابه.

Numerical investigation of heat transfer of fluid flow in a channel containing a cylinder with two flexible vortex generators under sinusoidal inlet flow conditions

S. Ahangar Zonouzi
 A. H. Azizi

Department of Mechanical Engineering, Ilam University, Ilam, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Ilam University, Ilam, Iran

Abstract

In this study, the hydrodynamic behavior and heat transfer of fluid flow inside a channel with heated walls in the presence of flexible fins (vortex generators) have been investigated. The inlet fluid flow into the channel is defined with a sinusoidal profile, which causes the elastic fins to oscillate and generate vortices in the fluid flow. The governing equations of fluid flow and the deformation of the elastic fins have been solved using the finite element method combined with the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) technique. The numerical analysis includes the study of the fins' behavior and their impact on drag force, Nusselt number, and pressure drop within the channel. The results show that increasing the fins' modulus of elasticity leads to an increase in drag force, Nusselt number, and a decrease in the tip displacement of the fins. Furthermore, the results indicate that by increasing the length of the elastic fins, heat transfer on the heated walls is enhanced, and the pressure drop inside the channel is increased. For example, the presence of flexible fins with a length of 3 mm resulted in an 82% increase in the Nusselt number and a 10% improvement in the thermal performance ratio compared to the baseline case (without flexible fins).

Keywords: Fluid-Structure Interaction, Flexible Fin, Heat Transfer, Sinusoidal Fluid Flow, Channel, Vortex Generator.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، بهبود کارایی سیستم‌های انتقال گرما و کنترل جریان سیال در کانال‌ها و لوله‌ها به عنوان یک چالش مهم در صنایع مختلف مطرح شده است. یکی از روش‌های موثر برای افزایش آهنگ انتقال گرما، استفاده از مولدهای گردابه است که با ایجاد گردابه‌های کنترل شده در جریان سیال، آهنگ اختلاط را افزایش داده و بهبود قابل توجهی در انتقال گرما ایجاد می‌کنند. مولدهای گردابه در انواع مختلفی طراحی شده‌اند، از جمله پره‌های ثابت و منعطف. پره‌های انعطاف پذیر به دلیل توانایی‌شان در تغییر شکل و پاسخ به نوسانات جریان، به عنوان یکی از روش‌های نوین و موثر در کنترل جریان و افزایش انتقال گرما مورد توجه قرار گرفته‌اند. این پره‌ها می‌توانند تحت تأثیر جریان ورودی نوسان کنند و به طور دینامیکی گردابه‌هایی را ایجاد کنند که به بهبود انتقال گرما کمک می‌کند.

گرما در کانال‌ها را بهبود بخشد. میرزایی و همکاران [۱] یک سیستم انتقال گرما ارائه کردند که از یک پره انعطاف پذیر نصب شده بر روی دیواره‌ی پایینی استفاده می‌کند. آن‌ها نشان دادند که این سیستم در مقایسه با سیستمی که از یک پره صلب نصب شده بر روی دیواره استفاده می‌کند، عملکرد بهتری در انتقال گرما دارد. پارک [۲] بررسی کرد که چگونه زاویه تمایل یک پره انعطاف پذیر در جهت عمودی و مدول الاستیسیته آن بر عملکرد انتقال گرما سیستم تأثیر می‌گذارد. مطالعه آن‌ها نشان داد که یک پره انعطاف پذیر به دلیل ایجاد ساختارهای گردابی که به اختلاط جریان کمک می‌کنند، به طور قابل توجهی کارایی گرمایی را در مقایسه با یک پره صلب بهبود می‌بخشد. دادوند و همکاران [۳] مطالعه‌ای بر روی تکنیک‌های بهبود انتقال گرما و جرم با استفاده از روش‌های غیرفعال و فعال انجام دادند. در این پژوهش، از یک میکروکانال با مانعی استوانه‌ای استفاده شد و یک تیر انعطاف پذیر به عنوان مولد گردابه در پایین دست قرار گرفت. نوسان این تیر، گردابه‌های دوره‌ای تولید کرد که لایه مرزی گرمایی را برهم زده و

تحقیقات اخیر در منابع نشان داده‌اند که استفاده از پره‌های انعطاف پذیر و دیواره‌های الاستیک می‌تواند به طور قابل توجهی انتقال

* نویسنده‌گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: s.ahangar@ilam.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱

در نتیجه، انتقال گرما به طور قابل توجهی افزایش یافت. حسینی و همکاران [۴] به بررسی بهبود انتقال گرما و اختلاط با استفاده از یک مولد گردابه الاستیک در یک میکروکانال پرداختند. در مقایسه با کانالی که دارای مولد گردابه صلب یا بدون مولد گردابه بود، حرکت نوسانی مولد گردابه الاستیک، گردابه‌های متوالی ایجاد کرد که جریان را به هم می‌زد و لایه مرزی گرمایی را مختل می‌کرد، که این امر منجر به افزایش ۳۱/۴ درصدی عدد ناسلت و افزایش ۱۴/۵ درصدی شاخص اختلاط شد. همچنین، مولد گردابه الاستیک کاهش افت فشار و افزایش ۳۲ درصدی در ضریب عملکرد ترموهیدرولیکی را نشان داد، که نشان‌دهنده پتانسیل آن برای بهبود کارایی مبادله‌کن‌های گرمایی، میکسرها و راکتورها است. اسماعیل و همکاران [۵] به صورت عددی، عملکرد گرمایی یک کانال عبور دوگانه عمودی که توسط یک ورق نازک انعطاف‌پذیر جدا شده بود را بررسی کردند. آنها دریافتند که استفاده از یک جداکننده انعطاف‌پذیر به جای یک جداکننده صلب می‌تواند به صورت غیرفعال انتقال گرما را در هر یک از دو مسیر عبور افزایش دهد. با این حال، ورق انعطاف‌پذیر باعث افزایش افت فشار تا ۲۰۰ درصد شد، که منجر به کاهش معیار عملکرد گرمایی به کمتر از یک شد. طبق مطالعه فلاح و همکاران [۶]، اثر اندازه مانع مثلی بر میزان اختلاط در یک کانال دو بعدی به صورت عددی بررسی شد. آنها دریافتند که با کاهش ارتفاع مثلی، میزان اختلاط افزایش می‌یابد که این امر به دلیل افزایش فرکانس جدایش گردابه‌ها است. علی و همکاران [۷] به طور عددی یک کانال اختلاط سه‌بعدی را با ۲۰ مولد گردابه‌های انعطاف‌پذیر در پنج ردیف بررسی کردند. آنها دریافتند که استفاده از مولدهای گردابه انعطاف‌پذیر به طور چشمگیری بازده اختلاط را بهبود می‌بخشد و گزارش کردند که استفاده از پیکربندی مولدهای گردابه انعطاف‌پذیر نسبت به حالت صلب، ۱۹۵٪ افزایش در بازده اختلاط داشته است. یو و همکاران [۸] به صورت تجربی اثر طول پره انعطاف‌پذیر را بر میزان اختلاط سیال در یک مخلوط‌کن سه‌بعدی بررسی کردند. آنها دریافتند که شدت گردابه می‌تواند زمانی که طول پره انعطاف‌پذیر یک‌چهارم عرض کانال باشد، به بیشینه مقدار خود برسد. جینگ و ژان [۹] در مطالعه خود، عملکرد هیدرولیکی و پدیده اختلاط در یک میکرومیکسر شامل یک پره انعطاف‌پذیر عمودی و یک مانع استوانه‌ای را در اعداد رینولدز مختلف بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش ارتفاع پره انعطاف‌پذیر، بازده اختلاط در خروجی میکرومیکسر بهبود می‌یابد. همچنین، استفاده از این پره انعطاف‌پذیر نه تنها بازده اختلاط در خروجی را بهبود می‌بخشد، بلکه افت فشار را نیز در مقایسه با حالت پره صلب کاهش می‌دهد. لی و همکاران [۱۰] استفاده از یک جفت پره انعطاف‌پذیر را که به صورت عرضی به دیواره‌های کانال متصل شده‌اند، پیشنهاد کردند. آن‌ها این پره‌های دارای هدایت گرمایی را در یک پیکربندی متقارن به دیواره‌های کانال متصل کردند تا تأثیر این پره‌ها بر بهبود انتقال گرما را برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته، ارتفاع‌های کانال و اعداد رینولدز بررسی کنند. حضور این پره‌های متصل، میران انتقال گرما را ۱۸۵٪ و بازده گرمایی را ۱۰۶٪ نسبت به جریان پایه افزایش داد. ادیبی و همکاران [۱۱] نقش جداکننده منعطف لولایی در بهبود انتقال گرما و کاهش پسا در جریان پیرامون استوانه دایره‌ای بررسی نمودند. آنها نشان دادند که با استفاده از یک جداکننده منفرد می‌توان به عملکرد

بتر، صرفه‌جویی در انرژی و افزایش کارایی عملیاتی دست یافت و تأثیر تغییرات طول و زاویه جداکننده منفرد لولایی بر پارامترهای جریان در یک جریان دو بعدی تراکم‌ناپذیر پیرامون استوانه بررسی نمودند و تأثیر قابل توجه جداکننده منفرد بر آهنگ انتقال گرما و نیروی پسا را نشان دادند. داس و همکاران [۱۲] به بررسی انتقال گرما و افت فشار جریان پالسی داخل کانال در حضور پره‌های انعطاف‌پذیر نصب‌شده بر دیوار پرداخته‌اند. آنها دریافتند که استفاده از یک پره انعطاف‌پذیر در دیواره پایینی کانال منجر به عملکرد گرمایی بهتری در حدود ۱۰ درصد نسبت به کانال بدون پره ارائه می‌دهد. شوله و میتال [۱۳] نشان دادند که یک سیستم گرمایی با مولد گردابه انعطاف‌پذیر در مقایسه با سیستمی فاقد مولد گردابه، از نظر بهبود گرمایی در عدد رینولدز برابر با $Re=800$ به میزان ۲۵ درصد عملکرد بهتری دارد.

در این پژوهش، جریان نوسانی سیال در داخل یک کانال شامل مولدهای گرما مورد بررسی قرار گرفته است که قسمتی از دیواره‌های بالایی و پایینی این کانال تحت شرط مرزی گرمایی دما ثابت قرار گرفته‌اند. در داخل کانال، یک استوانه نصب شده است که در بالا و پایین آن دو پره انعطاف‌پذیر به عنوان مولد گردابه قرار دارند. جریان ورودی به کانال به صورت سینوسی تعریف شده است. این جریان ورودی سینوسی موجب نوسان پره‌های انعطاف‌پذیر شده و الگوهای جریان پیچیده‌ای ایجاد می‌کند که بر انتقال گرما تأثیرگذار است. هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر پارامترهای مختلف پره‌های انعطاف‌پذیر، شامل مدول الاستیسیته و ارتفاع پره‌ها بر روی آهنگ انتقال گرما در کانال است. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به بهبود طراحی سیستم‌های تبادل گرمایی در صنایع مختلف کمک کند و راهکارهای نوینی برای افزایش بازده گرمایی ارائه دهد. بررسی تأثیر مولدهای گردابه انعطاف‌پذیر بر جریان و انتقال گرمایی می‌تواند در کاربردهایی مانند مبدل‌های گرمایی، سیستم‌های تهویه مطبوع و فرآیندهای صنعتی که نیاز به کنترل دقیق دما دارند، مؤثر واقع شود.

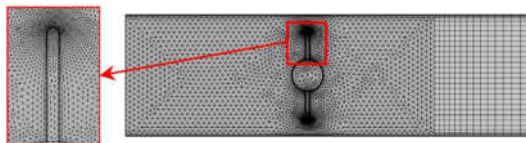
۲- مدل فیزیکی و معادلات حاکم

۲-۱- تعریف مساله و شرایط مرزی

در شکل ۱ هندسه مورد مطالعه نشان داده شده است که شامل یک کانال به طول ۱۶۰ mm و ارتفاع ۲۰ mm می‌باشد در فاصله ۳۰ میلی‌متری از ورودی کانال، یک استوانه با قطر ۵ mm قرار گرفته است که به عنوان یک جسم مانع در مسیر جریان عمل می‌کند. این استوانه، به دلیل ایجاد جدایش جریان و تولید گردابه‌ها، نقش کلیدی در برهم‌زدن جریان و تقویت اختلاط سیال ایفا می‌کند. برای بهره‌برداری بیشتر از این اثرات، دو پره انعطاف‌پذیر در بالا و پایین استوانه نصب شده‌اند. این پره‌ها به طول ۱ و با مدول الاستیسیته E طراحی شده‌اند و به دلیل خاصیت انعطاف‌پذیری خود، تحت تأثیر جریان سینوسی نوسان می‌کنند. جریان سیال ورودی به صورت سینوسی بوده و پروفیل آن بصورت $u(t)=0.04+0.03\sin(\pi t)$ می‌باشد. انتخاب جریان ورودی با پروفیل سینوسی در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی شرایطی است که باعث ایجاد نوسانات دوره‌ای و تقویت تولید گردابه در جریان می‌شود. این ویژگی باعث تقویت اختلاط سیال و افزایش آهنگ انتقال گرما در کانال می‌شود که در کاربردهای خنک‌کننده و تقویت انتقال گرما

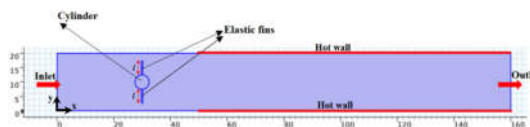
۲-۲- اعتبارسنجی روش عددی

در شکل ۲، شبکه‌بندی مورد استفاده در این تحقیق نمایش داده شده است و شبکه اطراف یک از پره‌ها از نمای نزدیک نشان داده شده است. این شبکه‌بندی با دقت طراحی شده تا ویژگی‌های پیچیده هندسه و شرایط جریان را به درستی شبیه‌سازی کند. همانطور که مشاهده می‌شود، در نزدیکی پره‌های انعطاف‌پذیر، از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شده است تا جزئیات دقیق‌تر جریان و تغییرات نوسانی پره‌ها با دقت بیشتری مدل‌سازی شود. این ریزشبهه در نواحی بحرانی که تغییرات سریع و پیچیده جریان رخ می‌دهد، اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا به شبیه‌سازی دقیق‌تر تعامل بین پره‌ها و جریان سیال کمک می‌کند. علاوه بر این، در مجاورت دیواره‌های کانال و بر روی پره‌ها، از مش لایه مرزی استفاده شده است. این نوع مش‌بندی برای بهبود دقت در مدل‌سازی جریان‌های نزدیک به دیواره و انتقال گرما در ناحیه مرزی اهمیت دارد. لایه مرزی به دلیل گرادیان‌های شدید سرعت و دما نیازمند دقت بالا در شبیه‌سازی است، به همین خاطر، استفاده از مش ریزتر در این نواحی ضروری است. با توجه به حضور پره‌های انعطاف‌پذیر و استفاده از روش تعامل سازه-سیال (FSI)، مش‌بندی مورد استفاده در این مطالعه از نوع مش دینامیکی انتخاب شده است. مفهوم مش‌بندی دینامیکی به معنای استفاده از یک شبکه محاسباتی است که به‌طور خودکار و در پاسخ به تغییرات هندسی و شرایط جریان تنظیم می‌شود. این نوع مش به‌گونه‌ای طراحی شده که قابلیت تغییر و تطبیق با تغییرات هندسی در طول زمان را داشته باشد. به عبارت دیگر، مش به‌طور پویا با حرکات و تغییر شکل‌های پره‌های انعطاف‌پذیر هماهنگ می‌شود و در هر لحظه از زمان، توزیع مناسبی از المان‌ها را حفظ می‌کند تا شبیه‌سازی دقیق‌تری از تعامل بین سیال و سازه صورت گیرد.



شکل ۲- شبکه‌بندی مورد استفاده.

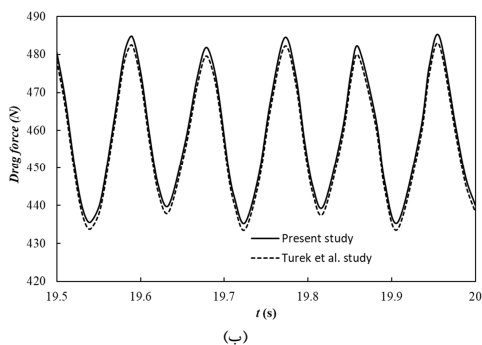
علاوه بر این، بررسی استقلال نتایج حل از شبکه‌بندی نیز صورت گرفته است. شکل ۳ تغییرات افت فشار و عدد ناسلت در داخل کانال در حضور پره‌های انعطاف‌پذیر به طول ۵ mm و با مدول الاستیسیته برابر با $E=2 \times 10^5 \text{ Pa}$ بر حسب زمان برای سه تعداد شبکه مختلف شامل ۹۸۷۴، ۱۳۹۶۶ و ۱۷۱۷۸ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد شبکه از ۱۳۹۶۶ به ۱۷۱۷۸، تغییر قابل‌توجهی در مقادیر مربوط به افت فشار و عدد ناسلت ایجاد نمی‌شود. بنابراین، شبکه با تعداد مش ۱۳۹۶۶ به عنوان شبکه معیار در مدل‌سازی حاضر انتخاب شده است.



شکل ۱- هندسه مورد مطالعه در کار حاضر.

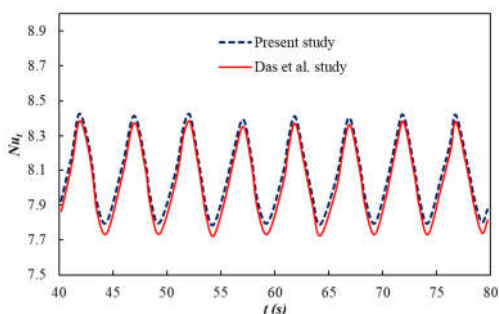
در مطالعه حاضر، از نرم‌افزار Comsol برای شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال گرما استفاده شده است. این نرم‌افزار به‌طور گسترده‌ای در تحلیل‌های چندفیزیکی به کار می‌رود و قابلیت‌های پیشرفته‌ای برای مدل‌سازی دینامیک سیالات و تعاملات سیال-جامد فراهم می‌آورد. برای انجام شبیه‌سازی این تحقیق از مدل دو بعدی استفاده شده است، زیرا این مدل در تحلیل رفتار جریان و انتقال گرما در کانال با پره‌های انعطاف‌پذیر کارآمد و مناسب است و پیچیدگی محاسباتی کمتری نسبت به مدل سه‌بعدی دارد. شبیه‌سازی دو بعدی می‌تواند با هزینه محاسباتی کمتر، نتایج قابل‌قبولی برای تحلیل پدیده‌های اصلی مانند نوسانات پره‌ها، گردابه‌سازی و تأثیر آن‌ها بر انتقال گرما و افت فشار ارائه دهد. علاوه بر این، به دلیل تقارن و عدم وجود تغییرات قابل‌توجه در جهت عمود بر صفحه‌ی جریان، مدل‌سازی دو بعدی می‌تواند اطلاعات کافی برای دستیابی به اهداف تحقیق فراهم کند. همچنین جریان سیال بصورت تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده و خواص فیزیکی سیال بصورت ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

به دلیل اینکه پروفیل جریان سیال در ورودی کانال بصورت سینوسی می‌باشد، به همین خاطر پره‌های انعطاف‌پذیر (الاستیک) به نوسان درآمده و به عنوان مولد گردابه عمل می‌کنند. این گردابه‌ها به تقویت اختلاط سیال و افزایش آهنگ انتقال گرما از سطوح کانال منجر می‌شوند. دیواره بالایی و دیواره پایینی کانال به فاصله ۵۰ mm از ابتدای کانال تا انتهای کانال تحت شرط مرزی دما ثابت $T_{\text{wall}}=352 \text{ K}$ قرار گرفته‌اند. دمای سیال ورودی نیز برابر $T_{\text{inlet}}=293 \text{ K}$ می‌باشد. خروجی کانال نیز تحت شرط مرزی جوی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، تمرکز اصلی بر تحلیل رفتار هیدرودینامیکی و انتقال گرما جریان سیال در داخل کانال است، به ویژه در شرایطی که پره‌های انعطاف‌پذیر در حضور یک استوانه به عنوان مولدهای گردابه عمل می‌کنند. بررسی تأثیرات این پره‌ها بر انتقال گرما از دیواره‌های گرم کانال، یکی از اهداف کلیدی این مطالعه است. از طریق مدل‌سازی و شبیه‌سازی دقیق، می‌توان به درک عمیق‌تری از مکانیزم‌های کنترل جریان و انتقال گرما در سیستم‌های مشابه دست یافت. این مطالعه همچنین می‌تواند به توسعه روش‌های نوین در بهبود راندمان گرمایی سیستم‌ها از طریق استفاده از پره‌های انعطاف‌پذیر و مولدهای گردابه کمک کند. لازم بذکر است که در کار حاضر، آب به عنوان سیال کاری استفاده شده است که دارای چگالی 997 kg/m^3 ، لزجت دینامیکی $0.00089 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ، رسانایی گرمایی $0.607 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ و گرمای ویژه $4182 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ می‌باشد. خواص فیزیکی مربوط به حوزه جامد (پره‌های الاستیک) هم شامل چگالی برابر با 2500 kg/m^3 و نسبت پواسون برابر 0.48 می‌باشد.



شکل ۴- نتایج حاصل از بکارگیری مدل عددی حاضر و کار تورک و همکاران [۱۴]: (الف) نیروی لیفت، (ب) نیروی پسا.

به منظور تضمین صحت مدل و روش عددی به کار رفته در این تحقیق، اعتبارسنجی دیگری با مطالعه داس و همکاران [۱۲] انجام شده است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، تغییرات زمانی عدد ناسلت به‌دست‌آمده بر روی دیواره گرم پایینی در کانال حاوی پره انعطاف‌پذیر، تطابق مناسبی با داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی حاضر دارد.



شکل ۵- نتایج حاصل از بکارگیری روش عددی حاضر و کار داس و همکاران [۱۲].

۲-۳- معادلات حاکم

۲-۳-۱- برای حوزه سیال

معادلات حاکم بر جریان سیال به شرح زیر هستند:

معادله پیوستگی:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتم:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + ((U - U_m) \cdot \nabla)U = \nu \nabla^2 U - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (2)$$

معادله انرژی:

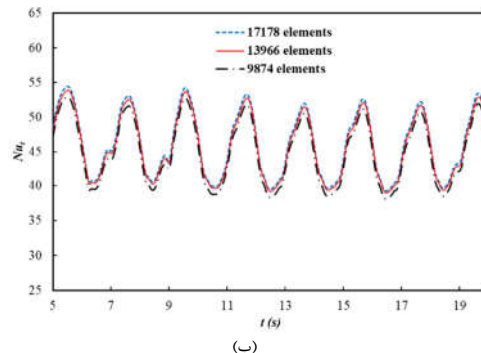
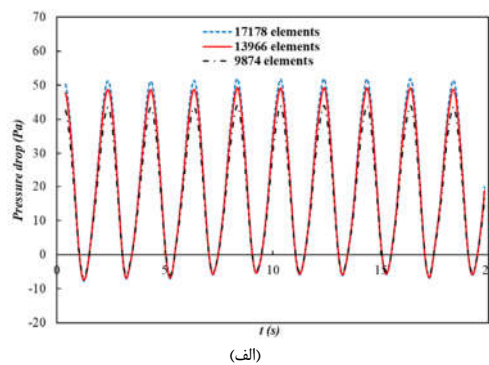
$$\frac{\partial T}{\partial t} + (U - U_m) \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T \quad (3)$$

که در آن U بردار سرعت سیال، U_m سرعت مش، P فشار جریان سیال، T دما، ρ چگالی سیال، ν لزجت سینماتیکی، α پخشندگی گرمایی و t زمان را نشان می‌دهد.

۲-۳-۲- برای حوزه جامد

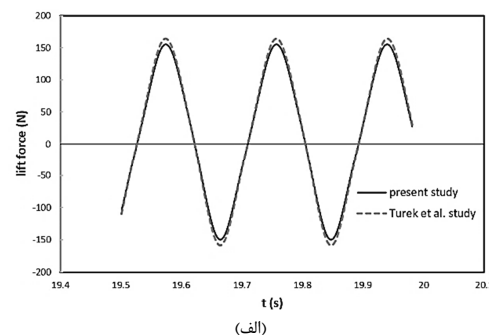
معادله حرکت برای جامد (دیوار الاستیک) به صورت زیر است:

$$\rho_s \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} = \nabla \cdot FS \quad (4)$$



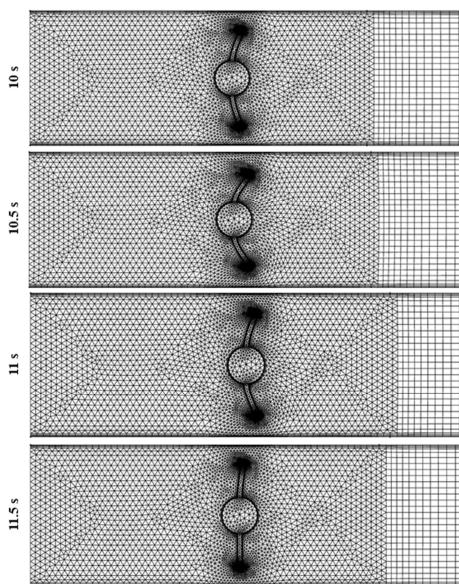
شکل ۳- استقلال حل از شبکه برای: (الف) افت فشار، (ب) عدد ناسلت.

برای بررسی صحت روش عددی مورد استفاده در مطالعه حاضر، نتایج به‌دست‌آمده با نتایج مطالعه تورک و همکاران [۱۴] مقایسه شده است. این نتایج شامل جریان لایه‌ای و تراکم‌ناپذیر در کانالی است که در اطراف یک جسم الاستیک حرکت می‌کند و منجر به نوسانات خودتحریکی سازه می‌شود. مطالعه تورک و همکاران [۱۴] به عنوان مرجع اعتبارسنجی انتخاب شده است زیرا هر دو مطالعه حاضر و مطالعه تورک و همکاران به اثرات جریان بر روی پره‌های انعطاف‌پذیر پرداخته‌اند. این اشتراک موضوعی به ما این امکان را می‌دهد که نتایج تحقیق خود را در زمینه مشابهی بررسی کنیم و از این رو، اعتبار نتایج را افزایش دهیم. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تغییرات نیروی لیفت و نیروی پسا بر روی دیوار الاستیک که با روش عددی حاضر به‌دست آمده است، با نتایج مطالعه تورک و همکاران [۱۴] مطابقت مناسبی دارد.



کلیدی در رفتار جریان و پره‌های انعطاف‌پذیر را فراهم می‌سازد، که این امر برای ارائه نتایج قابل اطمینان و دقیق از اهمیت بالایی برخوردار است.

لازم بذکر است که عدد رینولدز ورودی مورد استفاده در این مطالعه در حدود ۹۰۰ است. این عدد رینولدز، برای هندسه کانال و شرایط جریان داده شده، در محدوده جریان لایه‌ای قرار می‌گیرد. ما با انجام یک بررسی جامع‌تر بر روی میدان جریان، شامل توزیع‌های دقیق سرعت و فشار، در شبیه‌سازی‌های دوبعدی و لایه‌ای خود، به حضور جداشدگی موضعی جریان در پشت سیلندر و پره‌های انعطاف‌پذیر پی بردیم. با این حال، جریان عمدتاً در محدوده لایه‌ای باقی مانده و هیچ نشانه‌ای از نوسانات آشفتگی با مقیاس بزرگ یا تشکیل ساختارهای جریان انتقالی یا آشفته مشاهده نشد و جریان در طول کانال تقریباً در حالت لایه‌ای باقی می‌ماند.



شکل ۶- تغییرات شبکه در طول زمان.

شکل ۷ کانتور سرعت جریان در داخل کانال مورد مطالعه را در زمان‌های مختلف ۰.۵ s، ۱.۰۵ s، ۱.۱ s، ۱۱.۵ s و ۱۲ s برای حالتی که طول پره‌های الاستیک برابر با ۵ mm و مدول الاستیسیته آن‌ها برابر با $E = 2 \times 10^5 Pa$ است، به تصویر می‌کشد. این شکل نشان‌دهنده تغییرات کانتور سرعت جریان در کانال در طول یک پرورد کامل (۲ ثانیه) است و به وضوح رفتار پره‌های انعطاف‌پذیر و تأثیر آن‌ها بر جریان سیال را در این بازه زمانی به نمایش می‌گذارد. به دلیل سینوسی بودن پروفیل جریان سیال ورودی، پره‌های انعطاف‌پذیر به نوساناتی هماهنگ با تغییرات جریان ورودی وا داشته می‌شوند. این نوسانات پره‌ها نه تنها بر کانتور سرعت جریان در نواحی نزدیک به آن‌ها تأثیر می‌گذارد، بلکه الگوهای جریان در کل کانال را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. با تغییر زمان و حرکت پره‌ها، الگوهای جریان و کانتور سرعت در طول کانال تغییر می‌کند، که این امر نشان‌دهنده تعامل پیچیده بین جریان سیال و پره‌های انعطاف‌پذیر است. در ابتدای دوره، پره‌ها در یک وضعیت مشخص قرار دارند که با گذشت زمان و تحت تأثیر نیروی سیال، به تدریج به موقعیت‌های جدیدی منتقل می‌شوند. این جابجایی‌ها و

که در آن d جابجایی جامد، F تانسور گرادیان تغییر شکل و S تانسور تنش را نشان می‌دهد. تانسورهای F و S به شرح زیر تعریف می‌شوند:

$$F = I + \nabla d \quad (5)$$

$$S = 2 \frac{\partial W}{\partial C} \quad (6)$$

که در آن I تانسور واحد است، W تابع چگالی انرژی تغییر شکل است و C تانسور تغییر شکل کوشی-گرین است.

عدد ناسلت محلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Nu_{x,t} = - \frac{1}{T_h - T_{inlet}} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{hot\ surface} \quad (7)$$

لازم بذکر است که گرادیان دما $\frac{\partial T}{\partial n}$ در راستای عمود بر سطح گرم توسط نرم‌افزار Comsol محاسبه می‌گردد. برای به دست آوردن عدد ناسلت میانگین مکانی، لازم است که عدد ناسلت محلی در طول دیواره گرم را با استفاده از فرمول زیر انتگرال‌گیری شود:

$$Nu_t = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_{x,t} dx \quad (8)$$

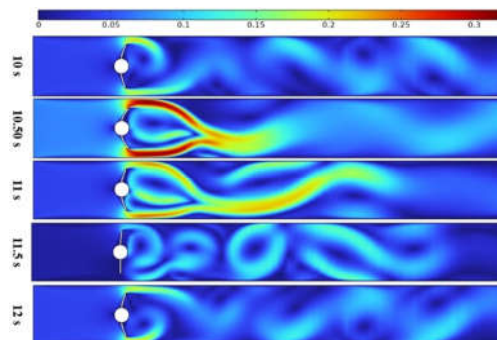
۲-۴- روش حل عددی

حل عددی در این مطالعه شامل کاربرد روش المان محدود همراه با تکنیک لاگرانژی-اولری دلخواه (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) یا به اختصار روش ALE برای حل معادلات حاکم پیچیده، غیرخطی و وابسته به یکدیگر است. روش المان محدود به دلیل توانایی‌اش در مدیریت هندسه‌های پیچیده و شکل‌های نامنظم انتخاب شده است. روش لاگرانژی-اولری دلخواه برای تقریب زدن معادلات حاکم در حوزه‌های مرزی متحرک و ثابت به کار گرفته شده است. با ترکیب روش‌های لاگرانژی و اولری، روش ALE اجازه می‌دهد تا نقاط مش محاسباتی حرکت کنند، ثابت بمانند یا به صورت دلخواه حرکت کنند و به طور مؤثر تعامل بین دیواره قابل تغییر شکل و سیال را به تصویر بکشند. در حل عددی و برای بهبود پایداری، از روش کاملاً کوپل‌شده‌ای استفاده می‌شود که در آن تمام معادلات به صورت همزمان حل می‌شوند، زیرا استفاده از حل‌کننده‌های مجزا منجر به عدم همگرایی می‌شود. اگرچه معادلات کاملاً کوپل‌شده به حافظه محاسباتی بیشتری نیاز دارند، اما پایداری حل را تضمین می‌کنند.

۳- نتایج و بحث

در شکل ۶، تغییرات مش در طول زمان برای حالتی که هندسه شامل دو پره انعطاف‌پذیر به طول ۵ mm و مدول الاستیکی برابر با $Pa \times 10^4 = 5$ می‌باشد، نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که چگونه مش دینامیکی به تغییرات زمانی پاسخ می‌دهد و با تغییر شکل پره‌ها و جریان سیال، به طور مداوم تنظیم می‌شود تا دقت مدل‌سازی حفظ گردد. این توانایی مش دینامیکی برای انطباق با تغییرات هندسی، کلید موفقیت در مدل‌سازی مسائل پیچیده‌ای مانند این تحقیق است، که در آن تعاملات سازه و سیال به طور همزمان بر یکدیگر تأثیر می‌گذارد. با استفاده از این شبکه‌بندی دقیق و روش مش دینامیکی، تحقیق حاضر قادر است تا رفتار واقعی سیستم را به طور کامل مدل‌سازی کند و نتایج به دست آمده از آن به تحلیل دقیق‌تر پدیده‌های هیدرودینامیکی و انتقال گرما کمک شایانی خواهد کرد. این رویکرد بهینه در شبکه‌بندی و مدل‌سازی، امکان بررسی جزئیات مهم و

تغییرات در موقعیت پره‌ها، موجب ایجاد نوساناتی در سرعت جریان و شکل‌گیری گردابه‌ها و مناطق با سرعت‌های متفاوت در کانال می‌شود. در زمان‌های میانی دوره، پره‌ها به اوج نوسانات خود نزدیک می‌شوند که این امر منجر به تغییرات شدیدتری در کانتور سرعت می‌شود. با نزدیک شدن به انتهای دوره، پره‌ها دوباره به وضعیت اولیه خود نزدیک می‌شوند، و کانتور سرعت جریان نیز به تدریج به حالت اولیه خود بازمی‌گردد. این رفتار دوره‌ای در نوسانات پره‌ها و تغییرات کانتور سرعت نشان‌دهنده تعاملات پیچیده بین پره‌های انعطاف‌پذیر و جریان سیال عبوری است که در یک چرخه تکرار می‌شود.

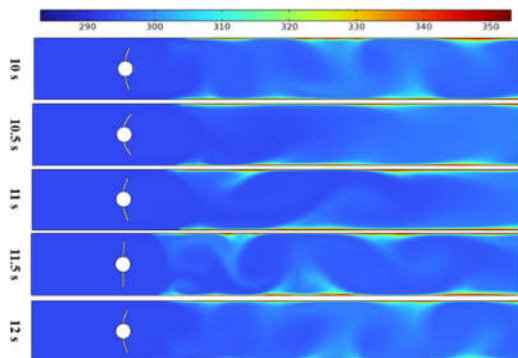


شکل ۷- کانتور سرعت جریان در داخل کانال مورد مطالعه در زمان‌های مختلف برای طول پره‌های الاستیک برابر با ۵ میلی‌متر و مدول الاستیسیته برابر با $E=2 \times 10^5 Pa$.

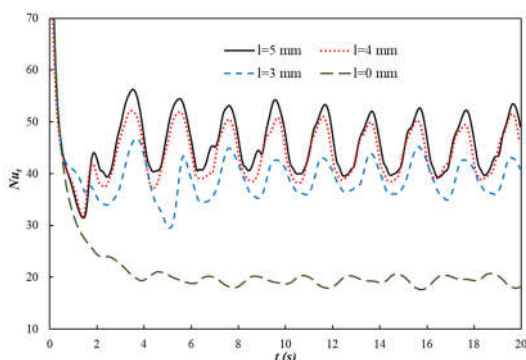
شکل ۸ کانتور دما در داخل کانال مورد مطالعه را در زمان‌های مختلف ۱۰ s، ۱۰.۵ s، ۱۱ s، ۱۱.۵ s، ۱۲ s برای حالتی که طول پره‌های الاستیک برابر با ۵ mm و مدول الاستیسیته آن‌ها برابر با $E=2 \times 10^5 Pa$ است، به تصویر می‌کشد. این نوسانات دمایی در کانال نشان‌دهنده تأثیرات پره‌های انعطاف‌پذیر بر توزیع دما در طول کانال است. پره‌ها با نوسانات خود باعث افزایش اختلاط و انتقال گرما در سیال می‌شوند که به تغییرات قابل ملاحظه‌ای در کانتور دما در طول زمان منجر می‌شود.

شکل ۹ تغییرات زمانی عدد ناسلت بر روی صفحات گرم برای طول‌های مختلف پره‌های انعطاف‌پذیر برابر با ۴، ۳، ۰، ۴ و ۵ میلی‌متر و برای مدول الاستیسیته برابر با $E=2 \times 10^5 Pa$ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود عدد ناسلت متوسط بر روی صفحات گرم بر حسب زمان بصورت مرتب افزایش و کاهش می‌یابد. این نوسانات منظم به دلیل پروفیل سینوسی جریان سیال ورودی است که باعث ایجاد تغییرات دوره‌ای در الگوی جریان و در نتیجه تغییرات در آهنگ انتقال گرما می‌شود. بعلاوه، همانطور که مشاهده می‌شود با اضافه شدن پره و افزایش طول پره‌های انعطاف‌پذیر، عدد ناسلت متوسط بر روی دیواره‌های گرم افزایش می‌یابد. این افزایش به این دلیل است که پره‌های بلندتر قادرند جریان سیال را به طور مؤثرتری به سمت دیواره‌های گرم هدایت کنند. این هدایت مؤثر باعث می‌شود که جریان سیال در نزدیکی دیواره‌های گرم متمرکزتر شود و در نتیجه، سرعت جریان در این نواحی افزایش یابد. افزایش سرعت جریان در مجاورت دیواره‌ها باعث بهبود انتقال گرما از دیواره‌ها به سیال می‌شود، که به صورت افزایش عدد ناسلت نمایان می‌گردد. علاوه بر این، نوسانات

منظم در عدد ناسلت نشان‌دهنده تعامل پیچیده بین جریان سیال و پره‌های انعطاف‌پذیر است. این پره‌ها با نوسان خود گردابه‌هایی در جریان ایجاد می‌کنند که به تقویت اختلاط سیال و افزایش آهنگ انتقال گرما کمک می‌کند.

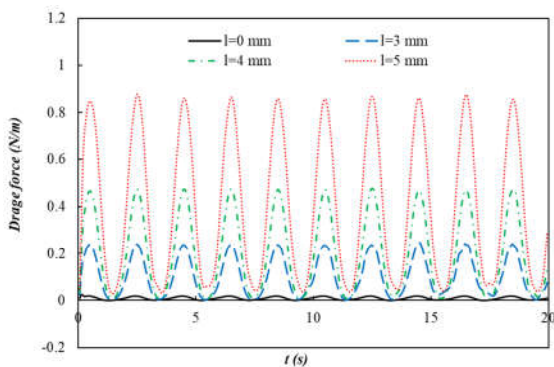


شکل ۸- کانتور دما در داخل کانال مورد مطالعه در زمان‌های مختلف برای طول پره‌های الاستیک برابر با ۵ mm و مدول الاستیسیته برابر با $E=2 \times 10^5 Pa$.



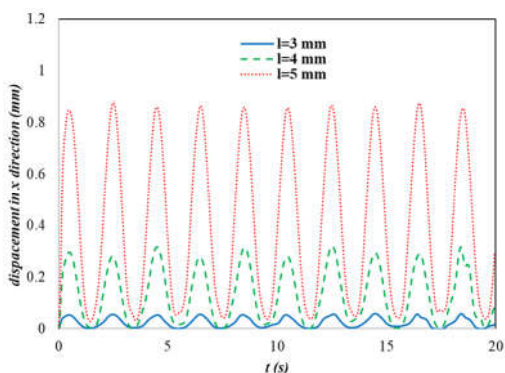
شکل ۹- تغییرات زمانی عدد ناسلت بر روی صفحات گرم برای طول‌های مختلف پره‌های انعطاف‌پذیر.

شکل ۱۰ تغییرات افت فشار بوجود آمده در داخل کانال مورد مطالعه را برای طول‌های مختلف پره‌های انعطاف‌پذیر برابر با ۴، ۳، ۰ و ۵ میلی‌متر و برای مدول الاستیسیته برابر با $E=2 \times 10^5 Pa$ در طول زمان نشان می‌دهد. این نمودار به وضوح نشان‌دهنده نوسانات سینوسی افت فشار در کانال برحسب زمان است که به دلیل پروفیل سینوسی جریان ورودی، افت فشار در طول کانال به صورت دوره‌ای افزایش و کاهش می‌یابد. این رفتار نوسانی، به دلیل تأثیر مستقیم پروفیل جریان ورودی بر توزیع فشار در داخل کانال است. همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، با اضافه شدن پره‌های انعطاف‌پذیر و افزایش طول آن‌ها، افت فشار در کانال به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این افزایش افت فشار به دلیل افزایش مقاومت هیدرودینامیکی ناشی از حضور پره‌ها و تغییراتی است که در الگوی جریان ایجاد می‌کنند. پره‌های طولانی‌تر با ایجاد اختلالات بیشتر در جریان سیال، موجب افزایش مقاومت در برابر جریان و در نتیجه افزایش افت فشار می‌شوند.



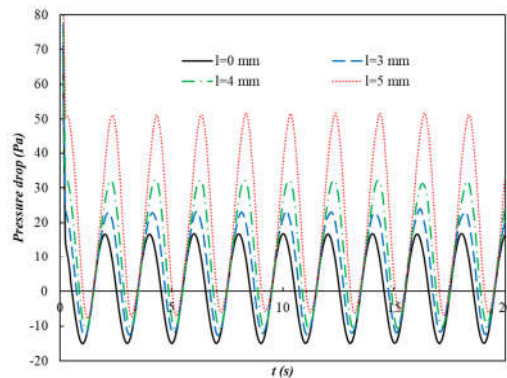
شکل ۱۱- تغییرات زمانی نیروی پسا وارده بر مجموعه سیلندر و پره های انعطاف پذیر برای طول های مختلف پره های انعطاف پذیر.

شکل ۱۲ تغییرات زمانی جابجایی نوک انتهایی پره های انعطاف پذیر در راستای محور x را برای طول های مختلف پره های انعطاف پذیر برابر با ۴، ۳، ۰ و ۵ میلی متر و برای مدول الاستیسته برابر $E=2 \times 10^5 Pa$ در طول زمان نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش طول پره های انعطاف پذیر، میزان جابجایی نوک انتهایی پره های انعطاف پذیر در راستای محور x افزایش می یابد. پره های طولانی تر به دلیل طول بیشتر و انعطاف پذیری بالاتر، تحت تأثیر نیروهای جریان سیال به خصوص نوسانات ناشی از جریان سینوسی، نوسانات بیشتری را تجربه می کنند. این نوسانات منجر به جابجایی های بزرگتر در نوک انتهایی پره ها می شود. جابجایی نوک انتهایی پره ها در راستای محور x نیز نشان دهنده تأثیرات مستقیم طول پره بر الگوی جریان و نیروهای وارده از سوی سیال است. پره های بلندتر، بیشتر در معرض نیروهای دینامیکی قرار می گیرند که این امر باعث افزایش دامنه جابجایی نوک پره ها می شود. این جابجایی های بزرگتر می توانند تأثیرات قابل توجهی بر رفتار دینامیکی کل سیستم و برهم کنش های پیچیده تر بین پره ها و جریان سیال داشته باشند. علاوه، افزایش جابجایی نوک انتهایی پره ها با طول بیشتر، می تواند منجر به تغییر در نحوه ایجاد گردابه ها و الگوهای جریان در اطراف پره ها شود. این تغییرات نه تنها بر جابجایی پره ها اثر می گذارند، بلکه می توانند تأثیرات مهمی بر انتقال گرما و افت فشار در سیستم نیز داشته باشند.



شکل ۱۲- تغییرات زمانی جابجایی نوک انتهایی پره های انعطاف پذیر در راستای محور x برای طول های مختلف پره های انعطاف پذیر.

شکل ۱۳ تغییرات عدد ناسلت متوسط زمانی و مکانی بر روی دیواره

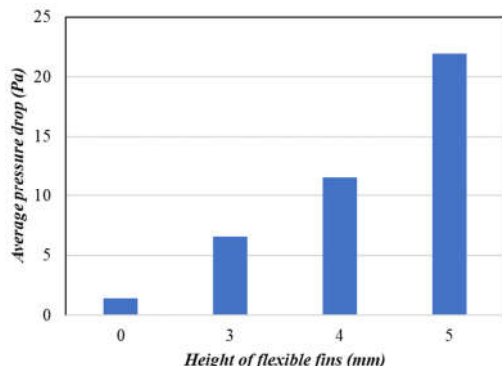


شکل ۱۰- تغییرات افت فشار بوجود آمده در داخل کانال برای طول های مختلف پره های انعطاف پذیر

شکل ۱۱، تغییرات زمانی نیروی پسا وارده بر مجموعه سیلندر و پره های انعطاف پذیر را برای طول های مختلف پره های انعطاف پذیر برابر با ۴، ۳، ۰ و ۵ میلی متر و برای مدول الاستیسته برابر $E=2 \times 10^5 Pa$ در طول زمان نشان می دهد. این نمودار نشان دهنده تأثیر طول پره ها بر نیروی پسا وارد بر سیستم است. با افزایش طول پره های الاستیک، نیروی پسا به طور چشمگیری افزایش می یابد، که این موضوع به دلیل افزایش سطح تماس پره ها با جریان سیال و همچنین تغییرات ایجاد شده در الگوی جریان اطراف مجموعه استوانه و پره ها است. پره های طولانی تر با افزایش سطح مقطع موثر در برابر جریان سیال، مقاومت بیشتری در مقابل حرکت سیال ایجاد می کنند که این امر منجر به افزایش نیروی پسا می شود. علاوه بر این، پره های انعطاف پذیر با طول های بیشتر، باعث ایجاد گردابه ها و ناپایداری های بیشتری در جریان سیال می شوند. این ناپایداری ها و گردابه ها، با ایجاد جریان های بازگشتی و نواحی با فشار پایین در پشت پره ها، به طور مؤثری نیروی پسا را افزایش می دهند. نیروی پسا وارد بر مجموعه سیلندر و پره ها نه تنها به افزایش طول پره ها وابسته است، بلکه به رفتار دینامیکی پره های انعطاف پذیر نیز مرتبط است. پره های انعطاف پذیر به دلیل نوسانات خود تحت تأثیر جریان، به طور مداوم در حال تغییر شکل هستند که این امر منجر به تغییر در الگوی جریان اطراف پره ها و در نتیجه تغییرات متناوب در نیروی پسا می شود.

لازم بذکر است که در بسیاری از سیستم های صنعتی، مانند مبادله کن های گرمایی و سیستم های سرمایشی و گرمایشی، افزایش نیروی پسا می تواند منجر به افزایش مصرف انرژی شود. این امر به ویژه در سیستم هایی که نیاز به پمپ ها یا فن های قوی تر برای حفظ جریان دارند، می تواند هزینه های عملیاتی را افزایش دهد.

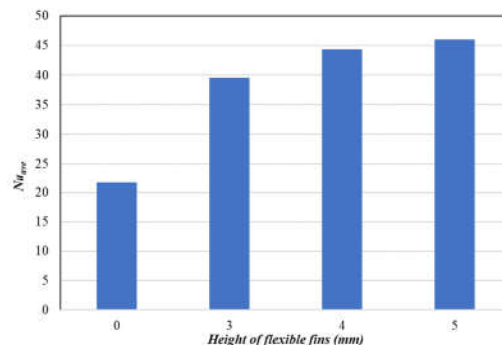
افزایش بیشتری در افت فشار می‌شود. در نهایت، برای پره‌هایی به طول ۵ mm، افت فشار متوسط زمانی به مقدار ۲۱،۹۴ پاسکال می‌رسد. این مقدار بالاترین افت فشار را در میان شرایط مورد مطالعه نشان می‌دهد و بیانگر تأثیر قابل توجه پره‌های بلندتر بر افزایش مقاومت در برابر جریان سیال است.



شکل ۱۴- تغییرات افت فشار متوسط زمانی در داخل کانال مورد مطالعه برای طول‌های مختلف پره‌های انعطاف‌پذیر.

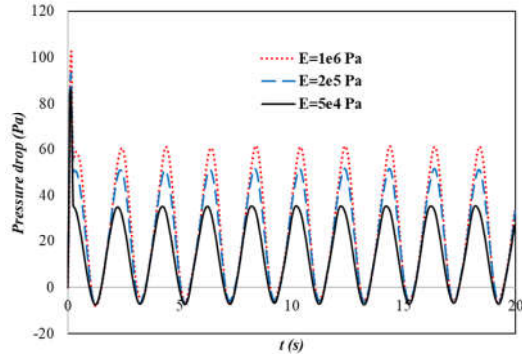
برای ارزیابی جامع عملکرد کلی سیستم، پارامتری به نام ضریب عملکرد گرمایی تعریف می‌شود که در برگزیده تغییرات هم‌زمان در آهنگ انتقال گرما (از طریق عدد ناسلت) و افت فشار در کانال مورد بررسی است. فرمول نسبت عملکرد گرمایی بصورت $\eta = \left(\frac{Nu}{Nu_0}\right) / \left(\frac{dP}{dP_0}\right)^{1/3}$ تعریف می‌شود که Nu و Nu_0 به ترتیب نشان‌دهنده عدد ناسلت سیستم با پره‌های انعطاف‌پذیر و بدون پره‌های انعطاف‌پذیر هستند. dP و dP_0 نیز به ترتیب بیانگر افت فشار در سیستم با و بدون پره‌های انعطاف‌پذیر هستند. نتایج محاسبه‌ی این شاخص برای پره‌های انعطاف‌پذیر با طول‌های مختلف (۳، ۴ و ۵ میلی‌متر) به ترتیب برابر با ۱،۱، ۱،۰۲ و ۰،۸۶ محاسبه شده است که در شکل ۱۵ نیز مقادیر این شاخص برای طول‌های مختلف پره‌ها آورده شده است. این نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که استفاده از پره‌های انعطاف‌پذیر در طول‌های مشخص، بهبود عملکرد گرمایی سیستم را به همراه دارد، اما این بهبود برای طول‌های بزرگ‌تر از ۴ mm کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان عملکرد بهبود یافته را در محدوده‌ای از طول پره‌های ۳ و ۴ میلی‌متر مشاهده کرد، که برای آن‌ها مقدار η بزرگتر از ۱ محاسبه شده است. این مقادیر در شکل ۱۴ نمایش داده شده‌اند و نشان می‌دهند که استفاده از پره‌های انعطاف‌پذیر، با توجه به مقادیر مناسب ضریب عملکرد، می‌تواند به بهبود کلی عملکرد گرمایی سیستم کمک کند.

های گرم کانال مورد مطالعه برای حالتی که طول پره‌های الاستیک برابر با ۵ mm و مدول الاستیسیته آن‌ها برابر با $E=2 \times 10^5$ Pa می‌باشد، نشان داده شده است. این شکل تأثیر وجود پره‌های انعطاف‌پذیر و طول آن‌ها بر بهبود انتقال گرما در کانال را نمایش می‌دهد. در حالت پایه که پره انعطاف‌پذیر وجود ندارد، عدد ناسلت متوسط زمانی و مکانی برابر با ۲۱،۶۷ است. این مقدار نشان‌دهنده میزان انتقال گرما در شرایطی است که هیچ تداخلی از سوی پره‌ها در جریان سیال ایجاد نمی‌شود. با اضافه شدن پره‌های انعطاف‌پذیر به کانال، این عدد به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود قابل توجه انتقال گرما در حضور پره‌ها است. به طور خاص، برای پره‌هایی به طول ۳ mm، عدد ناسلت متوسط به ۳۹،۵۶ افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل تحریک بیشتر جریان و ایجاد گردابه‌های قوی‌تر در اثر تعامل پره‌ها با جریان سیال است که باعث افزایش آهنگ انتقال گرما از دیواره‌های گرم می‌شود. با افزایش طول پره‌ها به ۴ mm، عدد ناسلت متوسط به ۴۴،۳۱ می‌رسد، که این امر نشان‌دهنده تأثیر بیشتر طول پره‌ها بر تقویت جریان و افزایش انتقال گرما است. در نهایت، برای طول پره ۵ mm، عدد ناسلت متوسط به مقدار ۴۶،۰۴ می‌رسد که بالاترین مقدار در میان شرایط مورد مطالعه است. این افزایش نشان‌دهنده این است که پره‌های طولانی‌تر با ایجاد اختلالات بیشتر در جریان سیال و افزایش سطح تماس با جریان، آهنگ انتقال گرما را به طور مؤثرتری افزایش می‌دهند.



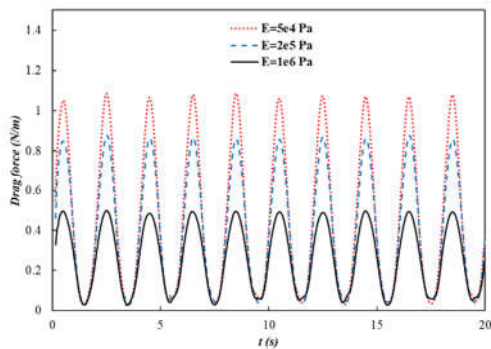
شکل ۱۳- تغییرات عدد ناسلت متوسط زمانی و مکانی بر روی دیواره های گرم کانال برای طول‌های مختلف پره‌های انعطاف‌پذیر.

در شکل ۱۴ تغییرات افت فشار متوسط زمانی در داخل کانال مورد مطالعه برای حالتی که طول پره‌های الاستیک برابر با ۵ mm و مدول الاستیسیته آن‌ها برابر با $E=2 \times 10^5$ Pa می‌باشد، نشان داده شده است. برای حالتی که پره انعطاف‌پذیر نداریم مقدار تغییرات افت فشار متوسط زمانی برابر ۱،۴۳ پاسکال می‌باشد. با افزودن پره‌های انعطاف‌پذیر به سیستم، افت فشار به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. برای پره‌هایی به طول ۳ mm، افت فشار متوسط زمانی به ۶،۵۵ پاسکال می‌رسد. این افزایش به دلیل ایجاد موانع بیشتر در مسیر جریان و تغییرات در الگوی جریان سیال است که منجر به ایجاد نواحی با فشار پایین‌تر در مجاورت پره‌ها و افزایش مقاومت در برابر جریان سیال می‌شود. با افزایش طول پره‌ها به ۴ mm، افت فشار متوسط زمانی به ۱۱،۶۰ پاسکال افزایش می‌یابد. طول بیشتر پره‌ها به معنای سطح تماس بزرگتر با جریان سیال و ایجاد مقاومت بیشتر در برابر حرکت سیال است، که این امر باعث



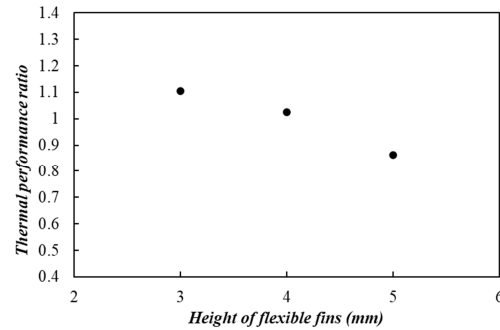
شکل ۱۷- تغییرات زمانی افت فشار در داخل کانال برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته پره‌های الاستیک.

شکل ۱۸ تغییرات نیروی پسا وارد بر مجموعه سیلندر و پره‌های انعطاف‌پذیر را برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته برابر با Pa 5×10^4 ، 2×10^5 و 1×10^6 برای پره‌های الاستیک به طول 5 mm در طول زمان نشان می‌دهد. با افزایش مدول الاستیسیته پره‌های الاستیک، نیروی پسا به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل کاهش انعطاف‌پذیری پره‌ها و تبدیل آن‌ها به موانعی سخت‌تر در برابر جریان سیال است. با افزایش سختی پره‌ها، نوسانات آن‌ها کمتر شده و پره‌ها به طور موثرتری در برابر جریان مقاومت می‌کنند. این مقاومت بیشتر باعث ایجاد اختلالات قوی‌تر در جریان سیال و افزایش نیروهای مقاومتی، یعنی پسا، می‌شود.



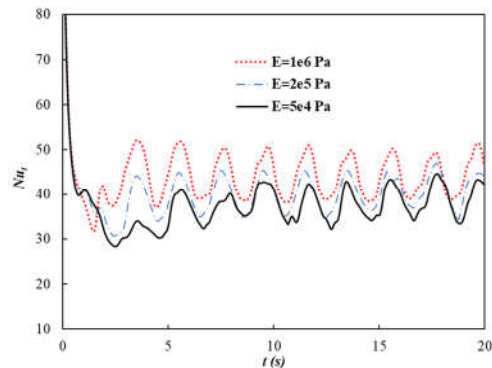
شکل ۱۸- تغییرات زمانی نیروی پسا وارد بر مجموعه سیلندر و پره‌های انعطاف‌پذیر را برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته پره‌های الاستیک.

شکل ۱۹ تغییرات زمانی جابجایی نوک انتهایی پره‌های انعطاف‌پذیر در راستای محور x را برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته برابر با Pa 5×10^4 ، 2×10^5 و 1×10^6 برای پره‌های الاستیک به طول 5 mm در طول زمان نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مدول الاستیسیته پره‌های الاستیک، میزان جابجایی نوک انتهایی پره‌های انعطاف‌پذیر در راستای محور x کاهش می‌یابد. این کاهش جابجایی به این دلیل است که با افزایش مدول الاستیسیته، پره‌ها سخت‌تر و کمتر انعطاف‌پذیر می‌شوند. پره‌های با مدول الاستیسیته بالاتر مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل دارند و در نتیجه کمتر تحت تأثیر نیروهای ناشی از جریان سیال قرار می‌گیرند.



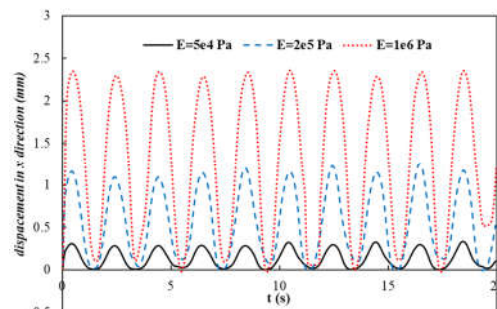
شکل ۱۵- تغییرات مقدار نسبت عملکرد گرمایی با بکارگیری پره‌های انعطاف‌پذیر با طول‌های مختلف.

شکل ۱۶ تغییرات زمانی عدد ناسلت بر روی صفحات گرم برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته برابر با Pa 5×10^4 ، 2×10^5 و 1×10^6 برای پره‌های الاستیک به طول 5 mm می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش مدول الاستیسیته پره‌ها، مقدار عدد ناسلت بر روی صفحات گرم به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش را می‌توان به تأثیر مستقیم سخت‌تر شدن پره‌ها بر رفتار جریان سیال در نزدیکی دیواره‌های گرم نسبت داد. با افزایش مدول الاستیسیته، پره‌ها از حالت انعطاف‌پذیری کمتر برخوردار شده و در مقابل نوسانات ناشی از جریان سیال مقاومت بیشتری نشان می‌دهند. این مقاومت بیشتر، باعث می‌شود که جریان سیال با سرعت بیشتری در مجاورت دیواره‌های گرم حرکت کند.



شکل ۱۶- تغییرات زمانی عدد ناسلت بر روی صفحات گرم برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته پره‌های الاستیک.

شکل ۱۷ تغییرات زمانی افت فشار در داخل کانال برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته برابر با Pa 5×10^4 ، 2×10^5 و 1×10^6 برای پره‌های الاستیک به طول 5 mm می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مدول الاستیسیته پره‌های الاستیک متصل بر روی سیلندر استوانه‌ای، عدد ناسلت متوسط بر روی دیواره‌های گرم افزایش می‌یابد. با افزایش مدول الاستیسیته پره‌های الاستیک، مقدار افت فشار در داخل کانال به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش افت فشار به دلیل افزایش سختی پره‌ها و کاهش نوسانات آن‌ها است که منجر به ایجاد مقاومت بیشتر در برابر جریان سیال می‌شود. در واقع، با سخت‌تر شدن پره‌ها، تغییر شکل کمتری رخ می‌دهد و پره‌ها به عنوان موانع سخت‌تری در مسیر جریان سیال عمل می‌کنند. این امر باعث افزایش افت فشار جریان در داخل کانال می‌شود.



شکل ۱۹- تغییرات زمانی جابجایی نوک انتهای پره های انعطاف پذیر در راستای محور X را برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته پره های الاستیک.

لازم بذکر است که مساله حاضر با هدف بهبود انتقال گرما و کنترل الگوی جریان در سیستم های خنک کننده توسعه یافته است و نتایج عددی به افزایش قابل توجه راندمان گرمایی و کاهش مصرف انرژی اشاره دارند. در عمل، امکان پیاده سازی این طرح به مواد سازنده پره های انعطاف پذیر و همچنین بهینه سازی هندسه پره بستگی دارد. استفاده از موادی با خاصیت انعطاف پذیری بالا و مقاومت به خستگی می تواند باعث حفظ پایداری و عملکرد بهینه پره ها در طولانی مدت شود، و همچنین امکان تنظیم فرکانس نوسانات و خواص مکانیکی پره ها می تواند آن ها را برای کار در شرایط مختلف عملی سازد. لازم بذکر است که بدیهی است که در طراحی و تولید پره ها، به عواملی از جمله هزینه تولید، قابلیت پردازش و دوام در شرایط عملیاتی توجه شود. آزمایش های مکانیکی و گرمایی نیز باید در مراحل اولیه طراحی انجام شود تا اطمینان حاصل گردد که خواص مورد نظر قابل دستیابی و عملی هستند. پره هایی با مدول الاستیسیته پایین می توانند عملکرد گرمایی بهتری ارائه دهند زیرا انعطاف پذیری بیشتری دارند و به راحتی می توانند به تغییرات جریان سیال پاسخ دهند. این ویژگی می تواند به افزایش سطح تماس با سیال و بهبود انتقال گرما منجر شود. در خصوص قابلیت ساخت، پره های با مدول الاستیسیته پایین بر اساس مواد معین که در صنعت موجود هستند، قابل تولید می باشند. مواد با خواص مکانیکی مناسب برای این کاربرد در دسترس اند و می توانند با تکنیک های تولید مدرن مانند چاپ سه بعدی یا فرآیندهای ریخته گری تولید شوند.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، تأثیر پره های انعطاف پذیر به عنوان مولد گردابه بر روی رفتار هیدرودینامیکی و انتقال گرما در یک کانال با دیوارهای گرم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از پره های انعطاف پذیر، باعث افزایش قابل توجهی در عدد ناسلت و بهبود انتقال گرما بر روی دیوارهای گرم می شود. به عنوان نمونه، وجود پره های انعطاف پذیر با طول ۳mm باعث افزایش عدد ناسلت به میزان ۸۲٪ و بهبود نسبت عملکرد گرمایی به میزان ۱۰٪ در مقایسه با حالت پایه (بدون پره های انعطاف پذیر) گردیده است. همچنین، با افزایش مدول الاستیسیته پره ها، نیروی پسا افزایش یافته و جابجایی نوک انتهای پره ها کاهش می یابد. این امر نشان دهنده تأثیر قابل توجه خواص

مکانیکی پره ها بر روی رفتار دینامیکی و گرمایی جریان سیال است. علاوه بر این، نتایج حاکی از آن است که با افزایش طول پره های انعطاف پذیر، انتقال گرما بهبود یافته و افت فشار در داخل کانال کاهش می یابد. این کاهش در افت فشار می تواند به بهبود عملکرد کلی سیستم های خنک کننده و کاهش مصرف انرژی منجر شود. در نهایت، این مطالعه با ارائه ی یک تحلیل جامع از رفتار پره های انعطاف پذیر در شرایط مختلف، به درک بهتر فرآیندهای انتقال گرما و دینامیک سیالات در حضور این نوع پره ها کمک می کند و می تواند راهگشای طراحی های بهینه تر در کاربردهای صنعتی باشد.

۵- مراجع

- [1] Mirzaee H, Dadvand A, Mirzaee I, Shabani R. Heat Transfer Enhancement in Microchannels Using an Elastic Vortex Generator. *Journal of Enhanced Heat Transfer*. 2012; 19(3):199–211.
- [2] Park SG. Heat Transfer Enhancement by a Wall Mounted Flexible Vortex Generator with an Inclination Angle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020; 148: 1-15.
- [3] Dadvand A, Hosseini S, Aghebatandish S, Khoo BC. Enhancement of Heat and Mass Transfer in a Microchannel via Passive Oscillation of a Flexible Vortex Generator. *Chemical Engineering Science*. 2019; 207: 556–580.
- [4] Hosseini S, Aghebatandish S, Dadvand A, Khoo, BC. An Immersed Boundary-Lattice Boltzmann Method with Multi Relaxation Time for Solving Flow-Induced Vibrations of an Elastic Vortex Generator and Its Effect on Heat Transfer and Mixing. *Chemical Engineering Journal*. 2021; 405: 1-21.
- [5] Ismael MA, Hussain S, Alsabery AI, Chamkha AJ, Hashim I. Thermal Performance of a Vertical Double-Passage Channel Separated by a Flexible Thin Sheet, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2022; 137: 106238.
- [6] Abbasinezhad-Fallah D, Rezazadeh S, Jalili H, Raad M, Numerical Investigation of Triangular Bluff Bodies Size Effect on Heat and Mass Transfer Phenomena: Internal Flow. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022; 44:1-12.
- [7] Ali S, Menanteau S, Habchi C, Lemenand T, Harion J L. Heat Transfer and Mixing Enhancement by Using Multiple Freely Oscillating Flexible Vortex Generators. *Applied Thermal Engineering*. 2016;105: 276–89.
- [8] Yu Y, Liu Y, Chen Y. Vortex Dynamics and Heat Transfer behind Self-Oscillating Inverted Flaps of Various Lengths in Channel Flow. *Physics of Fluids*. 2018; 30(4):1-10.
- [9] Jing D, Zhan X. Fluid Mixing behind a Branched Elastic Flag Connecting to a Cylinder in Channel Flow. *Physics of Fluids*. 2022; 34(4): 1-13.
- [10] Lee JB, Park SG, Kim B, Ryu J, Sung HJ. Heat transfer enhancement by flexible flags clamped vertically in a Poiseuille channel flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017; 107: 391–402.
- [11] Adibi T, Razavi SE, Ahmed SF, Saha SC, Shah NA. Role of a Hinged Single Separator in Heat Transfer Enhancement and Drag Reduction in Circular Cylinder Flow. *Arabian Journal of Science and Engineering*. 2024.
- [12] Das A, Mahmood FT, Smriti RB, Saha S, Hasan MN. CFD analysis of heat transfer enhancement by wall mounted flexible flow modulators in a channel with pulsatile flow. *Heliyon*. 2023; 9: 1-8.
- [13] Shoelc K, Mittal R. Computational study of flow-induced vibration of a reed in a channel and effect on convective heat transfer. *Physics of Fluids*, 2024; 26: 1-9.
- [14] Turek S, Hron J. Proposal for Numerical Benchmarking of Fluid-Structure Interaction between an Elastic Object and Laminar Incompressible Flow. *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*. 2006; 53: 371–385.