

مطالعه عددی افزایش انتقال گرما و رفتار جریان سیال در تعامل سیال-سازه برای کانال با بهره‌گیری از دیوارهای منعطف نوسانگر

فرحان مجیدی اوصالو

صابر عبدالله‌زاده بناب

مرتضی یاری*

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،
farhan.m.osalu1401@ma.tabrizu.ac.ir

دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، سهند، ایران،
s_abdollahzadehbonab402@sut.ac.ir

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، myari@tabrizu.ac.ir

چکیده

پژوهش حاضر با استفاده از برهم کنش سازه - سیال به بررسی خنک‌کاری یک صفحه‌ی مستطیلی گرم از طریق جریان سیال در کانال با بهره‌گیری از دو دیوار الاستیکی در شرایط نوسانی با اعمال نیروی خارجی پرداخته است. جریان سیال تراکم‌ناپذیر از کانال دوبعدی که در وسط آن منبع گرمایی با شار گرمایی ثابت وجود دارد و در قسمت بالا و پایین کانال دو دیوار الاستیکی همجنس و هم‌اندازه قرار گرفته است، عبور می‌کند. با عبور جریان سیال از سطح گرم و نوسان دیوارهای الاستیکی انتقال گرما از سطوح داغ به سیال تغییر می‌یابد. در واقع آهنگ تبادل گرما به عنوان تابعی از شرایط سطوح الاستیک نوسانگر و دامنه نیرو اعمال شده به دیوارهای الاستیکی و دوره تناوب اعمال نیرو رفتار می‌کند. هدف شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، بررسی کاربرد جایگزینی مرز الاستیک با مرز صلب در بخشی از کانال و تأثیر اندازه دوره تناوب نوسان نیروی اعمالی و دامنه نیرو است. در این پژوهش جریان لایه ای با چهار عدد رینولدز مختلف 600 ، 1100 و 1600 و 2100 و سه دامنه نیروی اعمالی مختلف 200 و 400 و 800 نیوتن بر متر و چهار دوره تناوب نوسانی 0.5 و 0.25 و 0.125 و 0.07 ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. پس از حل معادلات حاکم شامل معادله انرژی و مومنتوم و معادلات سطح الاستیک و به‌کارگیری روش اجزا محدود دلخواه اویلری - لاگرانژی در نرم‌افزار مهندسی Comsol نتایج نشان می‌دهد که کاهش دوره تناوب نوسان، اختلاط جریان سیال را بهبود می‌بخشد و در نتیجه آهنگ انتقال گرما تا مقدار بهینه‌ی آن افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که کاهش پیوسته‌ی دوره‌ی تناوب بار اعمالی تا مقدار بهینه می‌تواند کارآمد باشد که در غیراین صورت تأثیر معکوس بر افزایش آهنگ دفع گرما دارد. بیشترین درصد افزایش ضریب انتقال گرما همرفت در مقایسه با کانال صلب در دامنه نیروی اعمالی ثابت 800 نیوتن بر متر در اعداد رینولدز 600 و 1100 و 1600 و 2100 به ترتیب 30.1% و 29.7% و 34.1% و 32.8% می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: برهم کنش سازه - سیال، دیوار الاستیکی، افزایش ضریب انتقال حرارت همرفت اجباری، روش المان محدود.

Numerical study of heat transfer enhancement and fluid flow behavior in fluid-structure interaction within a channel equipped with flexible oscillating walls

F. Majidi Osalu

S. Abdollahzadeh Bonab

M. Yari

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, Sahand university of technology, Sahand, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The present study investigates the cooling of a heated rectangular plate through fluid flow in a channel, utilizing the interaction between solid and fluid with two elastic walls under oscillating conditions and external forces. The incompressible fluid flow passes through a two-dimensional channel containing a constant heat flux heat source in the center, with two identical and equally sized elastic walls positioned at the top and bottom of the channel. As the fluid flows over the heated surface and the elastic walls oscillate, the rate of heat transfer to the fluid changes. In this scenario, the heat exchange rate behaves as a function of the conditions of the oscillating elastic surfaces, the magnitude of the force applied to the elastic walls, and the oscillation period of the applied force. The goal of the simulations conducted is to examine the application of replacing the elastic boundary with a rigid boundary in part of the channel and the impact of oscillation period and force magnitude. In this study, laminar flow with four different Reynolds numbers (600, 1100, 1600, and 2100) and three different applied force amplitudes (200, 400, and 800 N/m) alongside four oscillation periods (0.5, 0.25, 0.125, and 0.07 seconds) has been analyzed. After solving the governing equations, including the energy equation, momentum equations, and elastic surface equations, utilizing the arbitrary Eulerian-Lagrangian method in COMSOL engineering software, the results indicate that decreasing the oscillation period enhances fluid flow mixing, thereby increasing the heat transfer rate to its optimal level. The findings show that a continuous reduction of the applied force's oscillation period to an optimal level can be effective; conversely, exceeding this optimal point can negatively impact the heat dissipation rate. The highest percentage increase in the convective heat transfer coefficient, compared to the rigid channel, at a constant applied force of 800 N/m for Reynolds numbers 600, 1100, 1600, and 2100 were 30.1%, 29.7%, 34.1%, and 32.8%, respectively.

Keywords: Fluid-Structure Interaction (FSI), Elastic Wall, Forced convection Heat Transfer enhancement, Finite element method.

و کارایی سیستم‌ها تأثیر می‌گذارد. بنابراین، کشف روش‌های بهبود انتقال گرما اشتیاق محققان را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. استفاده از سطوح ارتعاشی الاستیک در واقع یک روش خنک کننده نوآورانه است که می‌تواند آهنگ انتقال گرما را به‌طور قابل

۱- مقدمه

انتقال گرما یک جنبه حیاتی از بسیاری از کاربردهای مهندسی مانند خنک‌کننده الکترونیک، مبدل‌های گرمایی، تبدیل انرژی و سیستم‌های مدیریت گرمایی است، زیرا به‌طور قابل توجهی بر عملکرد

* نویسنده‌گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: myari@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰۲۰/۸

تاریخ پذیرش: ۲۰۲۰/۸/۱۴

توجهی افزایش دهد. این روش که براساس برهم‌کنش سیال و جامد می‌باشد که شامل ساختار انعطاف‌پذیر در تعامل با سیال عامل است که باعث تغییر در مشخصه‌های هیدرودینامیکی و حرارتی در میدان جریان سیال می‌شود مطالعات متعددی عمدتاً عددی بر روی کاربرد ساختارهای انعطاف‌پذیر با هندسه‌های مختلف انجام شده است [۱-۵]. الامیری و خانفر [۶] انتقال حرارت جابجایی ترکیبی جریان لایه ای پایا را در یک محفظه با اعمال سطح قسمت پایینی به صورت انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن تحلیل برهم‌کنش سازه-سیال FSI^۱، بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که الاستیسیته سطح پایینی نقش بسزایی در بهبود انتقال گرما ایفا می‌کند. همچنین، سهم انتقال گرما همرفت اجباری در مقایسه با انتقال گرما همرفت طبیعی تأثیر عمیقی بر رفتار دیواره انعطاف‌پذیر و همچنین بر فرآیندهای انتقال مومنوم و انرژی درون محفظه دارد. بوزانادا و همکارانش [۷] به بررسی عددی انتقال گرما همرفت اجباری در میکرو کانال حاوی نانوسیال ذرات آلومینیوم اکسید و مانع الاستیکی نصب شده در کانال پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که شکل و انحنای دیواره الاستیک تأثیر قابل توجهی بر کارایی دفع گرما دارد. به‌ویژه در حالتی که منبع گرمایی در پایین و در مجاورت دیواره انعطاف‌پذیر قرار دارد، بهترین عملکرد خنک‌کنندگی را نشان می‌دهد. نتایج همچنین رابطه مثبت بین حجم ذرات نانو و افزایش انتقال گرما را نشان می‌دهد، به‌ویژه زمانی که منبع گرمایی نزدیک به دیواره پایین باشد نشان می‌دهد که انتقال گرما همرفت بهبود می‌یابد. سان و همکاران [۸] انتقال گرما همرفت اجباری از یک سیلندر دایره‌ای با یک باله انعطاف‌پذیر را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که وقتی فرکانس تولید گردابه به فرکانس طبیعی باله انعطاف‌پذیر نزدیک می‌شود، فرکانس FIV به فرکانس طبیعی قفل می‌شود و دامنه ارتعاش باله الاستیک بیشتر می‌شود. در نتیجه ناحیه «آب مرده» در پشت سیلندر کاهش یافته و انتقال گرما همرفت بهبود می‌یابد. در ترکیبات پارامترهای مورد بررسی حداکثر ۱۱۰۷٪ بهبود در انتقال حرارت با استفاده از باله انعطاف‌پذیر حاصل شده است. اسماعیل [۹] انتقال گرما همرفت اجباری در کانالی که توسط شار گرمایی ثابت گرم می‌شود و مجهز به موانع تولید کننده‌های گردابه هستند را مورد بررسی قرار داد و گزارش کرد نرخ انتقال گرما قابل توجهی به دلیل آشفته‌گی القا شده در میدان جریان سیال بوجود می‌آید و همچنین نشان داد که کشسانی بخش الاستیک نقش مهمی در افزایش نرخ انتقال گرما دارد. صالح و همکاران [۱۰] انتقال گرما همرفت ترکیبی ناپایا را در یک محفظه مربعی شامل یک استوانه مدور گرم شده و دو باله نازک انعطاف‌پذیر نصب شده بر روی دیوار سرد بالایی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که ویژگی‌های انتقال گرما لحظه‌ای نوسان مخالف با نوسان یکسان بسیار متفاوت است. لی و همکاران [۱۱] یک مولد گردابه در حال چرخش در یک باله مستطیلی را در نظر گرفتند. آن‌ها نوسانات صفحات الاستیک، میدان‌های گردابی و عملکرد انتقال گرما را مطالعه کردند و مدول یانگ بهینه مولد گردابی را به صورت ۱ MPa برای دستیابی به حداکثر درصد افزایش انتقال گرما ۲۰٪ بدست آوردند. علاوه بر این، کندو و همکارانش [۱۲]

برهم‌کنش ناشی از یک صفحه جدا کننده الاستیک متصل به یک سیلندر در جریان ضربانی لایه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند که فرکانس قفل صفحه با جریان ضربانی در فرکانس اعمال شده‌ای رخ می‌دهد که دو برابر فرکانس طبیعی صفحه است. یسنا و اسماعیل [۱۳] انتقال گرما همرفت ترکیبی سیال غیرنیوتنی و برهم‌کنش سیال - سازه (FSI) در داخل یک حفره دوزنقه‌ای باز را مورد بررسی قرار دادند. در کار آن‌ها کف حفره در دمای گرم نگه داشته می‌شود و سیال سرد با سرعت یکنواخت وارد کانال می‌شود و باله انعطاف‌پذیر در دیوار بالایی کانال ثابت می‌ماند. آن‌ها نشان دادند که در عدد رینولدز ۳۰۰ عدد ناسلت یک باله نرم ۶/۲٪ و ۷٪ بیشتر از باله صلب برای ۱/۵ و ۰/۵ n= است. اسماعیل و جاسم [۱۴] نقش برهم‌کنش سیال - سازه در همرفت ترکیبی درون یک حفره مربعی متشکل از دهانه‌های ورودی و خروجی را بررسی کردند که در آن یک باله الاستیک انعطاف‌پذیر به دیوار پایینی حفره متصل شده است. آن‌ها نشان دادند که باله انعطاف‌پذیر عدد ناسلت را بهتر از باله صلب افزایش می‌دهد.

الصابری و همکاران [۱۵] بصورت عددی جابجایی طبیعی گذرا را در یک مدل دو بعدی برای یک حفره مایل و باله نوسانی انعطاف‌پذیر مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که دامنه نوسان بزرگ‌تر به‌طور قابل ملاحظه‌ای عملکرد گرمایی را بهبود می‌بخشد. شهرستانی و همکاران [۱۶] انتقال گرما همرفت آزاد سیال‌نیوتنی را در داخل محفظه دایروی بخش‌بندی شده شامل عضو الاستیک میانی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در تحقیق خود نشان دادند که تغییر شکل صفحه الاستیکی بر اثر نیروی‌اعمالی توسط سیال بطور مستقیم با عدد رایلی افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی نیز توسط ریسی و آروین [۱۷] برای همرفت طبیعی در حفره مربعی در معرض شار گرمایی با یک دیوار الاستیک و یک مانع بصورت افقی نصب شده واقع در مرکز حفره بدست آمده است. سلیم فیندقلی و اوزتپ [۱۸] مطالعه عددی انتقال حرارت ترکیبی را بر روی محفظه پر شده با نانوسیال CuO در دیوار جانبی الاستیکی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که عملکرد حرارتی در عدد ریچاردسون ۱۰۰۱ به ترتیب ۸/۸۳٪ و ۱۴/۳۴٪ افزایش می‌یابد.

سلیم فیندقلی و اوزتپ [۱۹] بر روی انتقال حرارت جابجایی اجباری در یک کانال منشعب با ساختارهای الاستیکی تحت‌اعمال میدان مغناطیسی کار کردند. آن‌ها پارامترهای متعددی را شامل عدد رینولدز و مدول الاستیکی دیوار انعطاف‌پذیر و اندازه دیوار انعطاف‌پذیر و عدد هارتمن و اندازه موانع و شیب زاویه انحراف موانع به سمت جریان و پارامترهای انتقال حرارت جابجایی را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اندازه و مدول الاستیک دیوار انعطاف‌پذیر بیشترین تأثیر را بر آهنگ انتقال گرما دارد. رضوی و همکاران [۲۰] انتقال گرمای اجباری در کانال دو بعدی با جریان تراکم‌پذیر لایه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها سطح پایینی کانال را تحت شار گرمای ثابت قرار دادند و سطح بالایی در آن به صورت ساختار منعطف در نظر گرفته شد که تحت ارتعاش قرار گرفته‌است که در دو طرف سطح الاستیک دو مانع صلب قرار داده شده است. آن‌ها نتایج حاصل از شبیه‌سازی با دیوار الاستیکی را با دیوار صلب مقایسه کردند. در مقایسه‌ی آن‌ها گزارش شده است که عدد ناسلت ۹۴٪ درصد در

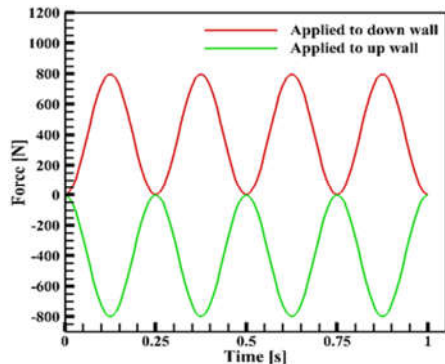
¹Fluid solid interaction

اعمال نیروی کسینوسی به دیوارهای الاستیکی به گونه‌ای است که سطح الاستیکی بالایی در راستای خلاف جهت مثبت محور y تحت

جدول ۱- جزئیات ابعادی هندسه مسئله

ابعاد	مقدار (میلی متر)
a	۳۵
b	۲۲/۵
c	۴۲
d	۸۰
e	۲
f	۱۸
h	۱۵

اعمال نیرو به سمت داخل کانال جابجا می‌شود از طرفی دیوار الاستیکی پایینی در راستای مثبت محور y به سمت بالا به سمت صفحه‌ی گرم نفوذ می‌کند. شکل ۲ نحوه اعمال بارگذاری خارجی به دیوارهای الاستیک را در مدت زمان یک ثانیه نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمودار نحوه جابجایی دیواره‌های الاستیکی تحت بار اعمال شده در دامنه نیروی ۸۰۰ نیوتن بر متر و دوره تناوب ۰/۲۵ ثانیه

۱-۲- معادلات حاکم

با در نظر گرفتن جریان لایه‌ای، دو بعدی، ناپایا و تراکم ناپذیر همراه با انتقال گرمای همرفت اجباری در کانال افقی و صرف نظر از اثر نیروی گرانش، معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم (۱) بقای مومنتوم (۲) و معادله انرژی (۳) برای سیال نیوتنی به صورت زیر در نظر گرفته شده‌است. همچنین معادلات مربوط دیواره‌های الاستیکی بر اساس روش اختیاری اوایلر-لاگرانژی (۴) به شرح زیر است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \nabla T = \alpha \nabla^2 T \quad (3)$$

که در آن، ρ ، μ و α به ترتیب چگالی، لزجت دینامیکی و پخشندگی گرمایی سیال هستند. علاوه بر این، u_i و u_j مولفه‌های سرعت در راستای محور افقی و عمودی هستند.

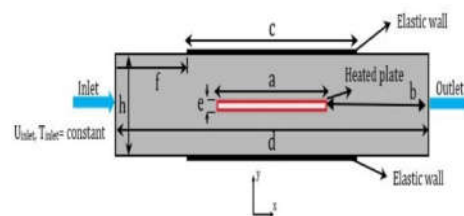
معادله حاکم برای جابجایی ساختاری الاستو دینامیک غیرخطی هندسی به صورت زیر است [۲۱]:

مقایسه با کانال با دیوارهای صلب افزایش می‌یابد و همینطور ضریب افت فشار در فیزیک مورد بررسی قرار گرفته ۲۱۰٪ نسبت به کانال بدون مانع افزایش می‌یابد.

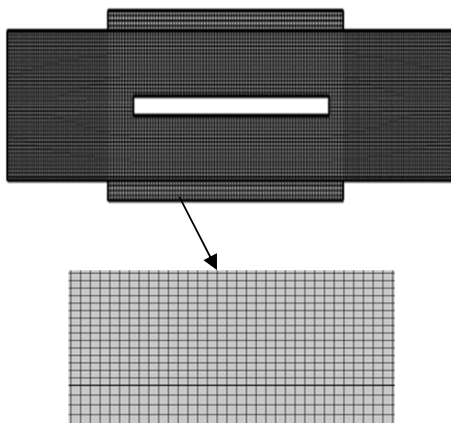
با بررسی مطالعات صورت گرفته در پژوهش‌های پیشین مشاهده می‌شود که استفاده از باله‌های انعطاف‌پذیر و دیوار الاستیک نتایج امیدوارکننده‌ای را در افزایش انتقال حرارت دارند. در تحقیق حاضر هدف اصلی خنک‌کاری یک صفحه‌ی مستطیلی گرم از طریق جریان سیال در کانالی با بهره‌گیری از دو دیوار الاستیکی تحت نوسان می‌باشد. پارامترهای موثر در این کار به صورت جامع مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و نتایج بدست آمده از نظر میدان‌های سرعت، دما و فشار و ضریب انتقال گرما با یکدیگر مقایسه شده است. استفاده از دیوار الاستیک تحت تاثیر نیروی خارجی و بهینه‌سازی پارامترهای دوره تناوب نیروی اعمالی و دامنه نیروی اعمالی در رینولدزهای مختلف جریان سیال کم‌تر مورد مطالعه قرار گرفته است و این موضوع بر اهمیت کار حاضر می‌افزاید.

۲- شرح مسئله و مدل فیزیکی

مدل دو بعدی فیزیک مسئله در نظر گرفته شده شامل کانال با دیواره‌های الاستیکی و صفحه‌ی مستطیلی گرم در شکل ۱ نمایش داده شده است. جزئیات ابعادی مسئله در جدول ۱ بیان شده است. جریان سیال آب بادمای مرجع ۲۹۳/۱۵ کلوین از سمت چپ کانال به صورت جریان لایه‌ای و غیرقابل تراکم در رینولدزهای مختلف ۶۰۰ و ۱۱۰۰ و ۱۶۰۰ وارد کانال می‌شود. صفحه مستطیلی نصب شده به ضخامت ۲ میلی‌متر و طول ۳۵ میلی‌متر در وسط کانال تحت شار گرمایی ثابت ۸۰۰۰۰ وات بر مترمربع قرار دارد. دو دیوار الاستیکی همجنس به ضخامت ۲ میلی‌متر و طول ۴۲ میلی‌متر که چگالی و مدول یانگ و ضریب پواسن آن به ترتیب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب ۱/۸ مگاپاسکال و ۰/۳۳ می‌باشد در قسمت بالا و پایین کانال به صورت متقارن و مقابل هم نصب شده‌اند. این درحالی است که صفحه مستطیلی گرم در وسط دیواره‌های الاستیکی قرار گرفته است و وجود دیوارهای الاستیکی نوسانگر بیشترین تاثیر را بر میدان سرعت و دما در اطراف صفحه مستطیلی گرم دارد. صفحه‌های الاستیکی تحت بارگذاری کسینوسی قرار دارند نیروی کسینوسی تحت دامنه‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ و ۸۰۰ نیوتن بر متر به دیواره‌های الاستیکی می‌شود به طوری که در دامنه ۸۰۰ نیوتن بر متر بیشترین تغییر شکل در دیواره‌های الاستیکی دیده می‌شود. همچنین دیواره‌های الاستیکی در دوره‌های تناوب ۰/۵ و ۰/۲۵ و ۰/۱۲۵ و ۰/۰۷ ثانیه تحت تاثیر اعمال نیروی خارجی نوسان می‌کنند.



شکل ۱- طرحواره هندسی مسئله



شکل ۳- شبکه بندی مسئله

به منظور رسیدن به حل عددی پایدار و قابل قبول و اطمینان از نتایج شبیه‌سازی‌ها از پنج کیفیت متفاوت شبکه در این تحقیق استفاده شده است. لازم به ذکر است که پالایش مش با افزایش تعداد المان‌ها در کانال و مرزهای الاستیک مورد بررسی قرار می‌گیرد (۲۶۶۹۹، ۲۸۹۵، ۶۸۹۱، ۹۲۴۷، ۱۲۳۳۲). میانگین دمای دیوار و ضریب انتقال گرما برای پنج مورد شبکه مختلف محاسبه شده است و نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است. از نتایج به دست آمده می‌توان مشاهده کرد که مدل گرمایی در نظر گرفته شده با تعداد المان‌های ۹۲۴۷ و ۱۲۳۳۲ به استقلال از تعداد شبکه بندی رسیده است.

جدول ۲- استقلال جواب دمای میانگین و ضریب انتقال گرمای همرفت اجباری از تعداد شبکه محاسباتی در رینولدز ۱۱۰۰ و دامنه ۸۰۰ و دوره تناوب ۰/۲۵ ثانیه

تعداد شبکه در دامنه محاسباتی	ضریب انتقال گرما همرفت اجباری (W/m^2K)	دمای میانگین محلی در مرز های حامل شار گرمایی (K)
۲۶۹۹	۲۷۲۹/۶۴	۳۲۲/۴۵
۲۸۹۵	۲۸۴۵/۰۶	۳۲۱/۲۶
۶۸۹۱	۲۸۵۰/۸۶	۳۲۱/۱۲
۹۲۴۷	۲۹۹۱/۲۵	۳۱۹/۸۹
۱۲۳۳۲	۲۹۹۲/۳۰	۳۱۹/۷۰

بر اساس نتایج حاصل از جدول ۲ و با تکرار حل مسئله در تعداد شبکه‌های مختلف و اطمینان از مستقل شدن جواب‌ها و برای جلوگیری از افزایش هزینه محاسباتی و زمان محاسبات از تعداد شبکه ۹۲۴۷ در تمام شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شود.

۳-۲-۳ اعتبار سنجی

به منظور اعتبار بخشیدن به نتایج حل عددی نتایج پژوهش حاضر با نتایج کار عبید و همکاران [۲۳] مقایسه شده است. آن‌ها انتقال حرارت داخل کانال دو بعدی شامل ایجاد کننده جریان گردابه الاستیکی و دیوار منعطف را بررسی کردند.

$$\rho_s \frac{\partial^2 u_s}{\partial t^2} - \nabla \cdot \bar{\sigma} = \rho_s \bar{b} \quad (4)$$

که در آن ρ_s چگالی جامد، u_s نشان دهنده جابجایی جامد، \bar{b} نشان دهنده نیروهای وارده بر سازه و $\bar{\sigma}$ تانسور تنش کوشی است. برای یک ساختار جامد الاستیک خطی ایزوتروپیک، تانسور تنش به این صورت محاسبه می‌شود:

$$\bar{\sigma} = 2\mu_L \bar{\epsilon} + \lambda_L \text{tr}(\bar{\epsilon})I \quad (5)$$

که در آن، λ_L و μ_L به ترتیب پارامترهای لامه اول و دوم، $\bar{\epsilon}$ تانسور کرنش، tr تابع ردیابی، و I ماتریس مشخصه هستند. برای مواد تراکم‌پذیر، پارامترهای لامه را می‌توان به صورت توابعی از مدول الاستیک و ضریب پواسون نوشت [۲۲]:

$$\lambda_L = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(2\nu - 1)} \quad (6)$$

$$\mu_L = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (7)$$

که در آن E مدول الاستیک و ν ضریب پواسون است هنگامی که معادلات حاکم حل شدند، ضریب انتقال گرما همرفتی را می‌توان به شکل معادله زیر محاسبه کرد. [۲۱ و ۲۲]:

$$h = \frac{q}{T_{\text{wall}} - T_{\text{ref}}} \quad (8)$$

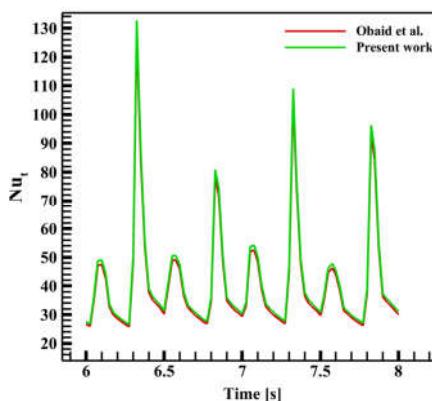
که در آن، q شار گرمایی اعمال شده بر موانع، و T_{wall} دمای میانگین مرز دیواره گرم شده و T_{ref} دمای ورودی سیال ۲۹۳/۱۵ کلوین است.

معادلات (۸ - ۱) با در نظر گرفتن شرایط مرزی زیر حل می‌شوند. برای تمامی دیواره‌ها شرط عدم لغزش سیال در نظر گرفته شده است. برای تامل سیال و سازه روش یکپارچه انتخاب شده است که در این روش معادلات حاکم بر جریان سیال و جسم جامد الاستیک به صورت همزمان در نظر گرفته و حل می‌شوند. به جز صفحه‌ی مستطیلی که تحت تاثیر شار گرمایی ثابت گرم می‌شود تمامی دیوارها عایق گرمایی در نظر گرفته شده‌است و هیچ گونه انتقال جرم در مرز بین دیواره‌های الاستیکی و سیال صورت نمی‌گیرد. سرعت و دما در ورودی به صورت یکنواخت فرض می‌شوند در حالی که مرز خروجی کانال به صورت مرز باز در نظر گرفته شده است.

۲-۲-۲ روش عددی استقلال از شبکه

یک شبکه سازمان یافته متشکل از المان‌های چهارضلعی برای بخش سیال و بخش دیواره‌های الاستیکی و منبع گرمایی در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. شکل ۳ طرحواره‌ی کلی شبکه بندی فیزیک مساله در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. روش دلخواه اویلری - لاگرانژی (ALE) نیز برای تعیین توزیع سلول در نزدیکی مرز الاستیک که در آن تعامل بین بخش دیواره الاستیک و سیال رخ می‌دهد، به کار می‌رود. این تکنیک عددی مزایای هر دو روش اویلری و لاگرانژی را برای مدل‌سازی موثر مسائل مربوط به مرزهای در حال حرکت یا ساختارهای تغییر شکل‌پذیر ترکیب می‌کند. گره‌های مش حوزه محاسباتی اجازه دارند که ثابت نگه‌داشته شوند یا به روش دلخواه حرکت کنند [۱۹ و ۲۰]. شبیه‌سازی‌های عددی توسط روش اجزای محدود (FEM) ارائه شده در نرم افزار COMSOL انجام می‌شود. معیار هم‌گرایی در مطالعه حاضر روی ۱ - ۶e تنظیم شده است.

همچنین افزایش سرعت سیال در محدوده لایه مرزی گرمایی موجب افزایش دفع گرما از صفحه گرم شود. لازم به ذکر است، مقایسه شکل ۵ در دوره تناوبهای ۰/۵ و ۰/۱۲۵ ثانیه نشان دهنده اثر دوره تناوب نوسان بر میدان سرعت جریان سیال می‌باشد. با کاهش دوره نوسان بار اعمال شده نوسان دیوارهای الاستیک با تکرارهای بیشتر در واحد زمان رخ می‌دهد و این پدیده موجب اختلاط بیشتر جریان سیال در کانال می‌شود. با مقایسه رژیم جریان در لحظه‌های مشخص بین دوره‌های تناوب ۰/۵ و ۰/۱۲۵ ثانیه مشاهده می‌شود که چندین گردابه نیز در اطراف و پشت صفحه‌ی حرارتی گرم به دلیل جدایش جریان سیال ایجاد می‌شود. تولید گردابه باعث جابجایی توده‌های جریان سیال گرم با جریان سیال سرد می‌شود و نیز اختلاط بین لایه‌های سیال را بهبود می‌بخشد.



شکل ۴- مقایسه تغییرات زمانی عدد ناسلت

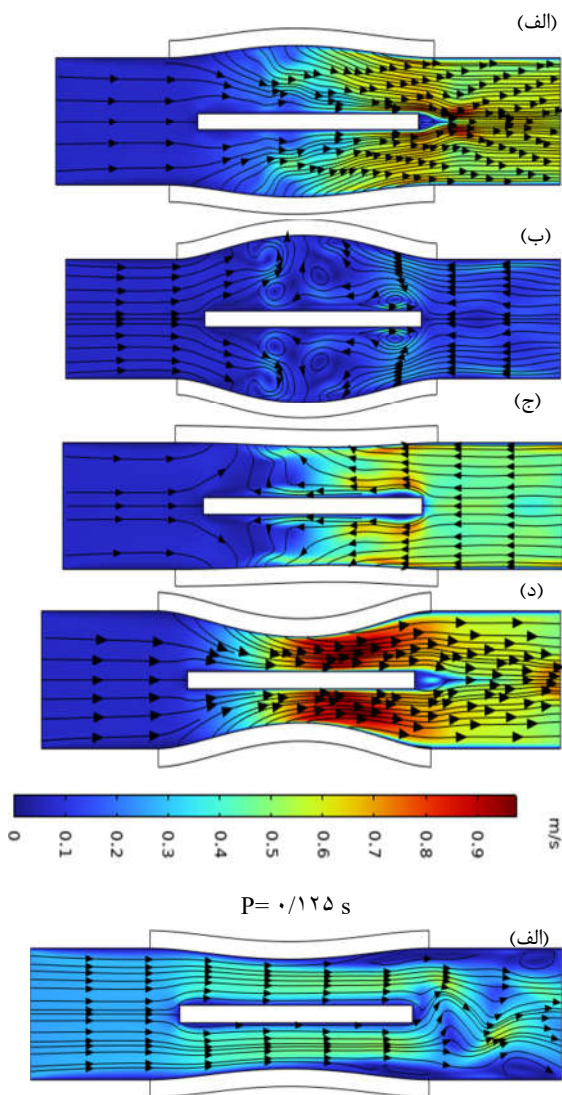
مشخصه گرمایی عدد ناسلت با پژوهش حاضر مقایسه شده است. با توجه به نمودار شکل ۴ نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج حاصل از کار عددی در تشابه خوبی باهم قرار دارند.

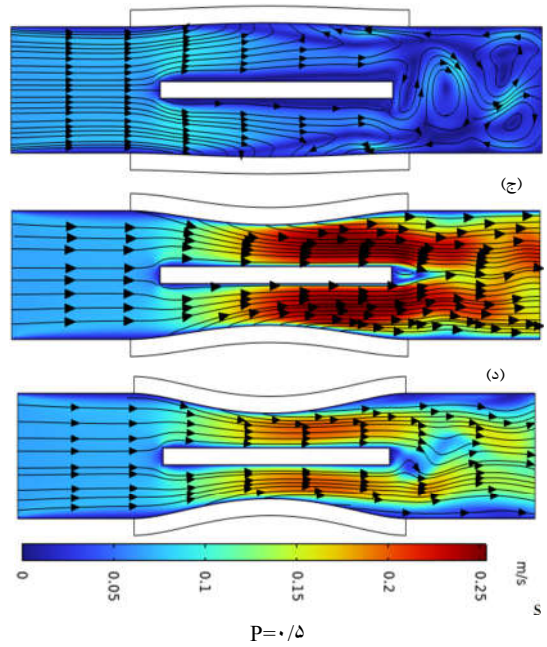
۳- نتایج

پس از انتخاب شبکه مناسب ابتدا هندسه پایه (کانال صلب) حل شده سپس دیوارهای الاستیکی در دوطرف کانال قرار داده می‌شود و در شرایط مختلف تحت نوسان نیروی کسینوسی از سمت بالا و پایین قرار می‌گیرند نیروی کسینوسی در سه دامنه مختلف ۸۰۰، ۴۰۰ و ۲۰۰ نیوتن بر متر و در چهار دوره تناوب نوسان مختلف ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۲۵ و ۰/۰۷ به هر دو دیوار الاستیکی اعمال می‌شود. جریان سیال آب در چهار عدد رینولدز مختلف ۶۰۰، ۱۱۰۰، ۱۶۰۰ و ۲۱۰۰ با رژیم‌جریانی آرام در نظر گرفته شده است که متناسب با رینولدزهای مشخص سرعت‌های مختلفی به صورت یکنواخت در ورودی کانال اعمال می‌شود. دمای مرجع که دمای ورودی سیال می‌باشد ۲۹۳/۱۵ کلوین در نظر گرفته می‌شود شار حرارتی ثابت به مقدار ۸۰ کیلو وات بر متر مربع به مرزهای مقطع مستطیلی که در وسط کانال قرار دارد اعمال می‌شود. به جز مرزهای ورودی و خروجی سیال بقیه مرزها عایق گرمایی در نظر گرفته شده است و شرط عدم لغزش بر تمام مرزها اعمال شده است. دامنه‌ی محاسباتی با شرایط گفته شده در طول ۱۲ ثانیه به صورت وابسته به زمان شبیه‌سازی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که مقادیر شاخصه‌های اصلی سیالاتی و گرمایی با گذشت ۲ ثانیه از ابتدای حل عددی به مقادیر پایداری رسیده یا رفتار نوسانی دارند و حول یک مقدار مشخص نوسان می‌کنند.

شکل ۵ تغییرات سرعت و خطوط جریان را در عدد رینولدز ۱۱۰۰ و دامنه نیروی ۸۰۰ نیوتن بر متر و در دوره‌های تناوبی نوسان ۰/۱۲۵ و ۰/۵ ثانیه نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است نوسان دیوارهای الاستیکی و نفوذ آنها در داخل کانال موجب انحراف جریان سیال می‌شود و یک مولفه سرعت عمودی ایجاد می‌کند که این مولفه عمودی سرعت علاوه بر اینکه با ترکیب مولفه سرعت افقی برآیند سرعت بزرگتری را ایجاد می‌کند باعث نفوذ جریان سرد سیال به لایه مرزی حرارتی اطراف صفحه‌ی مستطیلی گرم می‌شود و موجب اختلاط بهتر هیدرودینامیکی و گرمایی در آن نواحی می‌شود. پیش‌بینی می‌شود که ایجاد اغتشاش در لایه مرزی گرمایی و

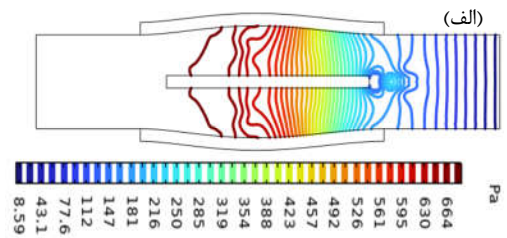
(ب)



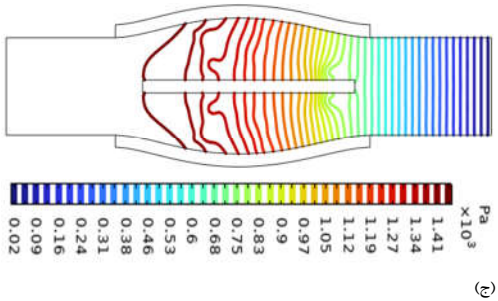


شکل ۵- تغییرات میدان سرعت و خطوط جریان در زمان‌های متوالی برای عدد رینولدز ۱۱۰۰ و دامنه ۸۰۰ نیوتن برای دوره تناوب نوسان ۰/۵ و ۰/۱۲۵ ثانیه (الف) $t = 11/9$ s (ب) $t = 11$ s (ج) $t = 11/1$ s (د) $t = 11/2$

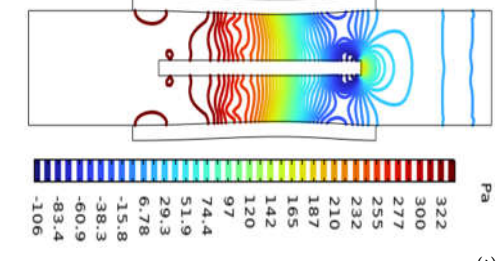
شکل ۶ مقایسه‌ی تغییرات فشار در رینولدز ۱۱۰۰ و دامنه بار اعمالی ۸۰۰ نیوتن بر متر و دوره تناوب ۰/۵ و ۰/۱۲۵ ثانیه نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶ مشاهده می‌شود که در طول کانال فشار منفی ایجاد شده و موجب ایجاد جریان بازگشتی می‌شود که این عامل موجب به وجود آمدن گردابه‌هایی در طول کانال می‌شود. در واقع با نوسان سطوح الاستیک سطح مقطع کانال پیوسته تغییر می‌کند و موجب تغییرات گسترده در مشخصه‌های سیالاتی و حرارتی داخل کانال می‌شود. همچنین با افزایش دامنه ارتعاشی و دوره تناوب نوسان گرادین فشار با شدت بیشتری افزایش یافته و موجب ایجاد گردابه‌های بزرگ می‌شود. به دلیل پیوستگی بین لایه‌های سیال در لحظه‌ای که نیروی اعمالی صفر می‌شود سطوح الاستیک به حالت اولیه خود یا شرایط آزاد می‌رسند و سیال به طرف سطوح الاستیک کشیده می‌شود این اتفاق موجب افزایش ضخامت لایه مرزی گرمایی افزایش می‌شود و از طرفی با کاهش سطح مقطع کانال تحت تاثیر نوسان سطوح الاستیک لایه‌های سیال متراکم‌تر شده و ضخامت لایه مرزی گرمایی کاهش می‌یابد که در شکل‌های ۶ و ۷ قابل مشاهده است.



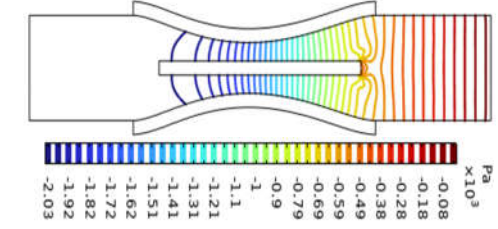
(د)



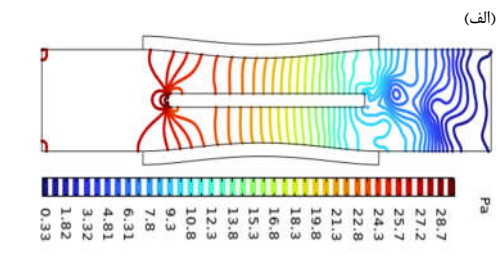
(ب)



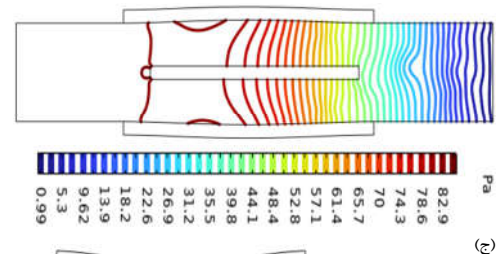
(ج)



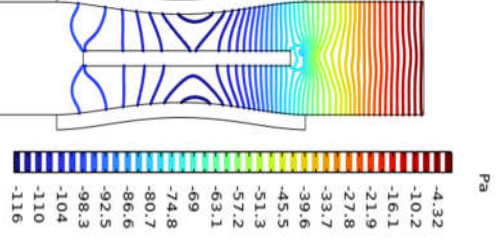
(د)



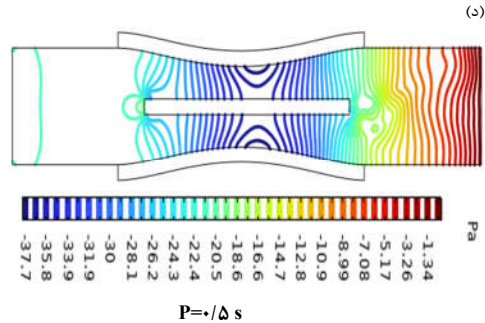
(ب)



(ج)

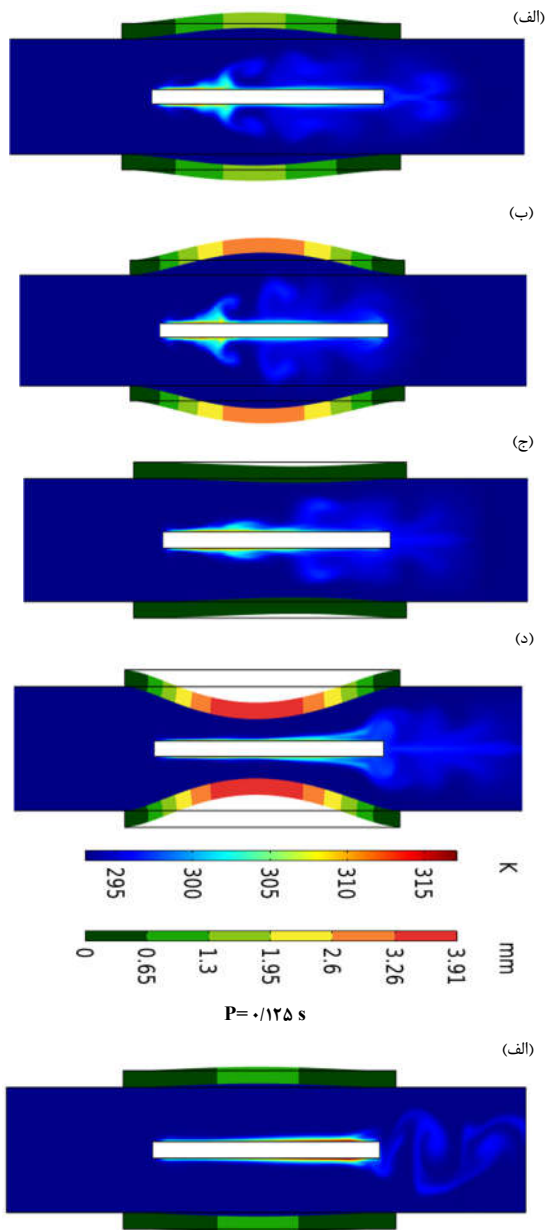


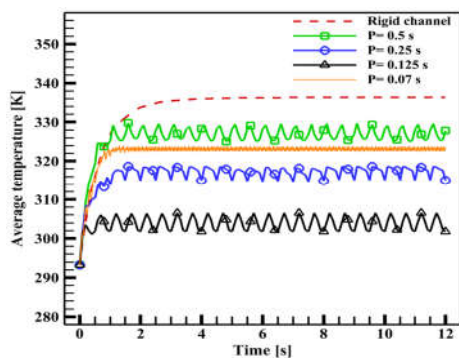
تحت تاثیر نوسان هردو دیوار الاستیک اشاره کرد که افزایش سرعت ناشی از کاهش سطح مقطع جریان عبوری باعث افزایش ضریب انتقال گرما همرفت اجباری می‌شود. افزایش دوره تناوب نوسان دیوارهای الاستیکی باعث افزایش تعداد دفعات بیشتر نوسان در واحد زمان می‌شود که میدان جریان سیال و میدان دما و فشار بیشتر تحت تاثیر نوسان دیوارهای الاستیکی قرار می‌گیرند و اختلاط بهتری صورت می‌گیرد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد کاهش پیوسته دوره‌ی تناوب یا به عبارتی افزایش فرکانس نوسان نیروی اعمالی همیشه عامل مثبت برای افزایش آهنگ انتقال گرما از سطح گرم نمی‌باشد و کاهش دوره تناوب نوسان از مقدار بهینه باعث کاهش آهنگ دفع گرما از سطح می‌شود.



شکل ۶- کانتور فشار در عدد رینولدز ۱۱۰۰ و دامنه ۸۰۰ نیوتن بر متر در دوره تناوب ۰/۱۲۵ و ۰/۵ ثانیه در زمان‌های متوالی (الف) $t = 10/9$ s (ب) $t = 11$ s (ج) $t = 11/1$ s (د) $t = 11/2$ s

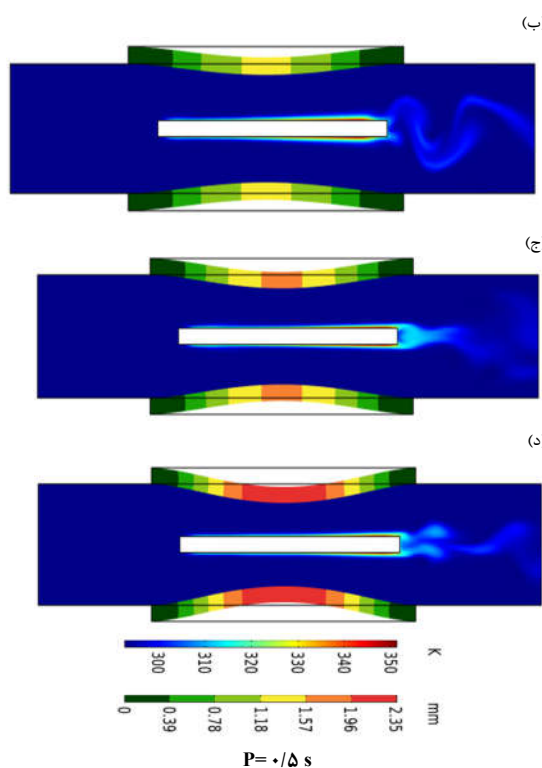
شکل ۷ تغییرات کانتور دما در طول کانال و میزان جابجایی دیوار الاستیکی برای حالت رینولدز ۱۱۰۰ و دامنه بار اعمالی ۸۰۰ نیوتن بر متر و دوره تناوب نوسان ۰/۱۲۵ و ۰/۵ ثانیه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است میدان دما در طول کانال به دلیل نوسان دیوار الاستیک تحت تاثیر اعمال نیروی کسینوسی پیوسته در حال تغییر است. همانطور که پیش‌تر گفته شد، نوسان دیوار الاستیک تاثیر زیادی بر هیدرودینامیک و انتقال گرمای جریان سیال در کانال دارد و موجب بهبود اختلاط سیال می‌شود. لایه مرزی حرارتی دیگر به صورت یکنواخت رشد نمی‌کند بلکه به صورت پیوسته به دلیل اختلاط میدان جریان سیال و نفوذ سیال سردتر به لایه مرزی حرارتی دچار تغییر شکل می‌شود. با در نظر گرفتن تغییرات زمانی ارائه شده در شکل ۷ مشاهده می‌شود که به دلیل نوسان هردو دیوار الاستیک تحت تاثیر بار اعمالی متناوب با افزایش سطح مقطع ضخامت لایه مرزی دمایی افزایش یافته و با کاهش سطح مقطع، کاهش می‌یابد به این دلیل است که با افزایش سطح مقطع ناشی از نوسان سطوح الاستیک فشار نزدیک جدار الاستیک کاهش یافته و باعث می‌شود سیال عامل تحت تاثیر آن جریان یابد که این عامل باعث می‌شود ضخامت لایه مرزی دمایی افزایش یابد. از طرف دیگر کاهش سطح مقطع کانال به موجب نوسان سطوح الاستیک و انحراف به سمت صفحه‌ی مستطیلی گرم لایه‌های سیال متراکم‌تر شده و ضخامت لایه مرزی دمایی کاهش می‌یابد و مانع رشد لایه مرزی دمایی می‌شود که در شکل‌های ارائه شده به وضوح قابل مشاهده است. در واقع با ارتعاش هردو نوسانگر الاستیکی سیال عامل به دلیل تشکیل گردابه‌ها و جریان بازگشتی علاوه بر حرکت طولی حرکت عرضی نیز خواهد داشت. بنابراین با افزایش دامنه جابجایی سطوح الاستیک سیال بیشتر تحت تاثیر نوسانات قرار گرفته و ضخامت لایه مرزی دمایی بیشتر تغییر می‌کند. این پدیده با کاهش دوره تناوب بار اعمال شده به دلیل نوسانات بیشتر تشدید می‌شود. به عبارتی کاهش دوره تناوب نیروی اعمال شده، نوسانات هردو دیوار الاستیک را افزایش می‌دهد، که منجر به اختلاط بهتر جریان سیال در کانال و در نتیجه موجب بهبود دفع گرما از صفحه‌ی داغ می‌شود. لازم به ذکر است که افزایش نوسان هردو دیوار الاستیک موجب افزایش تعداد دفعات تغییر موقعیت سطح مقطع کانال در زمان مشخص می‌شود که موجب افزایش تغییرات ضخامت لایه مرزی حرارتی خواهد شد. همچنین می‌توان به افزایش سرعت سیال





شکل ۸- دمای متوسط سطح مستطیلی تحت شار گرمایی در حالت کانال صلب و مقایسه با کانال حاوی دیواره های الاستیکی در رینولدز ۱۶۰۰ و دامنه نیرویی ۸۰۰ نیوتن بر متر در دوره های تناوب ۰/۵ s و $P=0.07, 0.125, 0.25, 0.5$

منجر به اختلاط بهتر سیال و در نتیجه موجب افزایش انتقال گرما از سطح گرم می شود. با این حال نمی توان میزان تکرار نوسانات را به منظور بهبود انتقال گرما به مقادیر کمتر از مقدار بهینه کاهش داد چراکه با افزایش تعداد نوسان دیوارهای الاستیکی سیال موجود در محدوده دیواره الاستیکی فرصت جابجایی نداشته و در اطراف سطح گرم تجمع پیدا می کند و محدوده های با دمای بالا ایجاد می کند. تجمع توده سیال گرم در اطراف سطح حامل شار حرارتی مانند لایه مرزی گرمایی عمل می کند و باعث کاهش آهنگ تبادل گرما می شود. براساس نتایج حاصله از شکل ۸ در دوره تناوب ۰/۵ ثانیه دمای میانگین سطح حامل شار حرارتی نسبت به کانال صلب ۷/۶ کلوین کاهش می یابد. این میزان کاهش دما در دوره تناوب ۰/۱۲۵ ثانیه برابر ۲۹/۹۳ کلوین می باشد. شکل ۹ تغییرات ضریب انتقال گرما همرفت در رینولدزهای مختلف براساس تغییرات دوره تناوب نوسان را نشان می دهد. نوسان دیوارهای الاستیکی باعث مکش بخشی از جریان پایین دست خواهد شد که در کنار نوسان پیوسته ی دیوارهای الاستیکی موجب اختلاط جریان سیال پایین دست و بالا دست سیال می شود. با افزایش دامنه نوسانات نفوذ دیواره های الاستیکی در کانال بیشتر می شود و سطح مقطع عبور جریان کاهش بیشتری می یابد در نتیجه سرعت جریان سیال به دلیل کاهش سطح مقطع ناشی از نفوذ دیوارهای الاستیکی افزایش می یابد که این عامل باعث افزایش ضریب انتقال گرما همرفت می شود. از طرفی با افزایش عدد رینولدز سرعت و ضخامت دبی جریان عبوری از صفحه ی مستطیلی گرم بیشتر می شود و ضخامت لایه مرزی گرمایی کاهش می یابد که موجب افزایش ضریب انتقال گرما همرفت می شود. یکی دیگر از عوامل تاثیرگذار در تغییر ضریب انتقال گرما همرفت تغییر دوره تناوب نوسان نیروی اعمالی می باشد که تکرارهای نوسانات دیوارهای الاستیکی را تغییر می دهد. همانطور که قبلا اشاره شد کاهش دوره تناوب نوسان باعث افزایش تعداد دفعات نفوذ دیوارهای الاستیکی در واحد زمان می شود که موجب افزایش آهنگ اختلاط جریان سیال و تغییر در رفتار هیدرودینامیکی و گرمایی سیال در کانال می شود. در واقع متناسب با کاهش دوره تناوب نوسان بار اعمالی فرکانس نوسان دیوارهای الاستیکی افزایش می یابد در نتیجه سرعت اختلاط بین لایه های سیال زیاد می شود و ضریب انتقال گرما همرفت افزایش می یابد. مطابق نتایج حاصل از محاسبات عددی در این



شکل ۷- تغییرات دما و جابجایی دیواره های الاستیکی در عدد رینولدز ۱۱۰۰ و دامنه ۸۰۰ نیوتن بر متر در دوره تناوب نوسان ۰/۱۲۵ و ۰/۲۵ ثانیه در زمان های متوالی (الف) $t=10/9$ s (ب) $t=11$ s (ج) $t=11/1$ s (د) $t=11/2$ s

شکل ۸ تغییرات دمای متوسط صفحه ی تحت شار گرمایی را برای دوره های نوسانی مختلف برحسب زمان در رینولدز ۱۶۰۰ و دامنه بار اعمالی ۸۰۰ نیوتن بر متر را نشان می دهد. به منظور درک بهتر از عملکرد دیوارهای الاستیکی در افزایش دفع گرما از صفحه ی گرم و کاهش دمای سطح آن نتایج به دست آمده از دامنه محاسباتی در حضور دیوارهای الاستیکی با نتایج کانال صلب مقایسه شده است. مطابق شکل ۸ نوسان دیوارهای الاستیکی دمای متوسط را کاهش می دهد یا دفع گرما از سطح حامل شار گرمایی را بهبود می بخشد. متناسب با مقدار دوره تناوب نوسان دیوارهای الاستیکی دمای متوسط پس از پایا شدن حول دمای مشخص نوسان می کند که دلیل اصلی این نوسانات دما برگرفته از نوسانات پیوسته ی دیوارهای الاستیکی در راستای عمودی می باشد. این نتیجه برای کانال صلب هم مشاهده می شود که پس از مدت کوتاهی از حل دما به حالت پایایی خود می رسد و دمای سطح ثابت می ماند. بنابراین دمای سطح گرم با دوره تناوب نوسان قابل کنترل است با کاهش دوره تناوب نوسان از ۰/۲۵ تا ۰/۱۲۵ نوسان دیوارهای الاستیکی پیوسته انتقال گرما را از سطح گرم بهبود می بخشد اما با کاهش دوره تناوب نیروی اعمالی از مقدار ۰/۱۲۵ ثانیه به مقدار ۰/۰۷ ثانیه روند کاهش دمای میانگین از صفحه گرم معکوس می شود و مشاهده می شود که مقدار ۰/۱۲۵ دوره ی تناوب بهینه در این مسئله می باشد. با کاهش دوره تناوب نوسان، نوسان دیواره الاستیک با تکرارهای بیشتر در واحد زمان رخ می دهد که

دامنه‌های بار اعمالی ابتدا روند صعودی داشته و بعد از مقدار مشخصی کاهش یافته است. ضریب انتقال گرما همرفت برای کانال صلب در رینولدز ۶۰۰ و ۱۱۰۰ و ۱۶۰۰ و ۲۱۰۰ به ترتیب $[W/m^2 K]$ ۱۲۷۲ و ۱۶۱۰ و ۱۷۰۰ و ۲۱۴۷ می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۹ بیشترین درصد افزایش ضریب انتقال گرما همرفت نسبت به کانال صلب در رینولدزهای ثابت در دامنه ۸۰۰ نیوتن بر متر و در دوره تناوب بهینه متناظر اتفاق می‌افتد که برای رینولدز ۶۰۰ و ۱۱۰۰ و ۱۶۰۰ و ۲۱۰۰ به ترتیب ۳۰۱٪ و ۲۹۷٪ و ۳۴۱٪ و ۳۲۸٪ می‌باشد.

۳- نتیجه گیری

در این پژوهش برهم‌کنش سیال-جامد برای افزایش آهنگ انتقال گرما با روش المان محدود گالکین و با استفاده از معادلات دلخواه اویلری-لاگرانژی در یک کانال دو بعدی افقی با سیال عامل آب بررسی شده است. یک سطح مستطیلی تحت شار حرارتی ثابت قرار گرفته و از دو طرف به صورت متقارن در معرض نوسان دیوارهای الاستیکی قرار دارد. دیوارهای الاستیکی تحت نیروی کسینوسی در دوره‌های تناوب ۰/۵ و ۰/۲۵ و ۰/۱۲۵ و ۰/۰۷ ثانیه در دامنه‌های مختلف تحت بار ۲۰۰ و ۴۰۰ و ۸۰۰ نیوتن بر متر قرار دارد. در این مساله جریان سیال لایه‌ای در رینولدزهای ۶۰۰ و ۱۱۰۰ و ۱۶۰۰ و ۲۱۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیر نوسان دیواره‌های الاستیکی بر مشخصه‌های هیدرو دینامیکی و گرمایی سیال مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج اصلی بدست آمده به شرح زیر است:

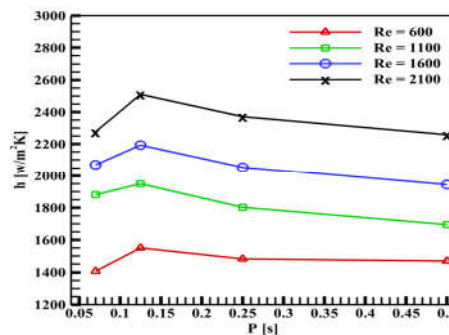
۱- نوسان دیوارهای الاستیکی در دو طرف کانال موجب می‌شود خطوط جریان برخلاف کانال صلب یکنواخت نبوده و هر لحظه دچار تغییر شوند و گردابه‌هایی با قدرتهای مختلف در طول کانال به وجود آید. با افزایش دامنه و کاهش سطح مقطع عبوری، سیال در اطراف مانع گرم شتاب می‌گیرد و سیال علاوه بر حرکت طولی حرکت عرضی نیز می‌کند. با صفر شدن نیروی اعمالی و بازگشت سطوح الاستیکی به حالت اولیه سیال پایین دست به دلیل افزایش یافتن حجم داخل کانال به سمت بالادست حرکت کرده و موجب ایجاد جریان بازگشتی در داخل کانال می‌شود. درحقیقت این حالت را می‌توان مشابه جریان مکشی در نظر گرفت.

۲- کاهش دوره تناوب نوسان نیروی اعمال شده، موجب نوسان دیوارهای الاستیکی با تکرارهای بیشتر در واحد زمان می‌شود. این عامل موجب اختلاط جریان سیال می‌شود و در نتیجه انتقال گرما را افزایش می‌دهد. نتیجه حاصله نشان می‌دهد کاهش دوره تناوب نوسان یا به عبارتی افزایش فرکانس نوسان دیواره‌های الاستیکی همواره موجب افزایش آهنگ دفع گرما نمی‌شود.

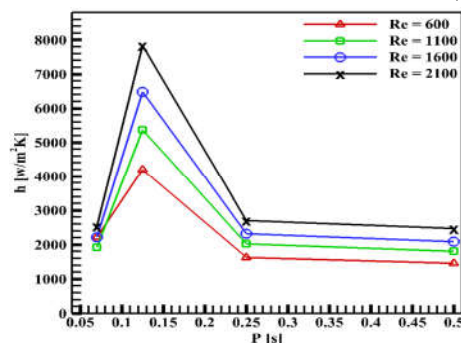
۳- افزایش دامنه نیروی اعمال شده از مقدار ۲۰۰ به ۴۰۰ و ۸۰۰ نیوتن بر متر موجب افزایش نفوذ دیوارهای الاستیکی در کانال شده که موجب افزایش قدرت گردابه‌ها می‌شود. ایجاد گردابه‌هایی با قدرت بیشتر موجب تداخل بیشتر جریان سیال می‌شود و افزایش آهنگ گرمای منتقل شده از سطح گرم به جریان سیال را به همراه دارد. این مقدار با افزایش بیشینه دامنه نیز به طور پیوسته افزایش می‌یابد. با توجه به جهت جریان نشان داده شده در پروفیل‌های سرعت در طول کانال و مورب بودن خطوط جریان، می‌توان رسوب‌زدایی به هنگام خنک‌کاری سطوح را نیز از مزیت‌های جایگزینی سطح الاستیک در

تحقیق کاهش دوره تناوب همیشه عامل مثبت در جهت افزایش انتقال گرما نمی‌باشد. بنابراین دوره تناوب بهینه‌ای وجود دارد که کاهش مقدار دوره تناوب نیروی اعمالی به دیوارهای الاستیکی از مقدار بهینه تاثیر منفی بر روند بهبود انتقال گرما و کاهش دمای دیواره‌های گرم دارد.

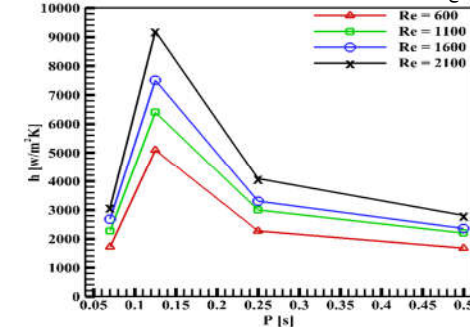
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۹- ضریب انتقال گرما همرفت اجباری در اعداد رینولدز مختلف و بر حسب دوره‌های تناوب نوسان (الف) دامنه ۲۰۰ نیوتن بر متر (ب) دامنه ۴۰۰ نیوتن بر متر (ج) دامنه ۸۰۰ نیوتن بر متر

با افزایش تعداد نوسان دیوارهای الاستیکی اختلاط جریان سیال خیلی سریع اتفاق می‌افتد که موجب می‌شود سیال زمان کافی برای عبور از منبع گرم را نداشته باشد

و سیال گرم در محدوده دیوارهای الاستیکی تجمع پیدا می‌کند و به عنوان لایه مرزی گرمایی عمل می‌کند که دفع گرما از سطوح گرم را کاهش می‌دهد. نتایج ارائه شده در شکل ۹ نشان می‌دهد که ضریب انتقال گرما همرفت با کاهش دوره تناوب در تمامی رینولدزها و

کاتال صلب نام برد.

۴- نمادها

P	دوره تناوب نوسان (s)
T	دما (K)
Δp	اختلاف فشار (Pa)
p	فشار (Pa)
u_i	مولفه سرعت افقی (m/s)
u_z	مولفه سرعت عمودی (m/s)
ρ	چگالی سیال (kg/m^3)
μ	لزجت دینامیکی (Pa.s)
t	زمان (s)
h	ضریب انتقال گرما همرفت اجباری ($W/m^2.K$)
Re	عدد رینولدز
E	مدول الاستیک (MPa)
ν	ضریب پواسن
$\bar{\epsilon}$	تانسور کرنش
λ_L	پارامتر لامه (MPa)
q	شار گرمایی (W/m^2)
α	ضریب پخشندگی گرمایی (m^2/s)
$\bar{\sigma}$	تانسور تنش کوشی
u_s	سرعت جابجایی جامد (m/s)

زیر نویس ها

s	جامد
av	میانگین
in	ورودی
out	خروجی
f	سیال
ref	مرجع
Wall	دیوار

۵- مراجع

- [7] Bouzennada, Tarek, et al. "Numerical study on nanofluid heat transfer and fluid flow within a micro-channel equipped with an elastic baffle." *Case Studies in Thermal Engineering* 56 (2024): 104247.
- [8] Sun X, Ye Z, Li J, Wen K, Tian H. Forced convection heat transfer from a circular cylinder with a flexible fin. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019;128:319-34.
- [9] Ismael MA. Forced convection in partially compliant channel with two alternated baffles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019;142:118455
- [10] Saleh H, Siri Z, Hashim I. Role of fluid-structure interaction in mixed convection from a circular cylinder in a square enclosure with double flexible oscillating fins. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019;161:105080
- [11] Li Z, Xu X, Li K, Chen Y, Huang G, Chen C-I, et al. A flapping vortex generator for heat transfer enhancement in a rectangular airside fin. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018;118:1340-56
- [12] Kundu A, Soti AK, Bhardwaj R, Thompson MC. The response of an elastic splitter plate attached to a cylinder to laminar pulsatile flow. *Journal of Fluids and Structures*. 2017;68:423-43
- [13] Yaseena DT, Ismael MA. Analysis of power law fluid-structure interaction in an open trapezoidal cavity. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022; 201: 106751.
- [14] Ismael MA, Jasim HF. Role of the fluid-structure interaction in mixed convection in a vented cavity. *Int J Mech Sci*. 2017; 135: 190-202. doi: 10.1016/j.ijmeosci.2017.11.001
- [15] sabery A, Sheremet M, Ghalambaz M, Chamkha A, Hashim I. Fluid-structure interaction in natural convection heat transfer in an oblique cavity with a flexible oscillating fin and partial heating. *Applied Thermal Engineering*. 2018;145:80-97
- [16] Shahrestani AB, Alshuraiaan B, Izadi M. Combined natural convection-FSI inside a circular enclosure divided by a movable barrier. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021;126:105426
- [17] Raisi A, Arvin I. A numerical study of the effect of fluid-structure interaction on transient natural convection in an air-filled square cavity. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018;128:1-14
- [18] Selimefendigil F, Öztıp HF. Analysis of MHD mixed convection in a flexible walled and nanofluids filled lid-driven cavity with volumetric heat generation. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016; 122: 15-32.
- [19] Selimefendigil F, Öztıp HF. Forced convection in a branching channel with partly elastic walls and inner L-shaped conductive obstacle under the influence of magnetic field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019;144:118598
- [20] Razavi, Seyed Esmail; anandeh oskuei, hojjat. Investigating the Fluid-Solid Interaction in Incompressible Flow and The Effect of Oscillation Amplitude on Heat Transfer. *Amir Kabir Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 53. Jg., Nr. 9, S. 4747-4772.
- [21] Lopes D, Puga H, Teixeira JC, Teixeira S. Influence of arterial mechanical properties on carotid blood flow: Comparison of CFD and FSI studies. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019;160:209-18
- [22] He X, Wang J. Incomplete fluid-structure coupling mechanism of a flexible membrane wing. *Experiments in Fluids*. 2023;64(4):83.
- [23] Abdalrazak Obaid, A. A., S. E. Razavi, and F. Talati. "Numerical Investigation of Flow Inside a Channel with Elastic Vortex Generator and Elastic Wall for Heat Transfer Enhancement." *Journal of Applied Fluid Mechanics* 17.11 (2024): 2377-2389.
- [1] Soti AK, Bhardwaj R, Sheridan J. Flow-induced deformation of a flexible thin structure as manifestation of heat transfer enhancement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015;84:1070-81.
- [2] Mazharmanesh S, Tian F-B, Lei C. Enhancing heat transfer using flow-induced oscillations of a flexible baffle attached to a vertical heated flat surface. *International Journal of Thermal Sciences*. 2023;194:108604.
- [3] Sabbar WA, Ismael MA, Almudhaffar M. Fluid-structure interaction of mixed convection in a cavity-channel assembly of flexible wall. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018;149:73-83.
- [4] Yaseen D, Ismael M. Structural Mechanics of Flexible Baffle Used in Enhancing Heat Transfer of Power Law Fluids in Channel-Trapezoidal Cavity. *Experimental Techniques*. 2023;47(1):37-46.
- [5] Hakim MA, Ahad AI, Karim AU, Saha S, Hasan MN. Fluid structure interaction and heat transfer enhancement with dynamic flexible flow modulator. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2022;134:105983.
- [6] Al-Amiri A, Khanafer K. Fluid-structure interaction analysis of mixed convection heat transfer in a lid-driven cavity with a flexible bottom wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011;54(17-18):3826-36.