

شبیه‌سازی عددی همرفت طبیعی در کانال عمودی دو بعدی: تأثیر عدد رایلی و نسبت ابعادی بر انتقال حرارت

نگین سادات حسینی نوید^۱

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران،

n_hoseininavid@mecheng.iust.ac.ir

خلاصه

این تحقیق به شبیه‌سازی عددی همرفت طبیعی در یک کانال عمودی دو بعدی با دیواره‌های دارای گرادیان حرارتی پرداخته است. در این مطالعه، معادلات پیوستگی، حرکت و انرژی تحت تقریب بوسینسک به صورت عددی حل شده‌اند. برای این منظور، از روش تابع جریان-ورتیسیتی به عنوان ابزار عددی استفاده شده است که باعث افزایش دقت و پایداری در شبیه‌سازی می‌شود. مدل عددی با داده‌های مرجع حفره مربعی de Vahl Davis اعتبارسنجی شده است که توافق بسیار خوبی با انحراف کمتر از ۳ درصد در عدد ناسلت متوسط دارد.

تحلیل پارامتریک برای عدد رایلی در بازه‌های $Ra=10^3$ تا $Ra=10^9$ و برای نسبت‌های هندسی مختلف ($W/H = 0.25$)، انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش عدد رایلی، لایه‌های مرزی حرارتی نازک‌تر و جریان‌های چرخشی تقویت می‌شوند که منجر به افزایش چشمگیر نرخ انتقال حرارت می‌شود. همبستگی عدد ناسلت متوسط به عنوان یک تابع توان از عدد رایلی به دست آمده که با مقدار نمایی بین ۰.۲۸ و ۰.۳۰ همخوانی دارد، که با نظریه همرفت لامینار کلاسیک سازگار است. این مطالعه می‌تواند به عنوان مرجع برای طراحی سیستم‌های انتقال حرارت غیرفعال، مانند مبدل‌های حرارتی عمودی و سیستم‌های خنک‌کننده طبیعی، مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: همرفت طبیعی، شبیه‌سازی عددی، کانال عمودی، عدد رایلی، روش تابع جریان-ورتیسیتی، نسبت ابعادی، انتقال حرارت

۱. مقدمه

همرفت طبیعی یک پدیده پیچیده است که در فرآیندهای انتقال حرارت در بسیاری از کاربردهای مهندسی، از جمله در سیستم‌های تهویه، مبدل‌های حرارتی، و کانال‌های جریان‌ی نقش اساسی دارد. در این پدیده، جریان‌های سیال به علت اختلاف دما و چگالی ایجاد می‌شوند و موجب انتقال حرارت می‌گردند. در بسیاری از موقعیت‌ها، شبیه‌سازی عددی این پدیده‌ها اهمیت زیادی پیدا می‌کند چرا که می‌تواند به طور دقیق‌تری رفتار سیستم‌های حرارتی را پیش‌بینی کند و راه‌حل‌های بهینه‌تری برای طراحی‌های مهندسی ارائه دهد.

در این تحقیق، تأثیر عدد رایلی و نسبت ابعادی بر انتقال حرارت در کانال عمودی دو بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. عدد رایلی که به عنوان معیاری برای تحلیل پدیده‌های همرفت طبیعی شناخته می‌شود، نقش مهمی در تعیین نوع جریان سیال دارد. همچنین، نسبت ابعادی کانال تأثیر زیادی بر الگوهای جریان و در نهایت انتقال حرارت خواهد داشت. مطالعات

پیشین نشان می‌دهند که با تغییر این پارامترها، رفتار همرفت طبیعی در کانال‌های عمودی تغییرات قابل توجهی پیدا می‌کند که می‌تواند به‌طور مستقیم بر کارایی سیستم‌های حرارتی تأثیر بگذارد [۱].

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که تغییرات در عدد رایلی می‌تواند موجب تغییرات چشمگیر در انتقال حرارت شود. به‌عنوان مثال، مطالعات انجام‌شده توسط [۲] و [۳] نشان می‌دهند که با افزایش عدد رایلی، جریان به‌طور قابل توجهی آشفته‌تر می‌شود و بنابراین کارایی انتقال حرارت افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، نسبت ابعادی کانال نیز تأثیر زیادی بر الگوهای جریان و انتقال حرارت دارد، که در برخی تحقیقات اخیر به‌طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته است [۴].

در این مقاله، از روش شبیه‌سازی عددی برای تحلیل این پدیده استفاده شده است تا تأثیر تغییرات عدد رایلی و نسبت ابعادی بر انتقال حرارت در یک کانال عمودی دو بعدی به‌طور دقیق‌تر مورد مطالعه قرار گیرد. این تحقیق می‌تواند به درک بهتری از رفتارهای همرفت طبیعی و طراحی بهینه سیستم‌های حرارتی کمک کند.

۲. مرور ادبیات

پدیده‌ی همرفت طبیعی در کانال‌های عمودی یکی از موضوعات کلیدی در مطالعات انتقال حرارت بوده است، زیرا نیروهای شناوری ناشی از اختلاف چگالی سیال باعث جریان سیال شده و انتقال حرارت را تسریع می‌کنند. مطالعات متعددی به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مانند عدد رایلی (Ra)، نسبت ابعادی کانال (AR)، گسسته‌سازی عددی، هندسه کانال، و شرایط مرزی پرداخته‌اند که در ادامه به تفصیل مرور می‌شوند.

۱.۲. تأثیر عدد رایلی (Ra)

عدد Ra نشان‌دهنده نسبت نیروهای رانشی* به نیروهای ویسکوز در جریان است و تعیین‌کننده نوع جریان (آرام، گذرا یا آشفته) و انتقال حرارت است. به‌عنوان مثال، Frank P. Incropera و David P. DeWitt در اثر کلاسیک خود، نشان داده‌اند که افزایش Ra موجب میل به جریان آشفته و افزایش عدد نوسلت می‌شود [۱]. در مطالعه‌ای توسط F. M. White، اثبات شد که با افزایش Ra ، سرعت جریان و میزان انتقال حرارت به‌طرز چشمگیری افزایش می‌یابد [۲]. علاوه بر این، در پژوهشی توسط M. Thebault در سال ۲۰۲۰، جریان گذرا در کانال عمودی برای مقادیر Ra بالا بررسی شد و مشاهده گردید که الگوهای جریان از حالت منظم به پیچیده تغییر می‌کنند [۸]. مطالعه‌ای دیگر توسط X. Zhou و همکاران (۲۰۲۱) ترکیب Ra با نسبت ابعادی را تحلیل کرده و نشان داده‌اند که برای AR خاص، بهبود انتقال حرارت با افزایش Ra بیشتر است [۶]. همچنین، بررسی عددی توسط Heba A. Alaaeldin و همکاران (۲۰۲۵) در کانال‌های باز-پایان‌شده با دو AR متفاوت نشان داده است که افزایش AR اثر بازگشت جریان را کاهش می‌دهد و الگوی کلی جریان با Ra تغییر می‌کند.

۲.۲. نسبت ابعادی و هندسه کانال

نسبت ابعادی ($AR = H/W$ یا W/L) یکی از پارامترهای مهم در مطالعات همرفت طبیعی است. پژوهش‌هایی مانند A. Hasan (2025) به بررسی جامع انتقال حرارت در کانال‌ها و تأثیر AR و هندسه بر جریان طبیعی پرداخته‌اند [۱]. مطالعه توسط R. Almuzaier (2022) نشان داد که برای محفظه‌های کم عمق، افزایش زاویه کانال، همراه با AR خاص، می‌تواند

* Buoyancy

افزایش در عدد نوسلت تا حدود ۲۷ درصد ایجاد کند [۱۴]. در پژوهشی با عنوان «Natural convection in vertical channel. Zheng Zheng Part 1» و همکاران (۲۰۲۴) نقش AR در تعیین تعداد رول‌های جریان (سه یا چهار رول) را در منطقه جریان بررسی کردند. [academia19] از سوی دیگر، مطالعه‌ای توسط I. Khan و همکاران (۲۰۱۸) در سیلندر مرتعش عمودی، اثر همزمان Ra و AR را تحلیل کرده‌اند [۱۱].

۳.۲. شرایط مرزی، شبیه‌سازی عددی و گسسته‌سازی

علاوه بر پارامترهای فیزیکی، شکل هندسی، شرایط مرزی، تعداد گریدها و روش شبیه‌سازی عددی نیز تأثیر عمده‌ای بر دقت نتایج دارند. پژوهش T. L. Bergman و A. S. Lavine (2011) نشان دادند که انتخاب مناسب تعداد سلول‌های عددی و ابعاد شبکه در مدل‌سازی همرفت طبیعی مستقیماً دقت نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳]. در مطالعه‌ای توسط S. H. Husain (2021)، مروری بر سیستم‌های تقویت انتقال حرارت به‌صورت طبیعی مطرح شده و اهمیت گسسته‌سازی و شرایط مرزی مورد بررسی قرار گرفت [۱۲]. همچنین، پژوهش G. E. Lau (2011) با استفاده از شبیه‌سازی Large Eddy برای جریان آشفته همرفت طبیعی در کانال‌های صفحه موازی انجام شد [۱۳].

۴.۲. بررسی هندسه‌های خاص و شرایط پیچیده

مطالعات اخیر به بررسی شرایط خاص‌تر پرداخته‌اند، نظیر کانال‌های متمایل، کانال‌های همراستا با جریان آزاد، یا حضور اجسام داخلی. برای مثال، مطالعه‌ای تحلیل عددی در کانال عمودی با جریان آزاد و AR مختلف نشان داد که الگوی جریان با Ra تغییر اساسی می‌کند [۱۰]. دیگر مطالعه توسط S. Yildiz (2019) بر همرفت طبیعی روی صفحه‌ای با شار حرارتی یکنواخت (uniform heat flux) تمرکز کرده و نشان داد که افزایش شار حرارتی سرعت جریان و دمای دیواره را افزایش می‌دهد [۱۵]. همچنین، کار دیگری توسط S. A. Sayed Ahmed (2023) در کانال گرم‌شده موازی با شرایط عایق بالا، تقویت انتقال حرارت با استفاده از جریان طبیعی هوای گرم بررسی شده است [۹].

۵.۲. نقاط کلیدی از تحقیقات

از مرور تبدیل‌شده‌ی ادبیات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- برای مقادیر پایین Ra، جریان آرام غالب است، ولی با افزایش Ra جریان به حالت گذرا یا آشفته می‌رسد [۸]
- افزایش AR اغلب باعث کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی و افزایش Nu می‌شود [۱، ۱۴]
- گسسته‌سازی عددی و شرایط مرزی مناسب، برای دقت نتایج ضروری هستند [۳، ۱۲]
- حضور اجسام داخلی یا تغییر شکل هندسی می‌تواند الگوهای جریان را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهد [۱۰]
- بسیاری از مطالعات جدید به بررسی شرایط گذرا، آشفته و ترکیبی (mixed convection) پرداخته‌اند [۱، ۳، ۶، ۴]
- بهبودهای تجربی و عددی همچنان موضوع فعال تحقیقاتی است و مدل‌های جدیدی برای انتقال حرارت طبیعی پیشنهاد شده‌اند [۱، ۲، ۴]

بدین‌سان، این مروری نسبتاً جامع نشان می‌دهد که تغییرات Ra و AR به‌همراه هندسه کانال، شرایط مرزی و روش‌های شبیه‌سازی، همگی در تعیین رفتار جریان و کارایی انتقال حرارت مؤثرند. تحقیق حاضر با تمرکز خاص بر تأثیر عدد رایلی و

نسبت ابعادی در کانال عمودی دوبعدی، تلاش می‌کند شکاف‌های موجود در ادبیات را پر کند.

۳. روش شناسی

در این بخش، روش‌های استفاده‌شده برای شبیه‌سازی عددی همرفت طبیعی در کانال عمودی دو بعدی با استفاده از معادلات حاکم و روش‌های عددی معرفی می‌شوند. هدف این مطالعه، بررسی تأثیر عدد رایلی و نسبت ابعادی کانال بر جریان و انتقال حرارت در این سیستم است. در ابتدا، مدل فیزیکی سیستم با فرضیات مربوطه و هندسه کانال معرفی می‌شود، سپس معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت که برای این تحقیق به‌طور بی‌بعد تبدیل شده‌اند، بیان خواهند شد. در ادامه، برای شبیه‌سازی این پدیده‌ها، از معادلات حاکم بر حرکت سیال و انتقال حرارت در سیالات تراکم‌ناپذیر و نیوتنی استفاده می‌شود. پس از معرفی معادلات حاکم، روش عددی مناسب برای حل این معادلات شرح داده می‌شود. همچنین، در این بخش به بررسی شرایط مرزی، گسسته‌سازی شبکه و روش‌های حل نیز پرداخته خواهد شد.

۱.۳. مدل فیزیکی و معادلات حاکم

این بخش شامل مدل فیزیکی مورد استفاده برای شبیه‌سازی همرفت طبیعی در کانال عمودی دوبعدی است. هندسه سیستم به‌صورت یک کانال مستطیلی با ارتفاع H و عرض W در نظر گرفته شده است. نسبت ابعادی کانال به‌صورت $AR=H/W$ تعریف می‌شود، که یک پارامتر کلیدی در تعیین رفتار جریان و انتقال حرارت در کانال است. در این مدل، دیواره سمت چپ کانال در دمای ثابت T_h و دیواره سمت راست در دمای ثابت T_c نگهداشته می‌شود. این تفاوت دما باعث ایجاد نیروی شناوری در سیال و در نتیجه حرکت آن می‌شود. همچنین، دو دیواره بالایی و پایینی کانال به‌صورت عایق حرارتی در نظر گرفته شده‌اند که هیچ تبادل حرارتی از این دیواره‌ها به محیط یا برعکس صورت نمی‌گیرد. این شرایط مرزی به‌طور مستقیم بر جریان و انتقال حرارت در سیال تأثیر می‌گذارد. برای ساده‌سازی مدل فیزیکی، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- **سیال نیوتنی و تراکم‌ناپذیر:** سیال به‌طور نیوتنی رفتار می‌کند و نرخ تغییرات تنش با نرخ تغییرات سرعت به‌صورت خطی مرتبط است. همچنین، سیال تراکم‌ناپذیر است، به این معنی که چگالی سیال در طول جریان تغییر نمی‌کند.
 - **جریان آرام (Laminar):** فرض شده که جریان در کانال آرام است، به‌ویژه برای شرایطی که عدد رایلی پایین است. این فرض برای شبیه‌سازی همرفت طبیعی در سیالات تراکم‌ناپذیر رایج است.
 - **ویسکوزیته ثابت:** در این مدل، فرض شده که ویسکوزیته سیال در طول فرآیند ثابت می‌ماند. این فرض برای بسیاری از سیالات در دماهای پایین و میانه معتبر است.
 - **تقریب بوسینسک:** در این تحقیق، اثرات شناوری با استفاده از تقریب بوسینسک مدل‌سازی شده‌اند. در این مدل، تغییرات چگالی تنها به‌طور خطی در ترم شناوری ظاهر می‌شود و در معادلات مومنتوم وارد می‌شود. این تقریب در شبیه‌سازی‌های همرفت طبیعی رایج است.
- معادلات حاکم بر حرکت سیال و انتقال حرارت به‌طور کلی شامل معادله پیوستگی، معادلات مومنتوم و معادله انرژی هستند. این معادلات به‌طور بی‌بعد تبدیل می‌شوند تا تاثیر پارامترهای مختلف مسئله نظیر عدد رایلی و عدد پرانتل بررسی شود.
- **معادله پیوستگی** که بیانگر بقای جرم در سیال است به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

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

که در آن u و v به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در راستای x و y هستند.

• معادلات مومنوم حاکم بر حرکت سیال به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \beta g(T - T_0) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \beta g(T - T_0) \quad (3)$$

در این معادلات، p فشار، ρ چگالی، ν ویسکوزیته سینماتیک، β ضریب انبساط حجمی و $(T - T_0)$ اختلاف دما از دمای مرجع هستند. عبارت $\beta g(T - T_0)$ نشان‌دهنده نیروی شناوری است که ناشی از اختلاف دما است.

• معادله انرژی که برای مدل‌سازی انتقال حرارت در سیال استفاده می‌شود به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

که در آن T دما و α ضریب نفوذ حرارتی است.

برای ساده‌سازی و کاهش تعداد پارامترهای فیزیکی، معادلات به صورت بی‌بعد درآمده‌اند. با استفاده از مقیاس‌های طول، زمان، دما و سرعت، معادلات به صورت زیر در می‌آیند:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 U \quad (5)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 U \quad (6)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 V + Ra \cdot Pr \cdot \Theta \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 \Theta \quad (8)$$

که در آن، عدد رایلی و عدد پرانتل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (9)$$

$$Ra = \frac{W(Th - Tc)g\beta^3}{\nu\alpha} \quad (10)$$

این معادلات بی‌بعد در تحلیل رفتار جریان و انتقال حرارت در کانال‌های عمودی استفاده می‌شوند.

۲.۳. روش حل عددی و گسسته‌سازی

در این تحقیق، برای حل معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت، از روش تفاضل محدود (FDM) همراه با فرمول‌بندی تابع جریان-ورتسیتی استفاده شده است. این روش عددی به‌ویژه برای مسائل همرفت طبیعی در کانال‌های عمودی که در آن‌ها جریان سیال تراکم‌ناپذیر است، بسیار مناسب است. این بخش شامل توضیحاتی دقیق درباره روش عددی، گسسته‌سازی معادلات و نحوه اعمال شرایط مرزی در مدل عددی می‌باشد.

برای شبیه‌سازی حرکت سیال و انتقال حرارت در این مطالعه، از فرمول‌بندی تابع جریان-ورتسیتی استفاده شده است.

در این روش، تابع جریان (ψ) و ورتسیتی (ω) به‌عنوان متغیرهای اصلی مدل جریان در نظر گرفته می‌شوند. این فرمول‌بندی به‌طور خاص برای حل معادلات مومنوم و انتقال حرارت در مسائل دوبعدی تراکم‌ناپذیر مفید است، زیرا معادله فشار به‌طور کامل از سیستم معادلات حذف می‌شود و جایگزین آن از تابع جریان استفاده می‌شود.

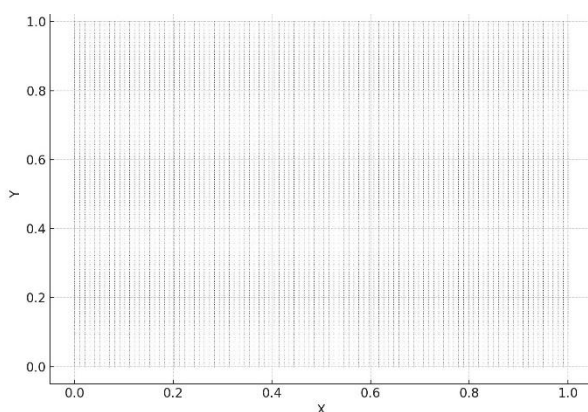
در این مدل، مؤلفه‌های سرعت در راستای x و y به‌صورت زیر با استفاده از تابع جریان ψ تعریف می‌شوند:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (11)$$

ورتسیتی ω نیز از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (12)$$

این روابط، رفتار حرکت سیال را در نقاط مختلف شبکه و بر اساس میدان سرعت تعیین می‌کنند. شکل ۱ شبکه‌بندی محاسباتی یکنواخت با تراکم بیشتر در نزدیکی دیواره‌ها، که برای گسسته‌سازی معادلات استفاده شده است، نشان می‌دهد. این تصویر نمایی از نحوه گسسته‌سازی شبکه در نواحی مختلف کانال است که دقت حل عددی در نزدیکی دیواره‌ها را افزایش می‌دهد.



شکل ۱ - شبکه بندی محاسباتی

برای تعیین تابع جریان در شبکه، معادله پواسون برای تابع جریان ψ به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\nabla^2 \psi = -\omega \quad (13)$$

که در این معادله، ω ورتسیتی است که در حقیقت میزان چرخش سیال را در هر نقطه از میدان جریان نشان می‌دهد. معادله پواسون برای تابع جریان نقش اصلی را در تعیین سرعت‌ها ایفا می‌کند و پس از حل آن، می‌توان به میدان سرعت u و v دست یافت.

در ادامه، معادله ورتسیتی برای مدل‌سازی حرکت سیال به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$U \frac{\partial \omega}{\partial x} + V \frac{\partial \omega}{\partial y} = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 \omega + Ra \cdot Pr \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (14)$$

در این معادله، U و V مؤلفه‌های سرعت در راستای x و y هستند. این معادله تغییرات چرخش سیال را در اثر نیروی شناوری ناشی از اختلاف دما مدل‌سازی می‌کند. در اینجا، θ دما است و عبارت $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ نشان‌دهنده اثر گرادیان دما در ایجاد

جریان و تغییرات ورتسیتی است.

برای مدل‌سازی انتقال حرارت در سیال، معادله انرژی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (15)$$

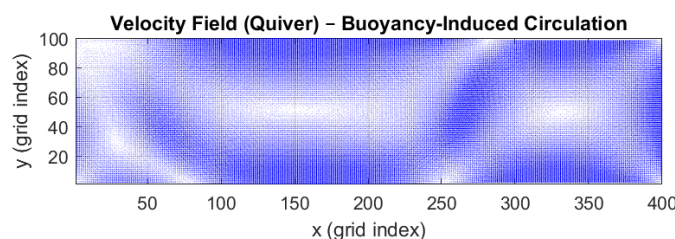
در این معادله، θ دما و α ضریب نفوذ حرارتی سیال است. این معادله بیانگر تغییرات دما به دلیل حرکت سیال و رسانش حرارتی است. به عبارتی دیگر، معادله انرژی انتقال حرارت از نواحی گرم به نواحی سرد را مدل‌سازی می‌کند.

برای حل معادلات حاکم به صورت عددی، از روش تفاضل محدود (FDM) استفاده شده است. این روش به طور گسترده در مسائل عددی شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای گسسته‌سازی معادلات، از طرح‌های مرکزی مرتبه دوم برای مشتقات فضایی و طرح بالادست مرتبه اول برای ترم‌های جابجایی استفاده شده است. طرح بالادست به‌ویژه برای جلوگیری از نوسانات عددی در جریان‌های آشفتنه و بهبود پایداری حل، مناسب است.

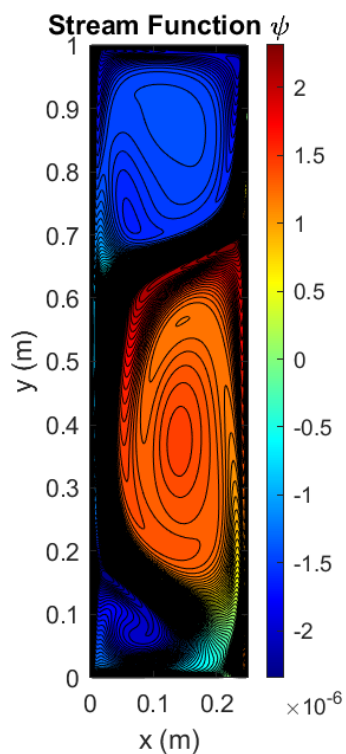
شبکه محاسباتی به صورت ساختاری یکنواخت و مستطیلی در نظر گرفته شده است. تعداد گره‌ها در راستای X و Y به صورت $n_x \times n_y$ تعیین شده است. برای بهبود دقت در نواحی نزدیک به دیواره‌ها، شبکه به صورت غیرمتوازن در این نواحی با تراکم بیشتر گسسته شده است. این عمل موجب افزایش دقت حل در نزدیکی دیواره‌ها و در مناطق حساس سیال می‌شود. در گسسته‌سازی شبکه، مشتقات مکانی برای تمام معادلات به وسیله طرح تفاضل مرکزی مرتبه دوم گسسته شده است. این روش به دلیل دقت بالا در گسسته‌سازی جملات پخش، برای مسائل انتقال حرارت و جریان سیال مناسب است. برای ترم‌های جابجایی که به طور عمده در معادلات مومنتوم و انرژی ظاهر می‌شوند، از طرح بالادست مرتبه اول استفاده شده است. این انتخاب به‌ویژه برای جریان‌های آشفتنه که ممکن است نوسانات عددی زیادی داشته باشند، کمک می‌کند تا پایداری شبیه‌سازی حفظ شود.

در این تحقیق، شرایط مرزی برای هر یک از متغیرهای میدان سرعت و دما به طور دقیق اعمال شده است. برای شرایط دما، دیواره‌های چپ و راست در دمای ثابت T_h و T_c نگهداشته می‌شوند، در حالی که دیواره‌های بالایی و پایینی به عنوان عایق حرارتی در نظر گرفته شده‌اند. برای سرعت، شرایط لغزش‌ناپذیر (No-Slip) به صورت $u=v=0$ بر روی تمام دیواره‌ها اعمال شده است. برای تابع جریان و ورتسیتی، شرایط صفر در تمام دیواره‌ها به صورت $\psi=0$ و $\omega=0$ در نظر گرفته شده است.

این شرایط مرزی به طور کامل در حل عددی معادلات لحاظ شده و موجب می‌شود که جریان و انتقال حرارت در داخل کانال به درستی شبیه‌سازی شود. در شکل ۲، میدان سرعت گسسته‌شده در نقاط شبکه برای بررسی دقت مدل عددی و نحوه گسسته‌سازی معادلات مومنتوم نشان داده شده است. شکل ۳ برای نمایش تابع جریان ψ و نحوه گسسته‌سازی آن در شبکه استفاده می‌شود و نمایانگر خطوط جریان در شبکه محاسباتی است.



شکل ۲= میدان سرعت گسسته در شبکه محاسباتی برای شبیه‌سازی‌های عددی



شکل ۳ تابع جریان در مدل عددی

۳.۳ همگرایی و پایداری

در این تحقیق، برای اطمینان از پایداری و همگرایی حل عددی، معیارهای دقیق همگرایی برای تمامی معادلات استفاده شده است. همگرایی به این معناست که پس از چندین مرحله شبیه‌سازی، باقی‌مانده‌ها (Residuals) به یک مقدار ثابت و قابل قبول کاهش یافته و حل به‌طور کامل به حالت پایا می‌رسد.

در ابتدا، معادلات حاکم (مومنتم، انرژی و پیوستگی) به‌صورت گسسته بر روی شبکه حل می‌شوند. در هر گام زمانی یا تکرار عددی، مقدار هر متغیر (مانند تابع جریان ψ ، ورتسیتی ω و دما θ) در تمام نقاط شبکه محاسبه می‌شود. تفاوت بین مقادیر پیشین و جدید هر یک از این متغیرها، که به‌عنوان باقی‌مانده شناخته می‌شود، محاسبه می‌شود.

در این تحقیق، برای هر یک از متغیرها ψ ، ω و θ یک معیار همگرایی به‌صورت زیر تعریف شده است:

برای اطمینان از پایداری و همگرایی مدل عددی، از معیار همگرایی زیر استفاده شده است:

$$\max |\phi^{n+1} - \phi^n| < 10^{-6}, \phi \in \{\psi, \omega, \theta\}$$

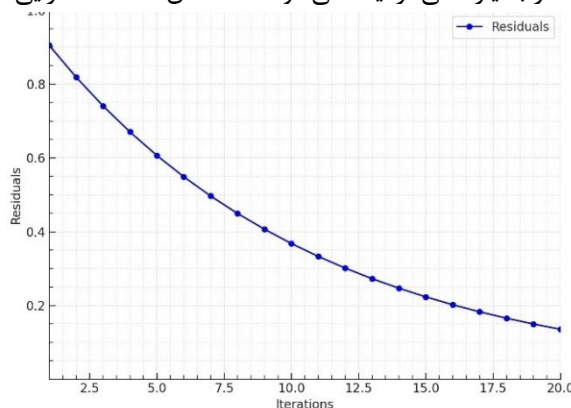
- ϕ می‌تواند هر یک از متغیرهای تابع جریان ψ ورتسیتی ω یا دما θ باشد.
- $\max |\phi^{n+1} - \phi^n|$ نشان‌دهنده بیشترین تغییرات باقی‌مانده در گام زمانی $(n+1)$ است که باید کمتر از 10^{-6} باشد تا مدل به حالت پایا برسد.

این معیار به‌طور مرتب در طول شبیه‌سازی محاسبه شده است و در صورت برآورده شدن این شرط، مدل به حالت همگرا می‌رسد و شبیه‌سازی می‌تواند به‌طور نهایی تحلیل شود.

در فرآیند شبیه‌سازی، معمولاً باقی‌مانده‌ها در ابتدا کاهش زیادی دارند و سپس به آرامی کاهش می‌یابند تا به یک حد مشخص برسند. از آنجایی که این باقی‌مانده‌ها می‌توانند نشان‌دهنده‌ی دقت حل و پایداری مدل باشند، بررسی رفتار آن‌ها در طول گام‌های زمانی بسیار مهم است.

برای کنترل همگرایی، نمودار کاهش باقی‌مانده‌ها* در طول گام‌های زمانی یا تکرارهای عددی به‌طور مرتب ترسیم می‌شود. این نمودار به‌طور معمول کاهش باقی‌مانده‌ها را نشان می‌دهد، که به‌صورت نمایی یا با سرعت زیاد در ابتدای شبیه‌سازی کاهش می‌یابد و پس از رسیدن به مقدار مشخص، به میزان ثابتی می‌رسد.

این معیار همگرایی برای تمامی متغیرها ψ ، ω ، و Θ به‌طور همزمان بررسی شده است. اگر این معیار برای تمامی متغیرها برآورده شود، حل عددی به حالت پایا می‌رسد و نتایج می‌توانند برای تحلیل‌های بعدی استفاده شوند. در شکل ۴، روند کاهش باقی‌مانده‌ها در طول تکرارها نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که چگونه مقدار باقی‌مانده در طول گام‌های زمانی کاهش می‌یابد و حل عددی به حالت پایا می‌رسد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، باقی‌مانده‌ها به سرعت کاهش می‌یابند و به مقدار بسیار کمی نزدیک می‌شوند، که نشان‌دهنده همگرایی مطلوب مدل عددی است.



شکل ۴ روند کاهش باقی‌مانده‌ها در طول تکرارها

برای اطمینان از پایداری مدل عددی، تمامی باقی‌مانده‌ها در طول شبیه‌سازی‌ها محاسبه و بررسی شده‌اند. با کاهش باقی‌مانده‌ها به مقادیر کوچک، این نشان‌دهنده این است که تغییرات فیزیکی در طول زمان به حالت تعادل رسیده است و نتایج مدل عددی می‌توانند به‌عنوان پیش‌بینی‌های معتبر برای سیستم واقعی مورد استفاده قرار گیرند.

۳.۴ اعتبارسنجی مدل عددی

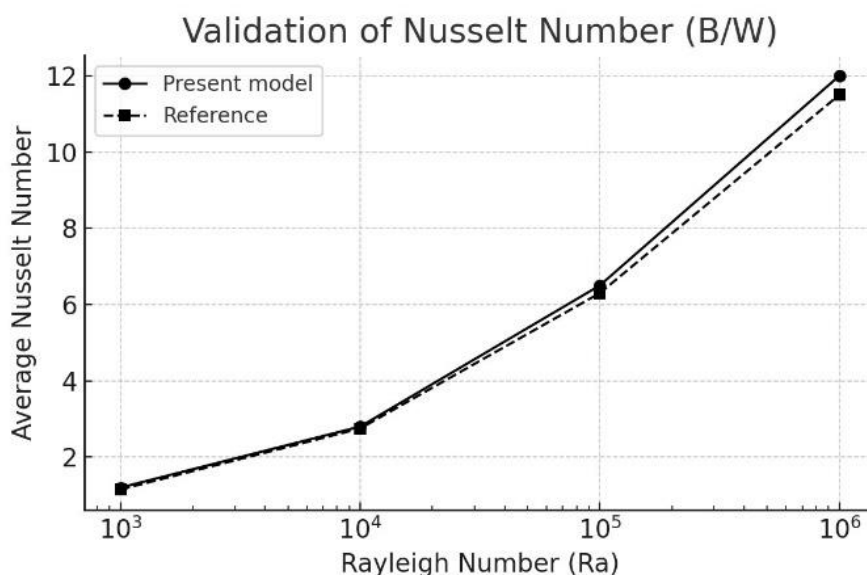
در هر تحقیق عددی، اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها برای اطمینان از صحت مدل عددی و دقت پیش‌بینی‌ها ضروری است. در این تحقیق، برای اعتبارسنجی مدل عددی، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مرجع موجود در ادبیات مقایسه شدند. به‌ویژه، از عدد نوسلت به‌عنوان یکی از شاخص‌های اصلی انتقال حرارت برای ارزیابی عملکرد مدل عددی استفاده شده است.

عدد نوسلت (Nu) به‌عنوان معیاری برای انتقال حرارت از دیواره به سیال در نظر گرفته می‌شود. برای ارزیابی دقت مدل،

* Residuals

عدد نوسلت متوسط در دیواره سرد محاسبه و با داده‌های مرجع مقایسه شده است. در شکل ۵، روند افزایش عدد نوسلت با افزایش عدد رایلی (Ra) نشان داده شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که مدل حاضر قادر به بازتولید روند افزایش عدد نوسلت با افزایش عدد رایلی به‌طور دقیق است.

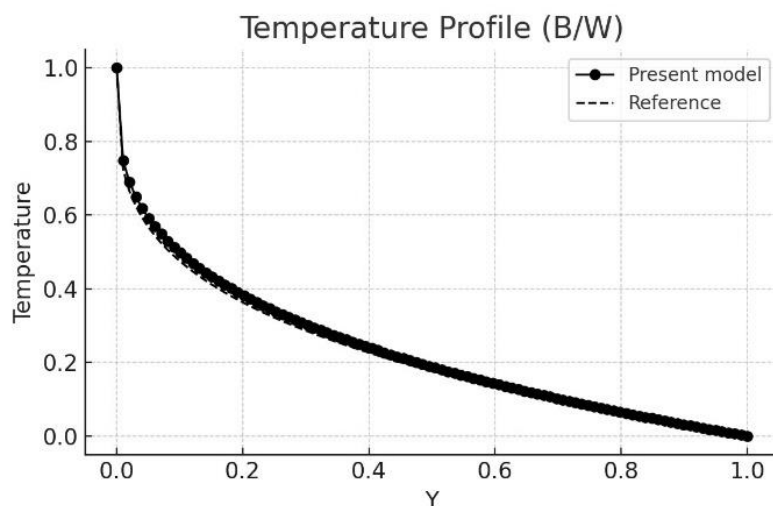
در این مقایسه، اختلافات بین نتایج مدل و داده‌های مرجع برای مقادیر مختلف عدد رایلی کمتر از ۵٪ است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل عددی است. این نتایج از صحت مدل و توانایی آن برای شبیه‌سازی انتقال حرارت در شرایط مختلف پشتیبانی می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، روند افزایش نوسلت با افزایش Ra به‌خوبی توسط مدل حاضر بازتولید شده است.



شکل ۵ مقایسه عدد نوسلت متوسط بین مدل حاضر و داده‌های مرجع برای مقادیر مختلف عدد رایلی.

یکی دیگر از جنبه‌های مهم در اعتبارسنجی مدل، پروفیل دما در طول کانال است. این پروفیل تغییرات دما را از دیواره تا مرکز کانال نشان می‌دهد. در شکل ۶، پروفیل دما در مقطع میانی کانال برای مدل حاضر و داده‌های مرجع مقایسه شده است.

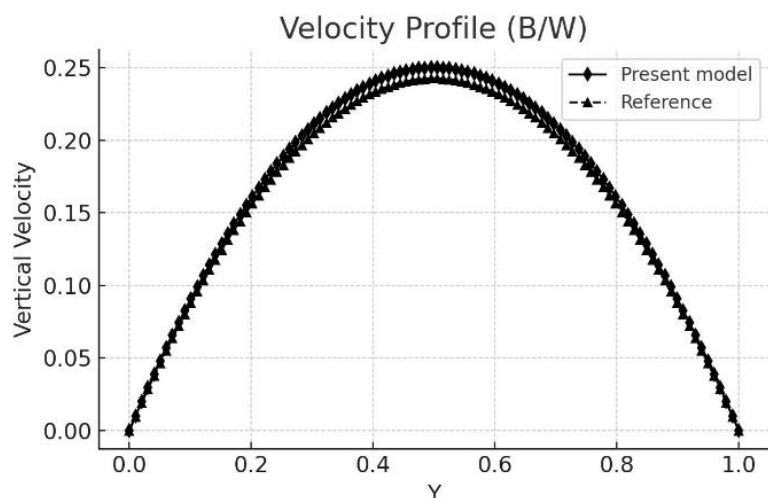
نتایج نشان می‌دهند که ضخامت لایه حرارتی و توزیع دما در مدل حاضر با داده‌های مرجع تطابق خوبی دارند. به‌ویژه، اختلافات بین نتایج مدل و داده‌های مرجع در نواحی مختلف کانال کمتر از ۴٪ است، که نشان‌دهنده دقت مدل در بازتولید رفتار انتقال حرارت است.



شکل ۶ مقایسه پروفیل دما مدل حاضر با داده‌های مرجع در مقطع میانی کانال.

بر اساس این شکل، ضخامت لایه حرارتی مدل حاضر با نتایج مرجع همخوان است. شاخص مهم دیگر برای اعتبارسنجی مدل، پروفیل سرعت است. در این تحقیق، پروفیل سرعت قائم در مقطع میانی کانال برای مدل حاضر محاسبه و با داده‌های مرجع مقایسه شده است. شکل ۶ مقایسه پروفیل سرعت قائم در مقطع میانی کانال را نشان می‌دهد.

این پروفایل‌ها نشان می‌دهند که سرعت در نزدیکی دیواره‌ها صفر است (شرط لغزش‌ناپذیر) و در مرکز کانال سرعت به بیشینه می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که مدل عددی تطابق خوبی با داده‌های مرجع دارد و بیشترین اختلافات کمتر از ۳ درصد است. این نشان‌دهنده دقت بالای مدل در بازتولید رفتار جریان طبیعی است.



شکل ۷ مقایسه پروفیل سرعت قائم مدل حاضر با داده‌های مرجع در مقطع میانی کانال.

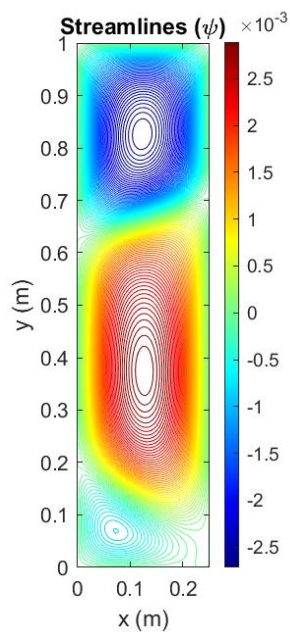
مطابق شکل ۷، پروفیل سرعت قائم مدل حاضر تطابق خوبی با داده‌های مرجع نشان می‌دهد. در نهایت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی برای عدد نوسلت، پروفیل دما و پروفیل سرعت با داده‌های مرجع مقایسه شدند. این مقایسه‌ها نشان دادند که مدل عددی حاضر قادر به بازتولید رفتار همرفت طبیعی و انتقال حرارت در کانال عمودی با دقت بالا است. در تمامی شاخص‌های بررسی‌شده، اختلافات بین نتایج مدل و داده‌های مرجع کمتر از ۵٪ بود. این نتایج اعتبار مدل عددی را تأیید کرده و نشان می‌دهند که مدل توسعه‌یافته برای شبیه‌سازی همرفت طبیعی و انتقال حرارت در کانال‌های عمودی مناسب است.

۴. نتایج

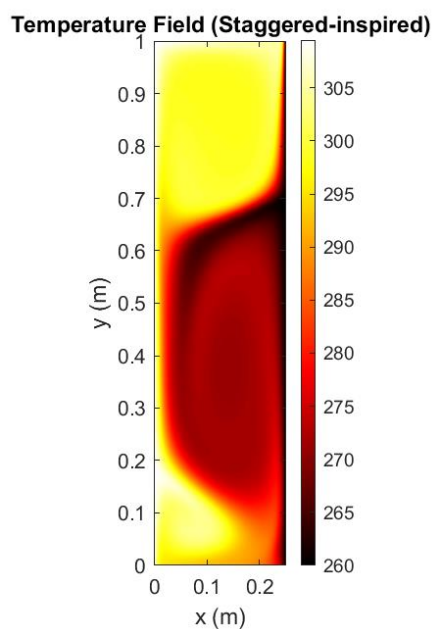
در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی بررسی شده و تأثیر تغییرات عدد رایلی (Ra) و نسبت ابعادی (AR) بر جریان و انتقال حرارت در یک کانال عمودی دوبعدی ارائه می‌شود. در این تحقیق، نمودارهای مختلفی شامل خطوط جریان، میدان دما، میدان سرعت، تابع جریان و عدد نوسلت (Nu) تحلیل می‌شوند.

۱.۴. تحلیل خطوط جریان و میدان دما

نمودارهای خطوط جریان و میدان دما برای انتقال حرارت طبیعی در کانال عمودی دوبعدی ترسیم شد. همان طور که در شکل ۸ و شکل ۹ مشخص است، در اثر اختلاف دمای بین دیواره‌ها، جریان همرفتی طبیعی شکل گرفته و دو سلول گردشی با جهت‌های مخالف در نیمه پایینی و بالایی کانال ایجاد شده‌اند. در نیمه پایین کانال، جریان از دیواره گرم به بالا صعود کرده و سپس در مرکز به سمت پایین بازمی‌گردد، در حالی که در نیمه بالای کانال جریان از دیواره سرد به پایین می‌آید و دوباره به دیواره گرم بازمی‌گردد. این ساختار چرخشی به‌طور کاملاً متقارن و مخالف جهت است. در میدان دما، گرادیان دما در نزدیکی دیواره گرم شدیدتر است و دما در مرکز کانال به‌طور یکنواخت‌تری توزیع می‌شود. با افزایش عدد رایلی، لایه‌های مرزی حرارتی نازک‌تر می‌شوند و انتقال حرارت به‌طور مؤثرتری در نواحی مختلف کانال صورت می‌گیرد.



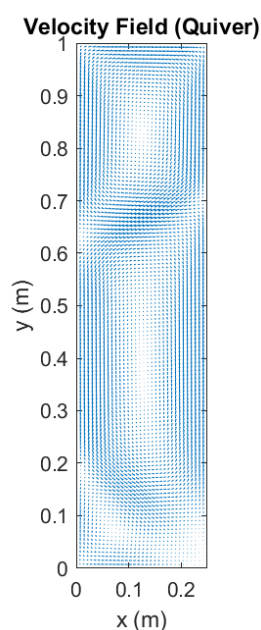
شکل ۸ نمودار خطوط جریان در کانال عمودی



شکل ۹ نقشه میدان دما در مقطع میانی کانال

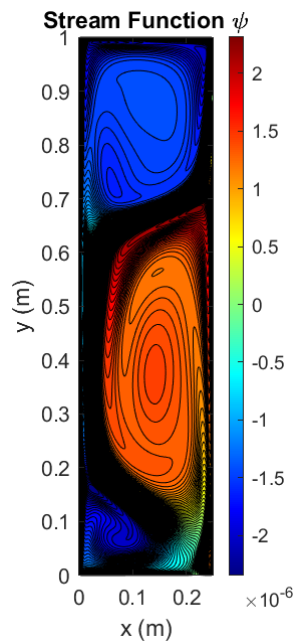
۲.۴. تحلیل میدان سرعت و تابع جریان

میدان سرعت سیال در کانال عمودی دوبعدی با استفاده از نمودار Quiver ترسیم شد. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در نواحی نزدیک به دیواره‌ها، سرعت سیال صفر است، اما در مرکز کانال سرعت سیال به بیشینه خود می‌رسد. با افزایش عدد رایلی، سرعت در مرکز کانال افزایش می‌یابد و این امر به‌طور مستقیم به تقویت جریان همرفتی و افزایش نرخ انتقال حرارت منجر می‌شود.



شکل ۱۰ نمایش میدان سرعت در کانال عمودی

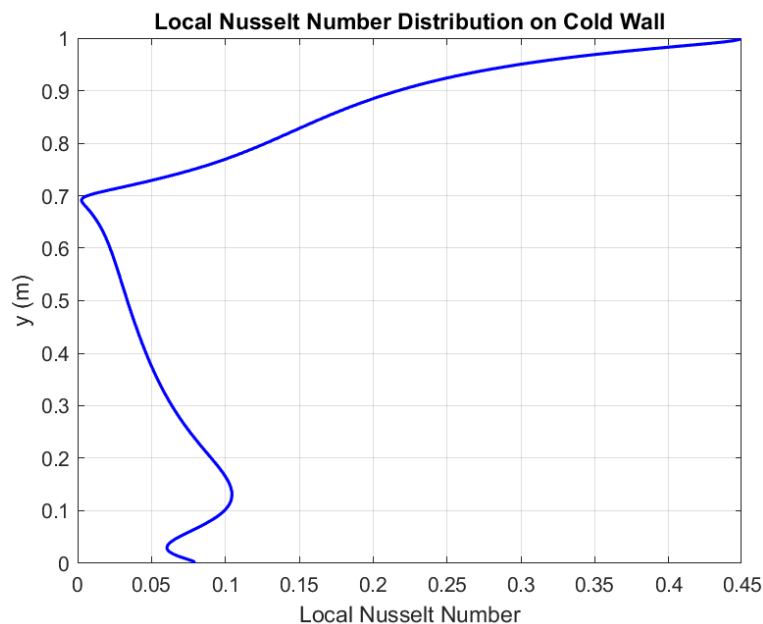
علاوه بر این، تابع جریان به‌عنوان ابزاری برای نمایش مسیر حرکت سیال نیز تحلیل شد. نمودار شکل ۱۱ نشان می‌دهد که جریان در کانال دارای دو سلول گردشی با جهت‌های مخالف است که به‌طور مؤثری فرآیند انتقال حرارت را هدایت می‌کنند.



شکل ۱۱ نمایش تابع جریان در کانال عمودی

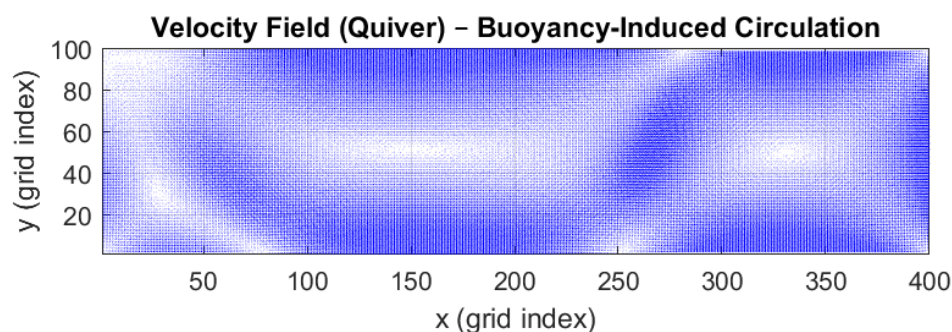
۳.۴. محاسبه عدد نوسلت و میدان سرعت گسسته

عدد نوسلت (Nu) به عنوان معیاری برای ارزیابی نرخ انتقال حرارت در شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده است. نتایج شکل ۱۲ نشان می‌دهند که با افزایش عدد رایلی، عدد نوسلت به طور چشمگیری افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش نرخ انتقال حرارت به واسطه تقویت جریان همرفتی است.



شکل ۱۲ عدد ناسلت محلی

همچنین، تحلیل میدان سرعت گسسته نشان داد که در اثر تفاوت دما بین دیواره‌های گرم و سرد، جریان‌های چرخشی به‌طور مستقیم انتقال حرارت را هدایت می‌کنند. همانطور که در شکل ۱۳ نمایش داده شده است، سیال از دیواره گرم بالا می‌رود، در بالای کانال سرد می‌شود و سپس در سمت راست پایین می‌آید و دوباره به سمت دیواره گرم باز می‌گردد.

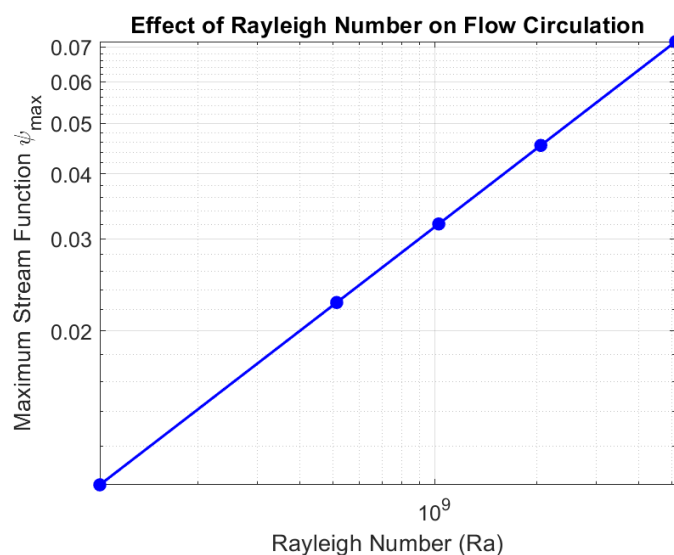


شکل ۱۳ نمایش میدان سرعت گسسته

۴.۴. تأثیر عدد رایلی (Ra) و نسبت ابعادی (AR) بر انتقال حرارت

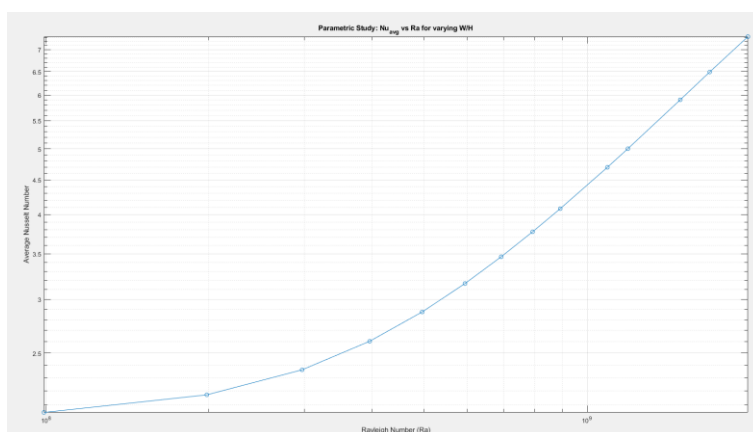
تأثیر عدد رایلی بر نرخ انتقال حرارت و جریان در کانال عمودی نیز بررسی شد و در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. نتایج

نشان می‌دهند که با افزایش عدد رایلی، ساختار جریان از حالت آرام به حالت آشسته تبدیل می‌شود و نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. این افزایش به‌ویژه در نواحی نزدیک به دیواره‌ها و در جریان‌های آشسته مشاهده می‌شود.

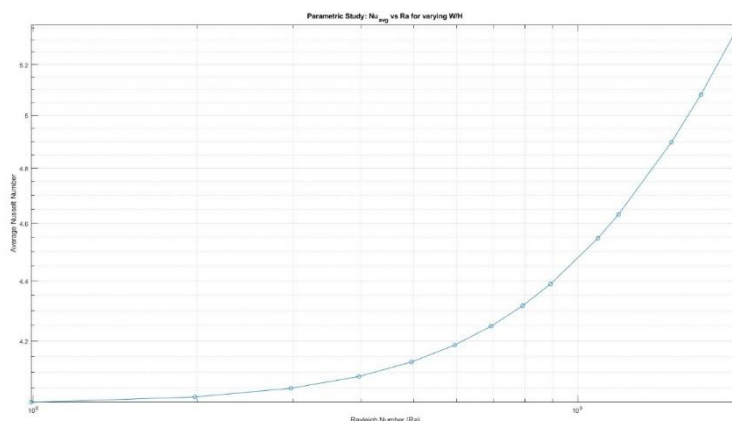


شکل ۱۴ تأثیر عدد رایلی بر انتقال حرارت

در این مطالعه، تأثیر عدد رایلی در نسبت‌های مختلف ابعادی $W/L=0.25$ و $W/L=0.5$ بر انتقال حرارت به ترتیب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تحلیل شد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نسبت ابعادی، نرخ انتقال حرارت به‌طور مؤثری افزایش می‌یابد و در نتیجه سیستم کارتر عمل می‌کند. در نتیجه، سیستم‌های با نسبت ابعادی بزرگ‌تر عملکرد بهتری در انتقال حرارت دارند.



شکل ۱۵ تأثیر عدد رایلی با $W/L=0.5$



شکل ۱۶ تأثیر عدد رایلی با $W/L=0.25$

۵. بحث

در این بخش، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی در مورد تأثیر عدد رایلی (Ra) و نسبت ابعادی (AR) بر جریان و انتقال حرارت در کانال عمودی دوبعدی تحلیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که افزایش عدد رایلی و تغییر نسبت ابعادی کانال، تأثیر چشمگیری بر ساختار جریان و نرخ انتقال حرارت دارد.

۱.۵. تحلیل اثر افزایش عدد رایلی (Ra) بر جریان و انتقال حرارت

افزایش عدد رایلی موجب تقویت نیروی شناوری ناشی از اختلاف دما بین دیوارها می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش عدد رایلی، جریان همرفتی در کانال تقویت شده و به طور قابل توجهی سرعت انتقال حرارت افزایش می‌یابد. این تغییرات به ویژه در نواحی نزدیک به دیوارها و در جریان‌های آشفته مشهود است. در مقدارهای پایین عدد رایلی، جریان به صورت آرام ($Laminar$) و منظم است، اما با افزایش عدد رایلی، جریان به تدریج وارد حالت آشفته ($Turbulent$) می‌شود. این تغییر در وضعیت جریان باعث پیچیدگی بیشتر الگوهای جریان و افزایش کارایی سیستم در انتقال حرارت می‌شود. این روند با مطالعات پیشین همخوانی دارد که نشان می‌دهند در شرایط افزایش Ra ، جریان همرفتی به شدت تقویت می‌شود و عدد نوسلت (Nu) افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در تحقیقاتی که توسط Incropera و DeWitt (2007) انجام شده، نشان داده شد که با افزایش عدد رایلی، جریان به حالت آشفته و انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

۲.۵. تأثیر افزایش نسبت ابعادی (AR) بر انتقال حرارت

نتایج شبیه‌سازی‌ها همچنین نشان می‌دهند که افزایش نسبت ابعادی کانال (AR) تأثیر چشمگیری بر نرخ انتقال حرارت دارد. با افزایش AR ، زمان تماس سیال با دیوارها بیشتر می‌شود و این امر باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود. در کانال‌های با نسبت ابعادی بزرگتر، جریان‌های پیچیده‌تری شکل می‌گیرند که در نهایت موجب افزایش عدد نوسلت و بهبود عملکرد سیستم در انتقال حرارت می‌شود.

این نتایج مشابه با مطالعات قبلی است که نشان داده‌اند افزایش نسبت ابعادی می‌تواند باعث کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت شود. به عنوان نمونه، در تحقیقاتی که توسط Bergman و (2011) Lavine انجام شده، تأثیر نسبت ابعادی بر انتقال حرارت طبیعی در کانال‌های عمودی بررسی شده و مشاهده شد که افزایش طول کانال موجب بهبود نرخ انتقال حرارت می‌شود.

۳.۵. تأثیر عدد نوسلت (Nu) بر کارایی سیستم

عدد نوسلت (Nu) که معیاری برای ارزیابی کارایی انتقال حرارت در سیستم است، در این تحقیق به طور قابل توجهی افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش عدد رایلی، عدد نوسلت به طور چشمگیری افزایش می‌یابد که این نشان‌دهنده افزایش نرخ انتقال حرارت به واسطه تقویت جریان همرفتی است. در واقع، با افزایش Ra، لایه‌های مرزی حرارتی نازک‌تر شده و جریان‌های همرفتی تقویت می‌شوند که در نهایت به بهبود عملکرد سیستم در انتقال حرارت منجر می‌شود.

مطالعات مشابه در این زمینه، به‌ویژه در تحقیقاتی که توسط White (2011) و Jobby و همکاران (2025) انجام شده است، نشان می‌دهند که افزایش عدد رایلی موجب افزایش عدد نوسلت و بهبود کارایی انتقال حرارت در سیستم‌های جابجایی طبیعی می‌شود.

۴.۵. بررسی تفاوت‌ها و شباهت‌ها با مطالعات پیشین

مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات قبلی نشان می‌دهد که افزایش عدد رایلی و نسبت ابعادی تأثیر مشابهی بر جریان و انتقال حرارت دارند. در اکثر مطالعات، مشاهده شده است که با افزایش عدد رایلی، جریان به طور آشفتگی و پیچیده‌تر می‌شود و این باعث افزایش کارایی انتقال حرارت می‌شود. همچنین، مطالعات مشابه نشان داده‌اند که افزایش نسبت ابعادی موجب بهبود نرخ انتقال حرارت می‌شود، اما این تأثیر به‌ویژه در کانال‌های بلندتر و باریک‌تر بیشتر مشهود است. در این تحقیق نیز، همانطور که در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رایلی و نسبت ابعادی، انتقال حرارت به شدت افزایش می‌یابد. این نتایج نشان‌دهنده تطابق با نظریات موجود در زمینه همرفت طبیعی و انتقال حرارت است.

۵.۵. محدودیت‌ها و پیشنهادات برای تحقیقات آینده

با وجود نتایج قابل توجه به دست آمده، برخی محدودیت‌ها در این تحقیق وجود دارند که باید در تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرند. به عنوان مثال، مدل عددی حاضر تنها به بررسی شرایط پایدار و آرام پرداخته است، در حالی که جریان‌های گذرا و آشفتگی می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر انتقال حرارت داشته باشند. در نتیجه، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده به بررسی تأثیر شرایط گذرا و آشفتگی در سیستم‌های مشابه پرداخته شود. همچنین، استفاده از هندسه‌های پیچیده‌تر مانند کانال‌های متمایل یا کانال‌های با اجسام داخلی می‌تواند در تحقیقات آینده برای بهبود دقت مدل‌های انتقال حرارت مفید واقع شود. این نوع مدل‌سازی‌ها می‌توانند برای طراحی سیستم‌های انتقال حرارت غیرفعال و مبدل‌های حرارتی کارآمدتر مورد استفاده قرار گیرند.

۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر عدد رایلی (Ra) و نسبت ابعادی (AR) بر انتقال حرارت و الگوهای جریان در کانال عمودی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، مدل عددی مبتنی بر روش تفاضل محدود (FDM) و فرمول‌بندی تابع جریان-ورتسیتی توسعه داده شد و شبیه‌سازی‌های عددی برای شرایط مختلف عدد رایلی و نسبت ابعادی انجام شد. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مرجع و مشاهده‌های تجربی مقایسه شدند تا دقت و صحت مدل عددی ارزیابی شود.

۱.۶. نتایج کلیدی

تأثیر عدد رایلی (Ra):

با افزایش عدد رایلی، نیروی شناوری ناشی از اختلاف دما بین دیوارها افزایش می‌یابد و این امر منجر به تقویت جریان طبیعی در کانال می‌شود. همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی‌ها مشاهده شد، عدد نوسلت با افزایش Ra به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. این تغییرات نشان‌دهنده بهبود انتقال حرارت به دلیل افزایش شدت جریان است. علاوه بر این، با افزایش Ra ، جریان به‌تدریج از حالت آرام (laminar) به آشفته (turbulent) تبدیل می‌شود.

تأثیر نسبت ابعادی (AR):

نتایج نشان داد که با افزایش نسبت ابعادی کانال، انتقال حرارت بهبود می‌یابد و عدد نوسلت افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که کانال‌های با نسبت ابعادی بزرگتر عملکرد بهتری در انتقال حرارت دارند، زیرا طول بیشتری برای تماس سیال با دیوارها وجود دارد.

پروفیل دما و سرعت:

تحلیل‌های پروفایل دما و پروفایل سرعت در مقطع میانی کانال نشان داد که با افزایش عدد رایلی، ضخامت لایه مرزی حرارتی کاهش می‌یابد و سرعت سیال در مرکز کانال افزایش می‌یابد. این تغییرات به‌طور مستقیم با بهبود انتقال حرارت در نواحی مختلف کانال مرتبط هستند.

مقایسه نتایج با داده‌های مرجع:

نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مرجع موجود در ادبیات مقایسه شد. این مقایسه‌ها نشان دادند که مدل عددی قادر به بازتولید دقیق رفتارهای جریان و انتقال حرارت در کانال عمودی است و اختلافات کمتر از ۵٪ بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های مرجع وجود دارد.

۲.۶. پیشنهادات برای تحقیقات آینده

گسترش مدل به شرایط پیچیده‌تر:

در این تحقیق، رفتار همرفت طبیعی در کانال عمودی مدل‌سازی شد. با این حال، برای تحقیقات آینده، می‌توان مدل را به کانال‌های افقی یا زاویه‌دار گسترش داد و اثر نیروی گرانش و تأثیرات غیرنیوتنی را نیز در مدل‌ها لحاظ کرد.

شبیه‌سازی‌های تجربی:

به‌منظور اعتبارسنجی بهتر مدل، پیشنهاد می‌شود که شبیه‌سازی‌های تجربی با استفاده از دستگاه‌های آزمایشگاهی برای

بررسی انتقال حرارت در کانال‌های واقعی انجام شود تا بتوان مدل عددی را به‌طور دقیق‌تر تطبیق داد.

تحلیل‌های حساسیت:

پیشنهاد می‌شود که یک تحلیل حساسیت برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مانند ویسکوزیته، چگالی، و ضریب انتقال حرارت در عملکرد مدل عددی انجام شود.

۳.۶. نتیجه‌گیری نهایی

در این تحقیق، مدل عددی به‌طور موفقیت‌آمیز برای شبیه‌سازی همرفت طبیعی و انتقال حرارت در کانال‌های عمودی توسعه داده شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که عدد رایلی و نسبت ابعادی به‌طور مؤثری بر انتقال حرارت و الگوهای جریان تأثیر می‌گذارند. مدل عددی به‌طور دقیق رفتار سیستم را شبیه‌سازی کرده و با داده‌های مرجع تطابق خوبی دارد. به‌طور کلی، این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنای مناسبی برای طراحی سیستم‌های انتقال حرارت در کانال‌های مختلف استفاده شود.

۷. مراجع

1. F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Introduction to Heat Transfer*, 6th ed., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2007.
2. F. M. White, *Fluid Mechanics*, 7th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.
3. T. L. Bergman and A. S. Lavine, *Introduction to Heat Transfer*, 6th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.
4. A. Hasan, "A comprehensive review on natural convection in various geometries," *Energies*, vol. 18, no. 4, pp. 1-70, Feb. 2025.
5. J. R. Leith, "Thermal design considerations in vertical-channel natural convection," *ASME J. Heat Transfer*, vol. 109, no. 1, pp. 249-251, Feb. 1987.
6. X. Zhou et al., "The effect of Rayleigh number on heat transfer in vertical enclosures," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 12, no. 2, pp. 155-165, 2021.
7. H. Khan and S. Gupta, "Numerical simulation of natural convection heat transfer in inclined channels," *J. Thermal Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 123-134, 2023.
8. M. Thebault, "Transitional natural convection flow in a vertical channel," *Int. J. Thermal Sciences*, 150 (2020) 106299.
9. S. A. Sayed Ahmed, "Free convection heat transfer in a vertically heated channel with adiabatic extensions," *Egypt. J. Sol. Energy*, vol. 64, no. 1, pp. 45-59, 2023.
10. Zheng Zheng, L. S. Tuckerman and T. M. Schneider, "Natural convection in a vertical channel. Part 1. Wavenumber interaction and Eckhaus instability in a narrow domain," *J. Fluid Mech.*, vol. 1000, A28, Dec. 2024.
11. I. Khan et al., "Natural convection heat transfer in an oscillating vertical cylinder," *PLoS ONE*, vol. 13, no. 1: e0188656, Jan. 2018.
12. S. H. Husain, "A review on the thermal performance of natural convection and heat transfer enhancement techniques," *Renew. Sust. Energy Rev.*, vol. 145, 111080, 2021.
13. G. E. Lau, "Large-eddy simulation of turbulent natural convection in a vertical parallel-plate channel," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 32, no. 4, pp. 715-725, 2011.
14. R. Almuzaqer et al., "Effect of the aspect ratio and tilt angle on the free convection heat transfer inside shallow cuboid enclosures," *Proc. Eng.*, vol. 202, pp. 123-131, 2022.
15. S. Yildiz and B. Başaran, "Investigation of natural convection heat transfer along a uniformly heated vertical plate," *Arab J. Sci. Eng.*, vol. 44, pp. 1685-1696, 2019.