



بررسی عددی تأثیر جدار الاستیک بر انتقال گرما در برهم کنش شاره-جامد حول استوانه محصور در کانال

حجت داننده اسکوئی^{۱*}، سید اسماعیل رضوی^۲ و سید فرامرز رنجبر^۲

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ استاد، مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰

چکیده

در این پژوهش تأثیر برهم کنش شاره-جامد برای جریان همرفت اجباری حول استوانه دایروی محصور در کانال دوبعدی با جریان تراکم ناپذیر بررسی شده است. تمامی سطوح کانال عایق است و استوانه در دمای ثابت با جریان عبوری سرد، تبادل گرما دارد. سطح پایینی این کانال صلب است؛ اما قسمتی از سطح بالایی الاستیک است. با عبور جریان از اطراف استوانه گرم و نوسان جدار الاستیک، آهنگ انتقال گرما در هر لحظه تغییر می‌کند که این تغییرات تابع شرایط ارتعاش نوسانگر الاستیک است. مکان سطح الاستیک، دامنه و فرکانس ارتعاشی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر جریان عبوری از کانال می‌باشند. از این جهت در این پژوهش ابتدا مکان سطح الاستیک بررسی شده و سپس دامنه و فرکانس نوسانگر در چندین حالت بررسی شده است. بررسی‌های صورت گرفته در پنج عدد رینولدز مختلف نشان می‌دهد که جایگزینی جدار الاستیک در بالادست استوانه تأثیر بسیار بیشتری در افزایش انتقال گرما، نسبت به جایگزینی در پایین دست استوانه دارد؛ همچنین نتایج بیانگر این است که با جایگزینی جدار الاستیک و افزایش دامنه و فرکانس ارتعاشی، عدد نوسلت متوسط به طور مرتب افزایش یافته و متوسط دمای سیال خروجی از کانال نیز با افزایش دامنه و فرکانس افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: برهم کنش شاره-جامد؛ معادلات ناویر-استوکس؛ همرفت اجباری؛ جریان تراکم ناپذیر؛ عدد نوسلت.

Numerical investigation of the effect of an elastic wall on Heat Transfer around a cylinder within a channel

Hojjat Danandeh Oskuei^{1*}, Seyed Esmail Razavi², Seyed Faramarz Ranjbar²

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Assoc. Prof, Mech. Eng, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The fluid-solid interaction of forced convective flow around a circular cylinder within a channel is investigated. All the channel surfaces are insulated, and the cylinder has heat transfer with the cold passing flow at a constant temperature. The lower surface of the channel is rigid, while the upper part is elastic. Crossing the flow into the hot surface and vibrating the elastic shell cause the heat transfer rate of the cylinder to change. The changes depend on the vibration conditions of the elastic oscillator. It was found that the location of the elastic surface, vibrational amplitude and frequency are the most significant factors affecting the exit flow temperature of the channel. The variation of main parameters (elastic surface location, amplitude and frequency) which affect the flow pattern was investigated. Studies at five different Reynolds shows that replacing the elastic wall on the cylinder upstream has a more significant effect on increasing heat transfer compared to the cylinder downstream. The results also indicate a growth in average Nusselt number by rising the vibrational amplitude and frequency.

Keywords: Fluid-Solid interaction, Navier-Stokes equations, Forced convection, Incompressible flow, Nusselt number.

۱- مقدمه

امروزه راهکارهای مختلفی برای بهبود آهنگ انتقال گرما ارائه شده است که یکی از جدیدترین روش‌ها، استفاده از جدار الاستیک در حال ارتعاش است. با بررسی پژوهش‌های انجام‌شده پیشین دریافت می‌شود که از دیدگاه نظری و شبیه‌سازی، مباحث انتقال گرما در جریان‌های برهم‌کنش شاره-جامد به‌ندرت مورد بررسی قرار گرفته است؛ بنابراین با در نظر گرفتن جریان سیال و کانالی با جدار الاستیک در حال ارتعاش، می‌توان تأثیر سطح الاستیک مرتعش را بر آهنگ انتقال گرما در هندسه و شرایط مختلف بررسی کرد. از این‌رو به‌مرور چندین کار صورت گرفته در زمینه کانال صلب و برهم‌کنش شاره جامد پرداخته شده است.

خان و همکاران به بررسی میدان جریان، فشار و دما با عبور سیال از استوانه گرم بین صفحات موازی صلب ساده پرداخته‌اند و عدد نوسلت متوسط را در شرایط مختلف بررسی کردند [۱]. آن‌ها همچنین در یک مطالعه عددی دیگر جریان متقاطع هوا در اطراف استوانه‌های هم‌دما را در آرایش‌های مختلفی از جمله تک سیلندر بررسی کرده‌اند. عدد نوسلت متوسط، ضریب فشار محلی و ضریب اصطکاک موضعی در اطراف سیلندرها ارائه شده است [۲]. تیواری و همکاران به پیش‌بینی عددی جریان و انتقال گرما در یک کانال صلب در حضور یک لوله دایره‌ای با یک صفحه جداکننده صلب پرداخته‌اند و با حالت بدون صفحه جداکننده مقایسه کرده و نشان دادند که وجود باله باعث افزایش انتقال گرما از سطح لوله می‌شود [۳]. سوتی و همکاران در این کار به بررسی عددی عبور جریان از روی استوانه گرم در داخل کانال صلب پرداخته‌اند و یک صفحه جداکننده الاستیک در انتهای استوانه قرار داده و انتقال حرارت در چندین مدول الاستیک را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند. نتایج نشان داده‌شده بیانگر این است که با جایگزینی سطح الاستیک عدد نوسلت متوسط افزایش می‌یابد [۴]. فو و تنگ به بررسی عددی انتقال گرما از یک استوانه گرم در حال نوسان داخل کانال صلب پرداخته‌اند. در این شبیه‌سازی عددی اثرات عدد رینولدز، دامنه نوسان، فرکانس نوسان بر روی ساختارهای جریان و ویژگی‌های انتقال گرما مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که اثر متقابل بین استوانه در حال نوسان، بر بهبود عدد نوسلت تأثیر قابل توجهی داشته است [۵]. چراغی و همکاران انتقال

گرما در کانال با دیواره‌های صلب تحت شار ثابت را بررسی کرده‌اند و اثرات فاصله بین استوانه و سطح پایینی کانال را بر انتقال گرما و افت فشار جریان در اعداد رینولدز مختلف و فاصله‌های مختلف را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج افزایش انتقال گرما در مقایسه با کانال بدون استوانه را نشان می‌دهند؛ همچنین مشخص شد که وقتی مانع در وسط کانال قرار می‌گیرد، انتقال گرما از دیواره‌های کانال افزایش می‌یابد؛ همچنین جابجایی استوانه دایروی به سمت دیواره پایینی منجر به ایجاد جریان ثابت و کاهش انتقال گرمای دیواره و افت فشار می‌شود [۶]. شاهین و آتالیک در این کار اثرات افزودنی بر انتقال گرما را برای جریان آرام روی سیلندر در داخل کانال صلب بررسی کرده و آهنگ انتقال گرما را در شرایط مختلف با سیال بدون افزودنی مقایسه کرده‌اند. نتایج بیانگر افزایش انتقال گرما تحت اثرات افزودنی‌ها از طریق افزایش عدد نوسلت متوسط است [۷]. خانافر و آل امیری انتقال گرما را روی یک سطح الاستیک بررسی عددی نموده و تأثیر مدول یانگ را بر انتقال گرما در شرایط مختلف مطالعه کرده‌اند. نتایج این بررسی نشان داد که ضریب الاستیک سطح دیوار پایین نقش مهمی در افزایش انتقال گرما ایفا می‌کند [۸]. علی و همکاران انتقال گرما با نوسان آزاد باله را مورد مطالعه قرار داده‌اند و نقش نوسانات باله را در فرآیند اختلاط و انتقال گرما در یک جریان آرام دوبعدی به‌صورت عددی بررسی کرده‌اند. دامنه محاسباتی شامل چهار باله نصب‌شده بر روی دو دیوار مقابل است. در موارد انعطاف‌پذیر، نوسان باله باعث افزایش گرادیان سرعت و ایجاد گردابه می‌شود که گردابه‌های ایجاد شده تأثیر قابل توجهی در بهبود انتقال گرما دارد [۹]. اوزتوپ و فاتح مطالعات مختلفی را بر روی اثر برهم‌کنش شاره-جامد در انتقال حرارت در هندسه‌های مختلف صورت داده‌اند. آن‌ها اثر همرفت در یک حفره مثلثی گرم پر شده با نانو سیال را بررسی کرده‌اند که دارای یک جدار انعطاف‌پذیر است. نتایج نشان می‌دهد که انتقال گرما به عدد ریچاردسون و عدد رایله بستگی دارد؛ همچنین با افزایش اندازه الاستیسیته دیواره آهنگ انتقال گرما افزایش می‌یابد [۱۰]؛ همچنین آن‌ها در کار دیگرشان جریان آرام نانو سیال همرفتی با یک دیواره الاستیک را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این پژوهش سطح الاستیک توسط جریان به ارتعاش درآمده و به‌صورت آزاد نوسان می‌کند و تأثیر مدول یانگ

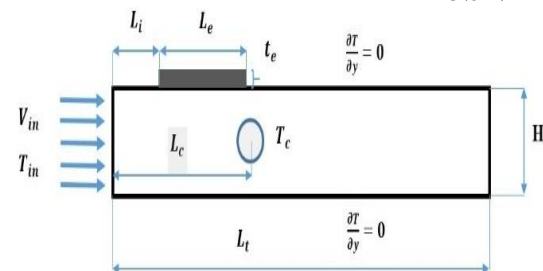
الاستیک بوده و تحت ارتعاش آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. در دو طرف سطح الاستیک دو بفل جامد قرار داده شده است و نتایج در این حالت با یک کانال مشابه بدون بفل مقایسه شده است. نتایج، نشانگر افزایش ۹۴٪ عدد نوسلت متوسط در این طرح در مقایسه با کانال بدون بفل است [۱۶]. در بیشتر مطالعات صورت گرفته به بررسی تغییرات میدان سرعت و دمای ناشی از ارتعاش سطح گرم الاستیک پرداخته شده است؛ اما در این پژوهش سعی شده است، کاربرد جایگزینی جدار الاستیک با جدار صلب در بخشی از مجرا را مطالعه کرده و تاثیرات ارتعاش جدار الاستیک بر جریان تراکم ناپذیر گرما-شاره را در مکان، دامنه و فرکانس‌های ارتعاشی مختلف بررسی شود. در این مطالعه مجرای با سطوح جامد و الاستیک عایق در نظر گرفته شده است و استوانه محصور در کانال در دمای ثابت با سیال عامل عبوری تبادل گرما دارد. ارتعاش سطح الاستیک، سیال عبوری از کانال را تحت تأثیر قرار می‌دهد و موجب می‌شود، پروفیل سرعت در هر لحظه تغییر یابد. به همین دلیل اندازه آهنگ انتقال گرما و پروفیل دما با زمان تغییر خواهند کرد. هدف این پژوهش آن است که با در نظر گرفتن سطح الاستیک و توسعه این طرح، تأثیر مکان، دامنه و فرکانس ارتعاشی جدار الاستیک بر آهنگ انتقال گرما بررسی شود؛ اما نوآوری اصلی این کار ارتعاش اجباری بودن نوسانگر هست. در بیشتر کارهای صورت گرفته سطح الاستیک تحت نیروی وارد شده از سیال عامل عبوری شروع به نوسان آزادانه کرده و سطح الاستیک تحت ارتعاش آزاد بر جریان تأثیر می‌گذارد، در این گونه موارد مدول یانگ عامل اصلی در میزان نوسان سطح است؛ اما در کار حاضر سطح الاستیک تحت ارتعاش اجباری سینوسی در دامنه و فرکانس‌های مختلف و معین قرار دارد. از این رو ابتدا بهترین مکان برای جایگزینی سطح الاستیک از نظر افزایش آهنگ انتقال گرما بررسی و تعیین شده و سپس دامنه‌های مختلف در آن مکان مورد بررسی قرار گرفته و با انتخاب بهترین دامنه از جهت افزایش انتقال گرما، تأثیر فرکانس نوسانی بر روی جریان در حالات مختلف بررسی شده است که قبلاً بررسی همه این شرایط به ندرت مورد مطالعه قرار گرفته است.

سطح الاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده شد که انعطاف‌پذیری دیواره منجر به تغییر مشخصات جریان سیال و انتقال گرما برای مساله می‌شود. میانگین عدد ناسلت تا حدود ۶/۱٪ برای دیوار انعطاف‌پذیر با کم‌ترین مدول الاستیک در مقایسه با دیوار صلب افزایش می‌یابد [۱۱]. قلم باز و همکاران تأثیر پره‌های انعطاف‌پذیر در آهنگ انتقال گرما را مورد بررسی عددی قرار داده‌اند. سطوح بالایی و پایینی در این طرح عایق بوده و یکی از سطوح عمودی سرد و دیگری گرم می‌باشد و پره الاستیک بر روی سطح گرم قرار داده شده و مرتعش در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش طول باله در حال نوسان، عدد نوسلت به‌طور قابل ملاحظه افزایش می‌یابد؛ همچنین به دلیل اختلاط جریان آهنگ انتقال گرما در پره الاستیک نسبت به پره ثابت افزایش می‌یابد [۱۲]. صابر و همکاران به بررسی جریان همرفت در یک کانال دارای حفره با دیوار الاستیک پرداخته‌اند که یک منبع گرما مجزا در پایین حفره ثابت نگه داشته شده است، در حالی که دیواره‌های دیگر عایق حرارتی هستند. سمت بالایی حفره در معرض جریان کانال قرار دارد. اثرات مدول الاستیسیته، شناوری و اینرسی به نسبت ویسکوز با در نظر گرفتن سرعت‌های مختلفی بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که حضور دیواره الاستیک در مقایسه با دیواره‌های صلب حفره، نرخ انتقال حرارت را تا ۱۷٪ بهبود می‌بخشد [۱۳]. هاشم زاده و همکاران تأثیر انعطاف‌پذیری یک صفحه نازک گرم بر انتقال گرما را بررسی کردند. در این طرح صفحه گرم به‌صورت افقی بین دو صفحه عمودی سرد در نظر گرفته شده است و برای سیال‌های مختلف، عدد نوسلت را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج گزارش شده نشانگر این است که عدد پرانتل برعکس عدد رایله تأثیر ناچیزی بر مقدار عدد نوسلت دارد [۱۴]. کومار و همکاران به بررسی ارتعاش یک استوانه با مقطع D ناشی از عبور سال هوا در داخل کانال پرداختند که سطوح این کانال تحت شرایط دما ثابت قرار دارند. از نتایج مشاهده می‌شود با ارتعاش استوانه در هر لحظه رژیم جریان در پایین دست تغییر کرده و نسبت به کانال ساده بدون استوانه آهنگ انتقال حرارت و عدد نوسلت افزایش می‌یابد [۱۵]. اسماعیل انتقال گرما در کانال با دیواره الاستیک را مورد بررسی قرار داده است. در این کار سطح پایینی جامد بوده و تحت شار گرمایی ثابت قرار گرفته و سطح بالایی

۲- هندسه و معادلات حاکم

مدل فیزیکی هندسه موردنظر کانال الاستیک در شکل ۱ نشان داده شده است که در بخشی از مرز بالایی، جدار الاستیک جایگزین جدار صلب هندسه پایه شده است. در مسأله موردنظر سیال عامل هوا است که با سرعت یکنواخت وارد کانال دوعبده می شود. استوانه مدور در داخل این کانال در دمای $343/15\text{ K}$ ثابت نگه داشته شده و تمام سطوح این کانال عایق می باشد. دمای جریان یکنواخت ورودی $293/15\text{ K}$ ارتفاع کانال $4D$ ، طول کانال $30D$ ، فاصله استوانه از ورودی کانال $12D$ و سرعت یکنواخت ورودی با توجه به اعداد رینولدز مختلف بررسی شده، تعیین گردیده است. طول سطح الاستیک جایگزین شده $7D$ ضخامت آن $\frac{D}{4}$ و مدول یانگ آن 50 MPa است و بقیه شرایط مشابه کانال صلب است.

فیزیک معرفی شده در نرم افزار کامسول ۵/۵ شبیه سازی شده است. اساس این نرم افزار روش المان محدود است که با روش حل مستقیم انجام می گیرد؛ همچنین برای حل معادلات غیرخطی از روش گالرکین استفاده شده است و تمام معادلات به هم کوپل شده اند.



شکل ۱- مشخصات هندسی و شرایط مرزی کانال صلب و الاستیک

با در نظر جریان آرام، دوعبده، نا پایا و تراکم ناپذیر همراه با انتقال گرمای اجبایی اجباری در کانال افقی و صرف نظر از اثر نیروی گرانش، معادلات حاکم پیوستگی (۲)، مومنوم (۳) و انرژی (۴) برای سیال و سطح الاستیک از روش اختیاری اویلر-لاگرانژی به صورت زیر است [۱۳] و [۱۷].

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} - \mathbf{V}^{ms}) \cdot \nabla \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla p + \nu_f \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} - \mathbf{V}^{ms}) \cdot \nabla T = \alpha_f \nabla^2 T \quad (3)$$

$$\rho_f \frac{\partial^2 \mathbf{d}_s}{\partial t^2} = F_f + \nabla \sigma_s \quad (4)$$

در روابط بالا t زمان، \mathbf{U} ویسکوزیته سنماتیکی، \mathbf{V}^{ms} سرعت حرکت شبکه، α ضریب پخش، ρ چگالی، \mathbf{d}_s جابجایی سطح الاستیک، σ_s تانسور تنش کوشی و F_s نیروی وزن است. از طرفی با توجه به شکل ۱ شرایط مرزی مسأله به صورت معادلات (۵) و (۶) تعریف می شود:

$$u = V_{in}, v = 0, T = T_{in} \text{ at } x = 0 \quad (5)$$

$$p = p_{out} \text{ at } x = L$$

$$u = 0, v = 0 \frac{\partial T}{\partial y} \text{ at } y = 0$$

$$u = 0, v = 0, T = T_s \text{ سطح استوانه}$$

در این روابط p_0 فشار مقطع خروجی کانال است. برای تعیین شرط مرزی فوقانی کانال با توجه به صلب و الاستیک بودن هر قسمت از رابطه (۶) استفاده می شود:

$$u = 0, v = 0 \frac{\partial T}{\partial y} \text{ at } y = H \text{ بخش صلب کانال} \quad (6)$$

$$u = u_s, v = v_s, \frac{\partial T}{\partial y} \text{ at } y = H \text{ بخش الاستیک کانال}$$

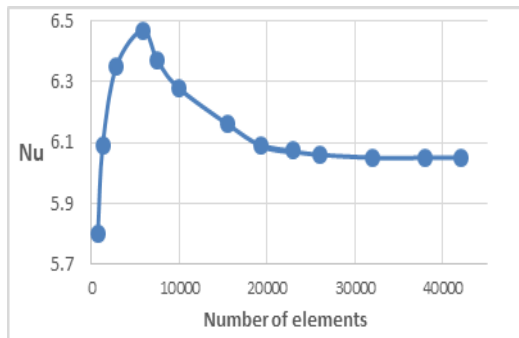
v_s و u_s به ترتیب سرعت در جهت x و y است. همچنین در حل معادلات برهم کنش شاره-جامد باید دو شرط مرزی نشان داده شده در معادله (۷) که شرط مطابقت جابجایی و تنش است برقرار باشد [۱۳].

$$\frac{\partial \mathbf{d}_s}{\partial t} = \mathbf{V} \cdot \sigma_s \cdot \mathbf{n} = -p + \mu_f \nabla V \quad (7)$$

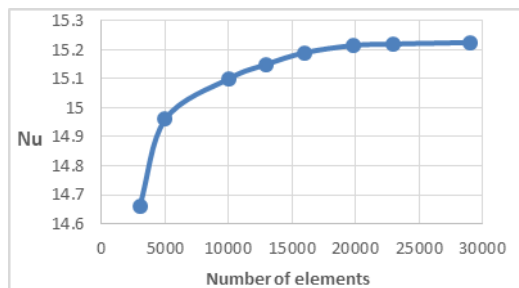
که μ_f لزجت دینامیکی سیال است. برای تعیین اثر برهم کنش شاره-جامد بر آهنگ انتقال گرما عدد نوسلت میانگین لحظه ای موردبررسی قرار می گیرد که به صورت معادله (۸) محاسبه می شود [۱۹ و ۱۸].

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} \cdot D_h}{k_f}, h_x = \frac{q''}{T_s - T_{in}}, \bar{h} = \frac{1}{L} \int h_x dx \quad (8)$$

در این روابط \overline{Nu} عدد نوسلت میانگین لحظه ای، \bar{h} ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط، D_h قطر هیدرولیکی کانال، k_f



شکل ۲- نمودار استقلال جواب عدد نوسلت متوسط از شبکه در کانال صلب در $Re=100$ با سیال عامل هوا



شکل ۳- نمودار استقلال جواب عدد نوسلت متوسط از شبکه در کانال الاستیک در $Re=100$ با سیال عامل هوا

۳- تفسیر و تحلیل نتایج

بعد از انتخاب شبکه مناسب، ابتدا هندسه پایه حل شده و سپس کانال الاستیک در شرایط مختلف تحت ارتعاش سینوسی مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. نتایج حاصل از کانال الاستیک با یکدیگر و با نتایج کانال صلب مقایسه شده است. برای کانال الاستیک سه پارامتر مکان جدار الاستیک، دامنه و فرکانس ارتعاشی در نظر گرفته شده است و در هر کدام، چهار حالت متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا مکان جدار الاستیک مورد مطالعه قرار گرفته است، سپس با در نظر گرفتن بهترین مکان از نظر بهبود انتقال گرما، دامنه و سپس فرکانس بررسی شده است. در انتها موارد بررسی شده با یکدیگر و نتایج کانال صلب مقایسه شده است. تمامی محاسبات با سیال عامل هوا و در اعداد رینولدز ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ به صورتی انجام گرفته است که جریان آرام باشد. نتایج به دست آمده بعد از طی مدت معینی در حدود ۳۰ ثانیه در دوره تناوب‌های

ضریب رسانش سیال، h_x ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی، q'' شار حرارتی انتقالی از سطح می‌باشد.

با توجه به اینکه قبلاً جریان روی استوانه محصور در کانال با مرزها الاستیک بررسی نشده است، نتایج کانال صلب این مسئله با نتایج پژوهش شاهین و آتالیک [۷] مورد راستی آزمایی قرار گرفته است. نتایج اعتبار سنجی در جدول ۱ آورده شده است که با توجه به خطای کم، قابل قبول می‌باشد. بعد از اطمینان از نتایج حاصل از کانال صلب، اقدام به جایگزینی جدار الاستیک در همان هندسه راستی آزمایی شده گردیده است و نتایج کانال با جدارهای الاستیک با نتایج کانال صلب اعتبار سنجی شده مقایسه شده است؛ بنابراین تنها تفاوت هندسه کانال الاستیک با هندسه کانال صلب جایگزین شدن جدار الاستیک در قسمتی از سطح بالایی کانال صلب است.

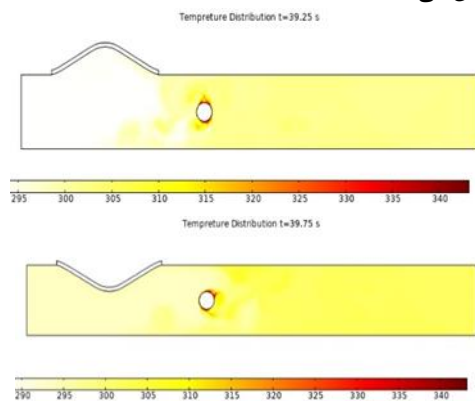
جدول ۱- اعتبار سنجی عدد نوسلت متوسط با سیال عامل آب با مرجع [۷]

عدد نوسلت میانگین	
۱۳/۳۴	پژوهش حاضر
۱۳/۳۶	شاهین و آتالیک [۷]
۰/۱۵٪	خطا

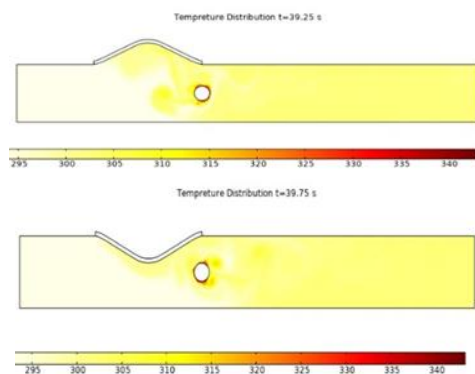
با در نظر گرفتن شبکه‌بندی مثلثی و سیال عامل هوا، به بررسی استقلال نتایج از شبکه پرداخته شده است. از طرفی با توجه به ارتعاش جدار الاستیک، باید شبکه‌بندی در اطراف جدار الاستیک ریزتر باشد؛ بنابراین برای هر دو کانال الاستیک و صلب استقلال نتایج از شبکه بررسی شده است. مساله مورد نظر در تعداد شبکه‌های مختلف برای عدد نوسلت متوسط حل شده است و بر این اساس با تکرار حل مساله در تعداد شبکه مختلف و اطمینان از استقلال جواب‌ها، شبکه با تعداد ۲۳۲۲۱ سلول برای هندسه صلب و شبکه با تعداد ۱۹۹۵۶ سلول برای کانال الاستیک مورد نظر انتخاب شده است که نتایج مربوط به آن‌ها به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

سوم و چهارم برخلاف حالات قبل با کاهش دامنه، سیال به دست پایین دست جریان یافته و در حقیقت تنها یک بار با استوانه گرم در تماس است و به همین دلیل نتایج حالت سوم و چهارم به نتایج کانال صلب نزدیک تر است.

در انتهای این بخش عدد نوسلت متوسط و متوسط دمای خروجی سیال در اعداد رینولدز متفاوت در دو دوره تناوب آخر میانگین گیری شده است. نتایج برای مکان های مختلف جدار الاستیک آورده شده و با نتایج کانال صلب مقایسه شده است. همان گونه که شکل ۹ نشان می دهد، جایگزینی جدار الاستیک در مقایسه با کانال صلب در همه حالات موجب افزایش عدد نوسلت می شود، اما میزان افزایش عدد نوسلت متوسط در حالات سوم و چهارم نسبت به عدد نوسلت کانال صلب برخلاف حالات اول و دوم قابل توجه نمی باشد. از طرفی نتایج نشان می دهد، با افزایش عدد رینولدز، عدد نوسلت در تمامی حالات افزایش می یابد.



شکل ۵- توزیع دما کانال الاستیک در $L_1=2D$ و $Re=100$

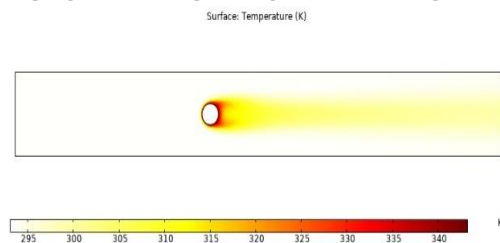


شکل ۶- توزیع دما کانال الاستیک در $L_2=5D$ و $Re=100$

متناظر با فرکانس ارتعاشی، پایدار می شوند. از این رو پارامترهای مورد نظر با توجه ثابت بودن جوابها در یک دوره تناوب به دست می آیند. با توجه به فراوانی نتایج، توزیع دماهای هر مورد تنها در عدد رینولدز ۱۰۰ و در دو زمان خاص نشان داده شده است.

۳-۱- کانال صلب

بعد از اعتبار سنجی نتایج حاصل از شبیه سازی جریان در کانال صلب، مساله در اعداد رینولدز مختلف دیگر در کانال صلب بررسی شده است. همان طور که شکل ۴ توزیع دما در کانال صلب را نشان می دهد، هوا با عبور از روی استوانه گرم شده و فقط در ناحیه ویک دمای سیال افزایش می یابد و دمای سیال در نزدیکی جدارها بدون هیچ افزایشی از کانال خارج می شود.

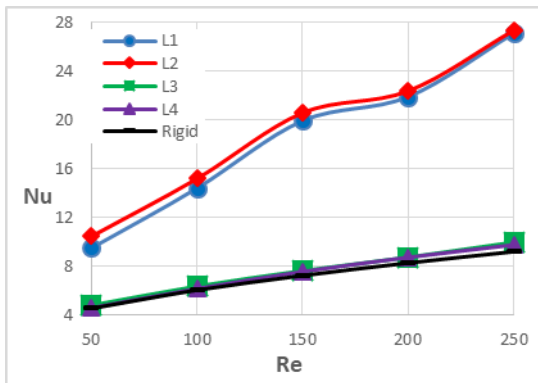


شکل ۴- توزیع دما در طول کانال صلب در $Re=100$

۳-۲- بررسی تأثیر مکان جدار الاستیک بر جریان

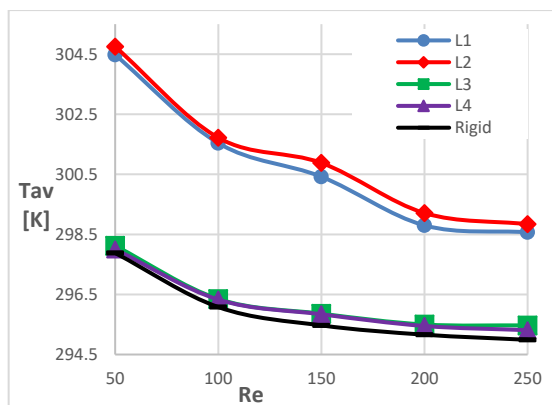
برای بررسی مکان جدار الاستیک ۴ مکان برای جایگزینی سطح الاستیک در کانال صلب انتخاب شده است که با توجه به شکل ۱ فاصله این جدارها از ورودی کانال (L_i) 2D، 5D، 12D، 15D است. در مطالعات این بخش تمامی دامنه های ارتعاشی 1/5D و فرکانس ارتعاشی 1Hz به عنوان دامنه و فرکانس پایه در نظر گرفته شده است.

شکل های ۵-۸ توزیع دما در کانال الاستیک در مکان های مختلف را نشان می دهد. در این کانال با ارتعاش سطح الاستیک، سطح مقطع کانال تغییر کرده و موجب تغییر پروفیل سرعت در کانال می شود و خطوط جریان از حالت یکنواخت خارج می شوند. در حقیقت با افزایش دامنه نوسانگر، سطح مقطع کانال افزایش پیدا کرده و بخشی از جریان حول استوانه به بالادست برمی گردد و با کاهش دامنه دوباره از اطراف استوانه گرم عبور کرده و موجب تماس بیشتر دما با سطح گرم شده و دمای سیال افزایش می یابد. این اتفاق برای تمام ذرات سیال در حالات اول و دوم چندین بار رخ می دهد، ولی در حالات



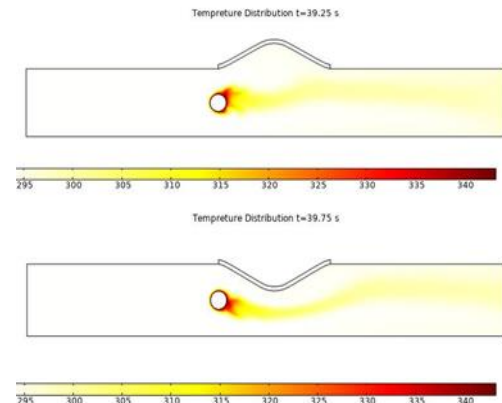
شکل ۹- عدد نوسلت متوسط کانال صلب و کانال الاستیک در مکان‌های مختلف L_1-L_4 در اعداد رینولدز مختلف

۳-۳ بررسی تأثیر دامنه نوسانی جدار الاستیک بر جریان بعد از بررسی مکان‌های مختلف جدار الاستیک و انتخاب L_2 به‌عنوان بهترین مکان برای جایگزینی جدار الاستیک از نظر بهبود عدد نوسلت متوسط، بررسی دامنه نوسانی انجام گرفته است. در این مرحله ۴ دامنه مختلف $0.5D$, $1D$, $1.5D$, $2D$ با فرکانس پایه 1Hz مورد بررسی قرار گرفته است.



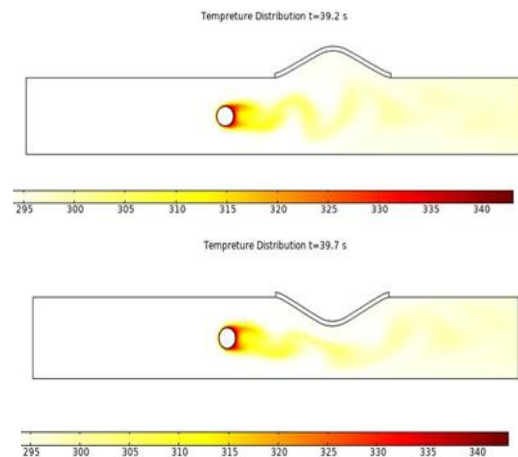
شکل ۱۰- متوسط دمای خروجی کانال صلب و کانال الاستیک در مکان‌های مختلف L_1-L_4 در اعداد رینولدز مختلف

در ادامه شکل‌های ۱۱-۱۴ توزیع دما در کانال الاستیک با دامنه‌های مختلف را نشان می‌دهد. از نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش بیشینه دامنه نوسانی سیال بیشتری تحت تأثیر نوسانگر بوده و اختلاط سیال با شدت بیشتری صورت می‌گیرد که منجر به افزایش یکنواخت‌تر دمای سیال می‌شود. در حقیقت با ارتعاش نوسانگر سیال عامل به دلیل تشکیل گردابه‌ها و جریان بازگشتی علاوه بر حرکت طولی حرکت عرضی نیز

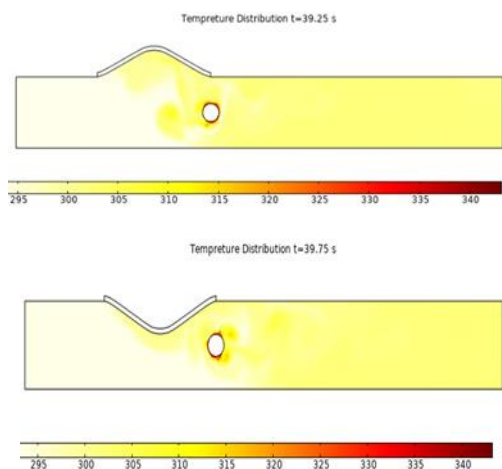


شکل ۷- توزیع دما کانال الاستیک در $L_3=12D$ و $Re=100$

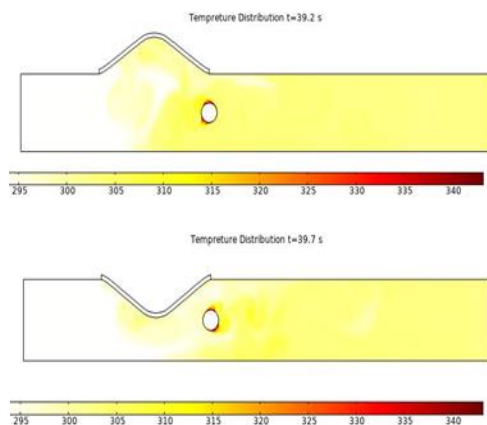
برای درک بهتر در شکل ۱۰ متوسط دمای خروجی کانال آورده شده است. بر این اساس حالات دوم و سپس اول بیشترین تأثیر را در افزایش دمای سیال دارا می‌باشند و تأثیر حالات سوم و چهارم ناچیز است. این افزایش زیاد دمای سیال در حالت اول و دوم ناشی از برخورد چندین باره سیال با استوانه گرم هنگام نوسان جدار الاستیک است و این موجب می‌شود، سیال علاوه بر اختلاط با هم، گرمای بیشتری از استوانه دریافت کند.



شکل ۸- توزیع دما کانال الاستیک در $L_4=15D$ و $Re=100$



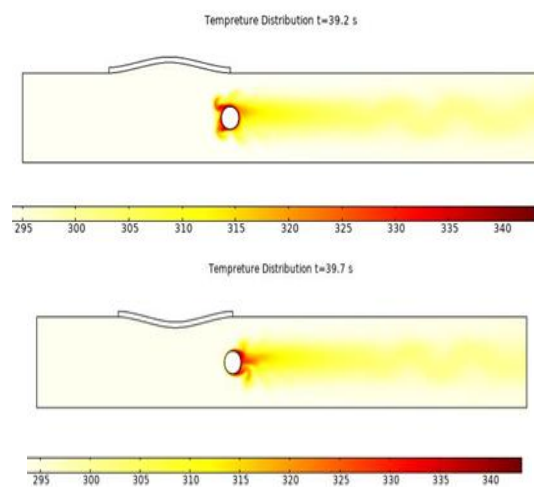
شکل ۱۳- توزیع دما کانال الاستیک در $Re=100$ و $A_3=1.5D$



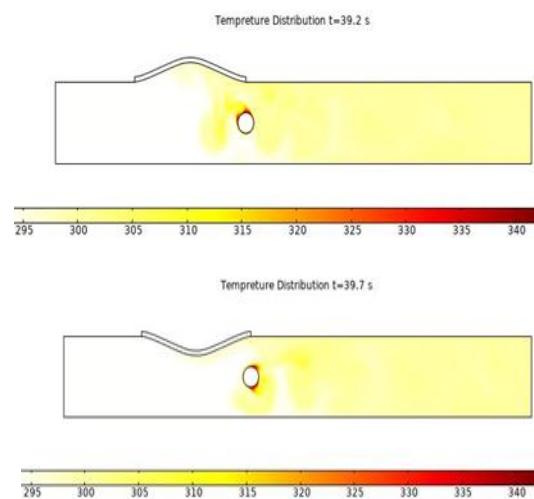
شکل ۱۴- توزیع دما کانال الاستیک در $Re=100$ و $A_4=2D$

همچنین شکل ۱۵ نشان می دهد که ارتعاش جدار الاستیک در هر دامنه‌ای موجب افزایش عدد نوسلت نسبت به کانال صلب می شود. در حقیقت با افزایش دامنه، عدد نوسلت بیشتر افزایش یافته و با افزایش سرعت ورودی، عدد نوسلت در تمامی حالات افزایش می یابد. برای درک بهتر در شکل ۱۶ متوسط دمای خروجی کانال آورده شده است. بر این اساس دامنه چهارم بیشترین تأثیر را در افزایش دمای سیال دارد و با کاهش دامنه نوسانگر، دمای متوسط خروجی کاهش یافته و به دمای حالت صلب نزدیک می شود.

در کانال دارد که نتیجه آن افزایش گرمای منتقل شده به سیال است؛ همچنین نتایج نشان می دهد با کاهش اندازه دامنه، توزیع دما با توزیع دما کانال صلب تفاوت کمتری دارند. از طرفی نوسان جدار الاستیک باعث مکش بخشی از جریان پایین دست می شود و طی ارتعاش سیال با هم ترکیب شده و دوباره به سمت پایین دست جریان می یابد. این حرکت به صورت مرتب ادامه می یابد و افزایش دامنه نوسانگر، باعث مخلوط شدن بیشتر جریان و عبور چندباره سیال از روی سطح گرم می شود.



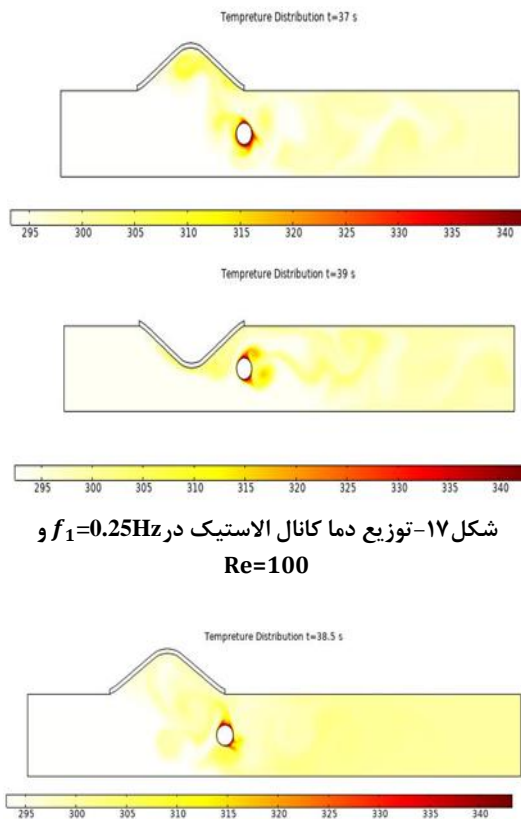
شکل ۱۱- توزیع دما کانال الاستیک در $Re=100$ و $A_1=0.5D$



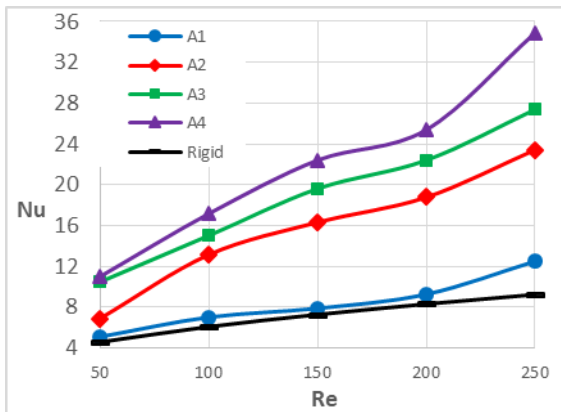
شکل ۱۲- توزیع دما کانال الاستیک در $Re=100$ و $A_2=1D$

سیال در طول کانال افزایش یافته و با سرعت بیشتری از روی استوانه گرم عبور می کند که باعث می شود، انتقال گرما از سطح افزایش یابد. از طرفی با توجه به افزایش فرکانس ارتعاشی، اختلاط سیال در پایین دست با شدت بیشتری انجام گرفته و موجب می شود که دمای سیال در پایین دست یکنواخت تر باشد.

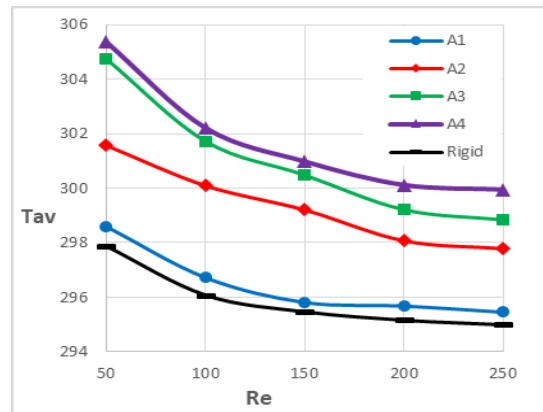
همان گونه که شکل ۲۱ نشان می دهد، ارتعاش جدار الاستیک موجب افزایش عدد نوسلت در مقایسه با کانال صلب می شود و با افزایش فرکانس نوسانگر عدد نوسلت بیشتر افزایش می یابد. از طرفی نتایج نشان می دهد با افزایش عدد رینولدز، سرعت و ضریب انتقال گرمای جابجایی افزایش یافته و در نهایت عدد نوسلت در تمامی حالات افزایش می یابد؛ همچنین در شکل ۲۲ متوسط دمای سیال در خروجی کانال آورده شده است. بر این اساس فرکانس چهارم بیشترین تأثیر را در افزایش دمای سیال دارا می باشند و با کاهش فرکانس نوسانگر دمای متوسط خروجی کاهش یافته و به دمای حالت صلب نزدیک می شود.



شکل ۱۷- توزیع دما کانال الاستیک در $f_1=0.25\text{Hz}$ و $Re=100$



شکل ۱۵- عدد نوسلت متوسط کانال صلب و کانال الاستیک در دامنه های مختلف A_1-A_4 در اعداد رینولدز مختلف

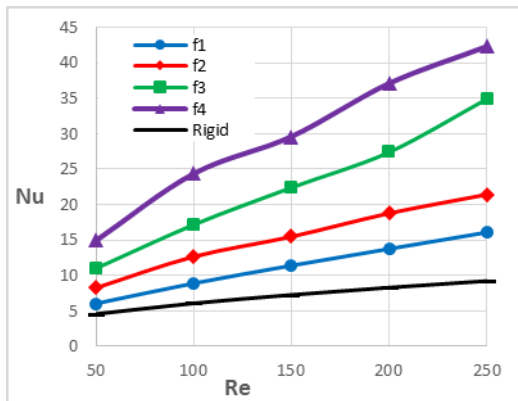


شکل ۱۶- متوسط دمای خروجی کانال صلب و کانال الاستیک در دامنه های مختلف A_1-A_4 در اعداد رینولدز مختلف

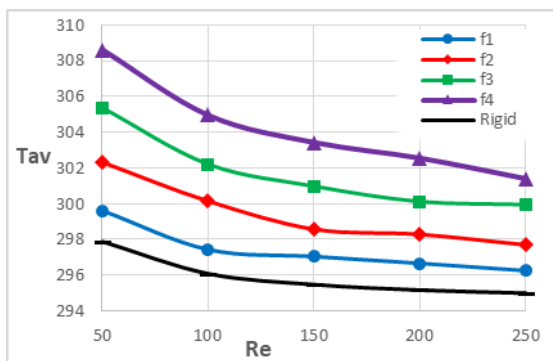
۴-۲- بررسی تأثیر فرکانس نوسانی جدار الاستیک بر جریان

بعد از بررسی مکان های و دامنه های نوسانی مختلف جدار الاستیک و انتخاب L_2 و A_4 به عنوان بهترین مکان و دامنه برای جایگزینی جدار الاستیک، بررسی فرکانس نوسانی صورت گرفته است. در این مرحله ۴ فرکانس مختلف 0.25Hz ، 0.5Hz ، 1Hz ، 2Hz مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش برخلاف بخش های قبلی دوره تناوب ثابت نبوده و با توجه به هر فرکانس متفاوت است.

شکل های ۲۰-۱۷ توزیع دما در کانال الاستیک با فرکانس های مختلف را نشان می دهد. با افزایش فرکانس نوسانگر جدار با سرعت بیشتری تغییر مکان داده و سیال بیشتر تحت تأثیر قرار می گیرد به همین دلیل با افزایش فرکانس نوسانگر سرعت



شکل ۲۱- عدد نوسلت متوسط کانال صلب و کانال الاستیک در فرکانس‌های مختلف f_1-f_4 در اعداد رینولدز مختلف

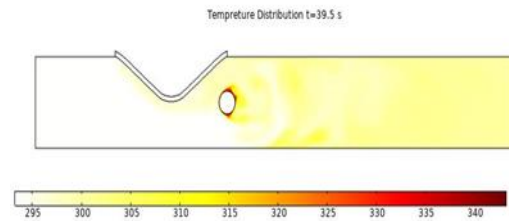


شکل ۲۲- متوسط دمای خروجی کانال صلب و کانال الاستیک در فرکانس‌های مختلف f_1-f_4 در اعداد رینولدز مختلف

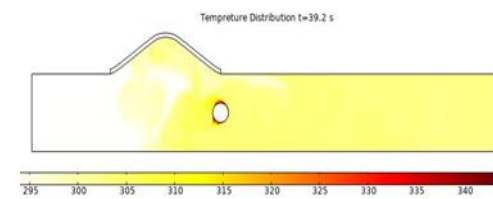
۴- نتیجه گیری

در این پژوهش برهم کنش سیال-جامد با روش المان محدود گالریکین و با استفاده از معادلات دلخواه اویلری- لاگرانژی در یک کانال دوبعدی افقی با سیال عامل هوا بررسی شده است. یک استوانه در مرکز کانال عایق در دمای ثابت قرار گرفته و قسمتی از سطح بالایی کانال با سطح الاستیک جایگزین شده است. مکان، دامنه و فرکانس ارتعاشی سطح الاستیک در اعداد رینولدز مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. ارتعاش جدار الاستیک موجب تغییر در رفتار جریان می‌شود که نتایج به دست آمده از حل عددی در زیر آورده شده است.

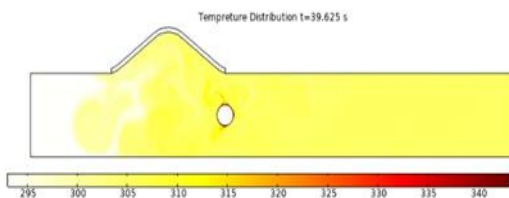
۱- در توزیع دمای کانال صلب مشاهده می‌شود که با عبور جریان از استوانه گرم، تنها دمای سیال عبوری از روی سطح استوانه افزایش می‌یابد و دیگر ذرات سیال بدون تغییر دمایی از کانال خارج می‌شود. از اینرو ضرورت ایجاد



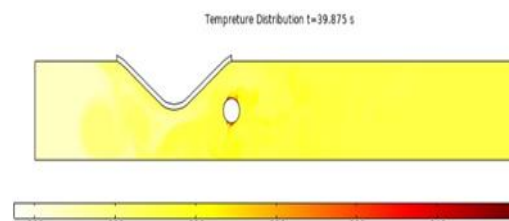
شکل ۱۸- توزیع دما کانال الاستیک در $f_2=0.5\text{Hz}$ و $Re=100$



شکل ۱۹- توزیع دما کانال الاستیک در $f_3=1\text{Hz}$ و $Re=100$



شکل ۲۰- توزیع دما کانال الاستیک در $f_4=2\text{Hz}$ و $Re=100$



۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
D	قطر (m)
d	برداری جابجایی (m)
E	مدول الاستیسیته (N/m^2)
F	نیروی وزن (N)
A	مساحت سطح تصویر شده (m^2)
H	ارتفاع کانال (m)
h	ضریب انتقال گرما جابجایی ($\frac{W}{m^2.K}$)
k	ضریب انتقال گرما رسانش ($\frac{W}{m.K}$)
L	طول کانال (m)
Nu	عدد نوسلت
P	فشار (pa)
Δp	افت فشار (pa)
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
t	زمان (s)
C_d	ضریب درگ استوانه
u	سرعت در جهت x ($\frac{m}{s}$)
v	سرعت در جهت y ($\frac{m}{s}$)
V	برداری سرعت ($\frac{m}{s}$)
q	شار حرارت انتقالی ($\frac{W}{m^2}$)
علائم یونانی	
τ	تنش برشی (pa)
α	ضریب نفوذ گرمایی ($\frac{m^2}{s}$)
ρ	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)
μ	ویسکوزیته دینامیکی (pa.s)
σ	تانسور تنش کوشی (pa)
α	ضریب نفوذ گرمایی ($\frac{m^2}{s}$)
زیر نویسها	
in	ورودی
out	خارج
f	سیال
s	جامد
x	محلی
av	متوسط
h	هیدرولیکی

یک اختلاط گر سیال مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن کانال الاستیک، این کار توسط جدار الاستیک مرتعش انجام می‌گیرد.

۲- نوسان سطح الاستیک موجب می‌شود، خطوط جریان برخلاف کانال صلب پایدار نبوده و هر لحظه تغییر کرده و گردابه‌هایی با قدرتهای مختلف در طول کانال به وجود آیند.

۳- در صورتیکه جدار الاستیک در بالادست استوانه گرم قرار گیرد، تحت نوسان آن سیال با عبور چندباره از روی استوانه، گرمای بیشتری دریافت می‌کند. علاوه بر آن برخورد سیال با استوانه موجب اختلاط بیشتر سیال عامل در طول کانال می‌شود.

۴- با افزایش دامنه و افزایش سطح مقطع عبوری، سیال پایین‌دست به دلیلی افزایش یافتن حجم داخل کانال و کاهش فشار در نزدیکی جدار الاستیک به سمت بالادست حرکت کرده و موجب ایجاد جریان بازگشتی در داخل کانال می‌شود. از طرف دیگر با حرکت دامنه در جهت کاهش سطح مقطع با توجه به ثابت بودن دبی ورودی به کانال، سرعت جریان افزایش یافته و با عبور از سطح استوانه گرم علاوه بر دریافت مجدد گرما، موجب به وجود آمدن گردابه‌های جدید در کانال می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دامنه و فرکانس عدد نوسلت و متوسط دمای خروجی افزایش می‌یابد.

۵- ایجاد جریان‌های برگشتی ناشی از نوسان سطح الاستیک موجب تداخل بیشتر جریان شده و علاوه بر یکنواخت شدن توزیع دما در داخل کانال، موجب افزایش آهنگ گرمای منتقل شده از سطح به جریان می‌شود. این مقدار با افزایش دامنه و فرکانس نیز به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد.

۶- با توجه به وجود مؤلفه عرضی سرعت جریان، ناشی از ارتعاش جدار الاستیک و مورب بودن خطوط جریان، می‌توان رسوب‌زدایی از سطوح را از مزیت‌های جایگزینی سطح الاستیک در کانال صلب نام برد.

با جمع‌بندی نتایج ملاحظه می‌شود در صورت جایگزینی جدار الاستیک در مکان L_2 و انتخاب دامنه نوسانی A_4 و فرکانس f_4 در اعداد رینولدز مختلف عدد نوسلت متوسط حداقل ۳ برابر افزایش می‌یابد که در اعداد رینولدز بالا این عدد به ۵ می‌رسد.

- [9] S. Ali, C. Habchi, S. Menanteau, T. Lemenand, J.L. Harion (2015) Heat transfer and mixing enhancement by free elastic flaps oscillation, *Int J. Heat Mass Tra*, 85250-264.
- [10] F. Selimefendigil, H.F. Öztop (2015) Mixed convection in a partially heated triangular cavity filled with nanofluid having a partially flexible wall and internal heat generation, *J. Tai Inst Chem Engs*, 70:168-178.
- [11] F. Selimefendigil, H.F. Öztop (2018). Laminar convective nanofluid flow over a backward-facing step with an elastic bottom wall, *J. Therm Sci and Engng Applications*, 10(4)
- [12] M. Ghalambaz, E. Jamesahar, M.A. Ismael, A.J. Chamkha (2017) Fluid-structure interaction study of natural convection heat transfer over a flexible oscillating fin in a square cavity, *Int J. Therm Sci*, 111:256-273.
- [13] W.A. Sabbar, M.A. Ismael, M. Almudhaffar (2018) Fluid-structure interaction of mixed convection in a cavity-channel assembly of flexible wall, *Int J. Mech Sci*, 149 73-83.
- [14] S.M.H. Zadeh, S. Mehryan, E. Izadpanahi, M. Ghalambaz (2019) Impacts of the flexibility of a thin heater plate on the natural convection heat transfer, *Int J. Therm Sci*, 145:106001.
- [15] V. Kumar, H. Garg, G. Sharma, R. Bhardwaj, (2020) Harnessing flow-induced vibration of a D-section cylinder for convective heat transfer augmentation in laminar channel flow, *Physics of Fluids*, 32(8) 083603.
- [16] M.A. Ismael (2019) Forced convection in partially compliant channel with two alternated baffles, *International J. Heat Mass Tra*, 142:118455.
- [17] F.M. White, I. Corfield (2006) *Viscous fluid flow*, McGraw-Hill New York.
- [18] T.L. Bergman, F.P. Incropera, A.S. Lavine, D.P. Dewitt (2011) *Introduction to heat transfer*, John Wiley & Sons.
- [19] A. Bejan (2013) *Convection heat transfer*, John wiley & sons.

c استوانه
e الاستیک
t کل

مراجع

- [1] W. Khan, J. Culham, M. Yovanovich (2004) Fluid flow and heat transfer from a cylinder between parallel planes, *J. thermophy heat trans.*, 18(3) 395-403.
- [2] M.J. HAIDER, S.N. Danish, W. Khan, S.U. Mehdi, B.A. Abbasi (2010) Heat Transfer and Fluid Flow Over Circular Cylinders in Cross Flow, *NUST J. Engng Sci*, 3(1): 67-77.
- [3] S. Tiwari, D. Chakraborty, G. Biswas, P. Panigrahi, (2005) Numerical prediction of flow and heat transfer in a channel in the presence of a built-in circular tube with and without an integral wake splitter, *international J. heat mass tra*, 48(2):439-453.
- [4] A.K. Soti, R. Bhardwaj, J. Sheridan (2015) Flow-induced deformation of a flexible thin structure as manifestation of heat transfer enhancement, *International J.Heat Mass Tra*, 841070-1081.
- [5] W.S. Fu, B.H. Tong (2002) Numerical investigation of heat transfer from a heated oscillating cylinder in a cross flow, *Int. J. Heat Mass Tra*, 45(14) 3033-3043.
- [6] M. Cheraghi, M. Raisee, M. Moghaddami (2014) Effect of cylinder proximity to the wall on channel flow heat transfer enhancement, *Comptes Rendus Mécanique*, 342(2) 63-72.
- [7] Ç. Şahin, K. Atalık (2019) Effects of polymer/surfactant additives on forced convective heat transfer in vortex shedding flow past a circular cylinder, *International J. Therml Sci*. 145:106031.
- [8] A. Al-Amiri, K. Khanafer (2011) Fluid-structure interaction analysis of mixed convection heat transfer in a lid-driven cavity with a flexible bottom wall, *Int. J. of Heat Mass Tra*, 54(17-18) 3826-3836.