



بررسی برهم کنش شماره-جامد در جریان تراکم ناپذیر و تأثیر دامنه نوسان بر انتقال گرما

سید اسماعیل رضوی، حجت داننده اسکویی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۹
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۱/۱۳

کلمات کلیدی:

شماره-جامد
مرز الاستیک
همرفت اجباری
جریان تراکم ناپذیر
عدد نوسل

خلاصه: در این پژوهش تأثیر برهم کنش شماره-جامد برای جریان همرفت اجباری در کانالی با جریان تراکم ناپذیر دوبعدی بررسی می‌شود. یک سطح این کانال تبادل گرما داشته و سطح دیگر جامد الاستیک و عایق است. با عبور جریان از سطح گرم و نوسان سطح الاستیک آهنگ گرمای منتقل شده به سیال تغییر می‌کند. در این حالت آهنگ تبادل گرما به عنوان تابعی از شرایط سطح الاستیک نوسان گر رفتار می‌نماید، که یکی از این عوامل مؤثر بر تبادل گرما، دامنه ارتعاش سطح الاستیک می‌باشد. از این جهت هدف شبیه‌سازی صورت گرفته، بررسی کاربرد جایگزینی مرز الاستیک با مرز صلب در بخشی از کانال و تأثیر اندازه بیشینه دامنه نوسان سطح الاستیک مرتعش بر آهنگ انتقال گرما است. در کانال مورد بررسی سطح پایین تحت شرط مرزی دما ثابت قرار داشته و سطح بالایی در دو حالت صلب و الاستیک، عایق بوده و با سیال عامل هوا در شرایط مختلف بررسی شده است. معلوم شد که عدد نوسل میانگین و دمای میانگین هوای خروجی از کانال، با جایگزینی سطح الاستیک با بخشی از مرز کانال صلب افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش بیشینه دامنه نوسان جدار مرتعش، عدد نوسل میانگین، دمای میانگین سیال خروجی و آهنگ انتقال گرما از سطح دما ثابت به سیال عامل افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

برای بهبود آهنگ انتقال گرما روش‌های مختلفی ارائه شده است که یکی از جدیدترین راهکارها، استفاده از سطح مرتعش الاستیک می‌باشد. از بررسی مطالعات انجام شده پیشین دریافت می‌شود که از دیدگاه نظری و شبیه‌سازی، مباحث انتقال گرما در جریان‌های برهم کنش شماره-جامد کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. از طرفی برهم کنش شماره-جامد در صنعت از جمله در مبدل‌های گرمایی کاربردهای فراوانی دارد. بنابراین با در نظر گرفتن جریان سیال و کانالی با سطح الاستیک در حال نوسان، می‌توان تأثیر ارتعاش سطح الاستیک را بر آهنگ انتقال گرما در ترکیبات هندسی مختلف بررسی کرد. در این پژوهش مجرای با سطوح جامد و الاستیک در نظر گرفته شده است که سطح جامد همراه با انتقال گرما بوده و سطح الاستیک در حال نوسان، عایق می‌باشد. 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. در این پژوهش سعی بر آن شده است که با در نظر گرفتن سطح الاستیک و توسعه این طرح، تأثیر الاستیسیته و بیشینه دامنه ارتعاشی سطح بر آهنگ انتقال گرما بررسی شود. اولین مطالعات بر روی سطوح الاستیک در بیش از پنج دهه پیش توسط کارمر برای کاهش ضریب پسا انجام گرفت و در سال ۱۹۶۰ مطالعات دیگری بر روی سطوح الاستیک توسط بینجامین و لانهال شروع شد که اکثر مطالعات در مورد جریان‌های خارجی و لایه مرزی بود، درحالی‌که اولین مطالعات بر روی جریان‌های داخلی از سال ۱۹۸۰ شروع شده بود [۱]. خانافر و آل امیری [۲] در سال ۲۰۱۱ انتقال گرمای ترکیبی اجباری و طبیعی را روی یک سطح الاستیک بررسی عددی نمودند و تأثیر الاستیسیته را بر اندازه انتقال گرمای اجباری و طبیعی در شرایط مختلف مقایسه کردند. در این پژوهش برای حل معادلات انتقال از روش المان محدود گالرکین استفاده شده است. نتایج این بررسی نشان داد که ضریب الاستیک سطح دیوار پایین نقش مهمی در افزایش انتقال گرما ایفا می‌کند. از دیگر نتایج این تحقیق می‌توان به تأثیر قابل توجه عدد گراشوف بر جابجایی دیوار الاستیک اشاره کرد.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Hdanandeh@tabrizu.ac.ir



برهم کنش بین سیال و دیواره الاستیک با استفاده از روش دلخواه اویلری- لاگرانژی و روش اجزا محدود حل شده است. اثرات مدول الاستیسیته، شناوری و اینرسی به نسبت ویسکوز با در نظر گرفتن دامنه‌های مختلفی بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که حضور دیواره الاستیک در مقایسه با دیواره‌های صلب حفره، نرخ انتقال حرارت را تا ۱۷٪ بهبود می‌بخشد.

اوزتوپ و فاتح [۷] در سال ۲۰۱۸ جریان آرام نانو سیال همرفتی با یک دیواره الاستیک را بررسی کرده و برای حل معادلات حاکم از روش المان محدود استفاده کردند. در این پژوهش سطح الاستیک توسط جریان به ارتعاش در آمده و به صورت آزاد نوسان می‌کند و تأثیر مدول یانگ سطح الاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده شد که انعطاف‌پذیری دیواره منجر به تغییر مشخصات جریان سیال و انتقال گرما برای مسئله می‌شود. با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی ذره جامد، نرخ انتقال گرما موضعی و متوسط افزایش می‌یابد. میانگین عدد ناسلت تا حدود ۰.۱٪ برای دیوار انعطاف‌پذیر با کم‌ترین مدول الاستیک در مقایسه با دیوار کف صلب افزایش می‌یابد. اضافه کردن نانو افزودنی‌ها به سیال پایه نیز منجر به افزایش انتقال گرما شده است.

هاشم زاده و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۹ تأثیر انعطاف‌پذیری یک صفحه نازک گرم بر انتقال گرمای طبیعی را بررسی کردند. در این طرح صفحه گرم به صورت افقی بین دو صفحه عمودی سرد در نظر گرفته شده است و برای سیال‌های مختلف، عدد نوسلت را مورد بررسی قرار داده‌اند. معادلات حاکم با استفاده از روش المان محدود گالرکین حل شده‌اند و اتصال بین سیال و جامد با استفاده از تکنیک مش تغییر شکل یافته مجزا براساس روش دلخواه بر مبنای روش لاگرانژی صورت گرفته است در حالی که معادلات گرما و جریان خون با استفاده از روش اویلری حل شده‌اند. نتایج گزارش شده نشانگر این است که عدد پراتل برعکس عدد رایلی تأثیر ناچیزی بر مقدار عدد نوسلت دارد.

سان و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۹ انتقال گرمای اجباری از سطح گرم دارای پره الاستیک را مورد بررسی قرار دادند که جریان در این طرح آرام، تراکم ناپذیر و دو بعدی در نظر گرفته شده است. در این کار تأثیر تغییر طول و الاستیسیته بر روی میزان انتقال گرما در شرایط مختلف نشان داده شده است. در این طرح دو سطح دایروی و مربعی پره دار به عنوان سطح با دمای بالا برای مطالعه انتخاب شده است. نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که طول پره در افزایش یا کاهش عدد ناسلت تأثیر گذار است.

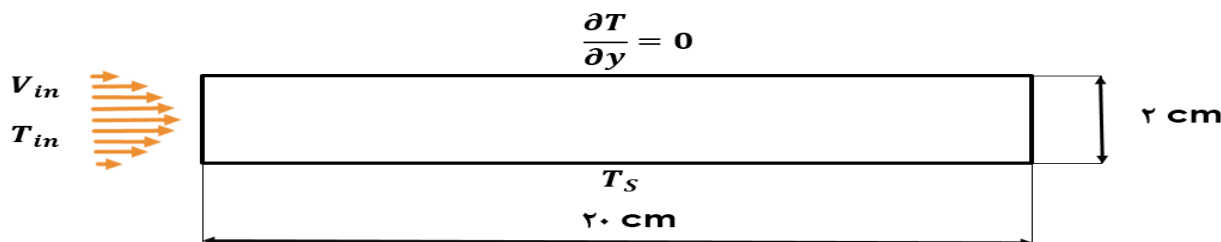
اسماعیل [۱۰] در سال ۲۰۱۹ انتقال گرمای اجباری در کانال دویعدی

علی و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۵ انتقال گرما و افزایش اختلاط با نوسان آزاد باله را مورد مطالعه قرار دادند و نقش نوسانات باله را در فرآیند اختلاط و انتقال گرما در یک جریان آرام دو بعدی به صورت عددی بررسی کردند. دامنه محاسباتی شامل چهار باله نصب شده بر روی دو دیوار مقابل است. همچنین در حالت با اعداد رینولدز ۱۰۰۰ و ۱۱۵۰، کارایی باله‌های الاستیک با باله‌های صلب مقایسه شده است. در موارد انعطاف‌پذیر، نوسان باله باعث افزایش گردان سرعت و ایجاد یک جریان آرام با گردابه می‌شود. دیگر نتایج این کار بیانگر این است که گردابه‌های ایجاد شده تأثیر قابل توجهی در بهبود اختلاط و انتقال گرما دارد.

اوزتوپ و فاتح [۴] در سال ۲۰۱۶ اثر همرفت ترکیبی در یک حفره مثلثی نسبتاً گرم پر شده با نانو سیال که دارای یک دیوار انعطاف‌پذیر می‌باشد را بررسی کردند. دیواره پایینی این محفظه مثلثی با سرعت ثابت حرکت کرده و دیوار عمودی چپ تا حدودی گرم می‌باشد. دیواره‌های شیبدار حفره سرد و انعطاف‌پذیر هستند. در این کار عددی معادلات حاکم با روش اجزای محدود باقی مانده گالرکین حل شده‌اند. در این پژوهش اثرات عدد ریچاردسون، عدد رایلی، مدول الاستیک دیواره انعطاف‌پذیر را بر انتقال گرما به صورت عددی بررسی کردند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که انتقال گرما به عدد ریچاردسون و عدد رایلی وابسته می‌باشد. همچنین با افزایش اندازه الاستیسیته دیواره مایل آهنگ انتقال گرما افزایش می‌یابد.

قلم باز و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۷ تأثیر پره‌های انعطاف‌پذیر در آهنگ انتقال گرمای طبیعی را در یک حفره مربعی شکل با روش المان محدود به کمک روش دلخواه اویلری-لاگرانژی مورد تحلیل عددی قرار دادند. 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 به طور قابل ملاحظه افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل اختلاط جریان آهنگ انتقال گرما در پره الاستیک نسبت به پره ثابت افزایش می‌یابد.

صابر و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۸ اثر همرفت ترکیبی را روی یک کانال با حفره انعطاف‌پذیر بررسی کردند. در این مقاله به بررسی جریان همرفت مختلط در یک مجموعه کانال دارای حفره از تعامل بین جریان سیال و یک دیوار الاستیک پرداختند 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. معادلات حاکم



شکل ۱. طرحواره کانال صلب (هندسه پایه)

Fig. 1. Rigid channel scheme (basic geometry)m

ارتعاشی مختلف بررسی کرد. بنابراین در این کار سطح گرم ثابت و غیر ارتعاشی بوده و دیوار الاستیک سطح دیگر با نوسان خود خطوط جریان و اندازه انتقال گرما از سطح گرم را تحت تأثیر قرار می‌دهد که این تغییرات وابسته به شرایط ارتعاشی جدار الاستیک می‌باشد. اما نوآوری اصلی این کار ارتعاش اجباری بودن نوسانگر می‌باشد. در بیشتر کارهای صورت گرفته سطح الاستیک تحت نیروی وارد شده از سیال عامل در حال حرکت 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 می‌باشد. اما در کار حاضر برای سطح الاستیک ارتعاش اجباری سینوسی تحت فرکانس ۱ Hz و دامنه‌های مختلف در نظر گرفته شده است و تأثیر بیشینه دامنه نوسانی بر روی جریان بررسی شده است که در حال حاضر این شرایط کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- شرح مسئله و مدل فیزیکی

شکل ۱ طرحواره هندسه پایه کانال با مرزهای صلب را نشان می‌دهد. در این مسئله سیال عامل هوا می‌باشد که با عدد رینولدز ۱۰۰ وارد کانال دو بعدی می‌شود. سطح زیرین این کانال در دمای ۱۵/۳۴۳ K ثابت نگه داشته شده و سطح بالایی این کانال عایق می‌باشد. سرعت متوسط جریان یکنواخت بالادست ۰/۳۸ و دمای متوسط جریان یکنواخت بالادست K ۱۵/۲۹۳ در نظر گرفته شده است که برای سرعت بیشتر حلگر در حل این مسئله از سرعت توسعه یافته بدست آمده از رابطه ۱ در ورودی کانال استفاده شده است [۱۲].

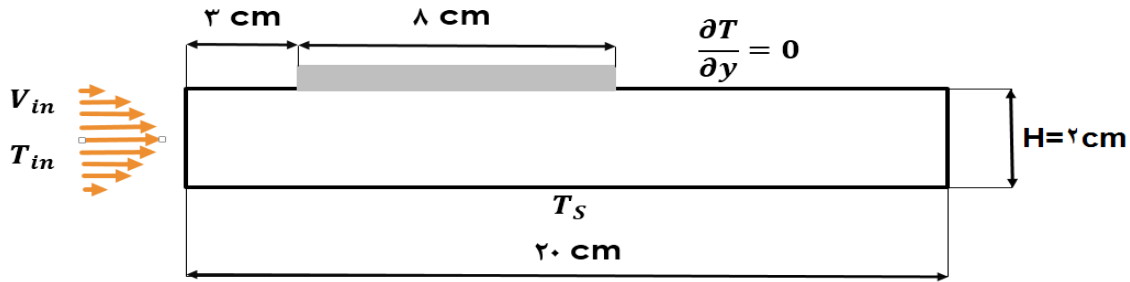
$$V_{in} = 6u_m \frac{y}{H} \left(1 - \frac{y}{H}\right) \quad (1)$$

که در آن V_{in} پروفیل سرعت توسعه یافته، u_m سرعت متوسط جریان

با جریان تراکم ناپذیر آرام را مورد بررسی قرار داده است. در این کار سطح پایین جامد بوده و تحت شار گرمایی ثابت قرار گرفته و سطح بالایی الاستیک بوده 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 و برای حل از روش دلخواه لاگرانژی-اولیری و بر مبنای روش المان محدود استفاده کردند. نتایج حاصله نشانگر افزایش ۹۴٪ عدد ناسلت و افزایش ۲۱۰٪ ضریب افت فشار در این طرح در مقایسه با کانال بدون بفل می‌باشد.

اوزتوپ و فاتح [۱۱] در سال ۲۰۱۹ همرفت اجباری را در یک کانال منشعب با دیواره‌های الاستیک تحت تأثیر میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار دادند که از یک مانع رسانای L شکل برای کنترل میدان جریان استفاده شده است. برای حل معادلات حاکم از روش اجزای محدود گالرکین استفاده شده و روش دلخواه-لاگرانژی-اولیری برای توصیف حرکت سیال با دیواره‌های الاستیک تحت ارتعاش آزاد در کانال استفاده شده است. در این پژوهش اثرات پارامترهای مختلف مانند مدول الاستیک، طول الاستیک و اندازه موانع در ویژگی‌های جریان سیال و ویژگی‌های انتقال گرما همرفتی بررسی شده است. نتایج بیانگر این می‌باشد که اندازه و مدول الاستیک دیواره انعطاف پذیر در اندازه انتقال گرما مؤثر است. عدد نوسلت متوسط با بزرگتر شدن طول دیواره الاستیک حدود ۹٪ کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که اندازه و جهت مانع L شکل تأثیر قابل توجهی در سرعت انتقال گرما دارد.

با بررسی کارهای صورت گرفته مشاهده می‌شود در اکثر تحقیق‌ها 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 مرزهای الاستیک با مرزهای صلب در بخشی از مجرا را مطالعه کرده و تأثیرات ارتعاش جدار الاستیک بر جریان تراکم ناپذیر گرما-شاره را در دامنه



شکل ۲. طرحواره کانال الاستیک (هندسه هدف مورد بررسی)

Fig. 2. Elastic channel scheme (target geometry under study)

برای سطح الاستیک [۵]:

$$\rho_s \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{d}_s}{\partial t^2} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{F}_s \quad (5)$$

در روابط بالا ρ_s چگالی، \mathbf{u} ویسکوزیته سنماتیکی، α ضریب پخش، \mathbf{F}_s نیروی خارجی، \mathbf{d}_s جابجایی سطح الاستیک، $\boldsymbol{\sigma}_s$ تانسور تنش کوشی و \mathbf{F}_s نیروی خارجی می باشد.

شرایط مرزی:

برای نمونه با در نظر گرفتن یه کانال دو بعدی به طول L و ارتفاع H که سطح پایینی تحت دمای ثابت بوده و سطح بالایی یک جدار الاستیک باشد، شرایط مرزی به صورت معادلات (۶) و (۷) تعریف می شود:

$$\begin{aligned} u = V_{in}, v = 0, T = T_{in} \text{ at } x = 0, 0 < y < H \\ p = p_0 \text{ at } x = L, 0 < y < H \\ u = 0, v = 0, T = T_s \text{ at } y = 0, 0 < x < L \end{aligned} \quad (6)$$

در این روابط p_0 فشار مقطع خروجی، T_{in} دمای سیال ورودی T_s دمای سطح گرم کانال است. برای تعیین شرط مرزی فوقانی کانال با توجه به صلب و الاستیک بودن هر قسمت از رابطه (۷) استفاده می شود:

$$\begin{aligned} \text{قسمت صلب کانال} \quad u = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \text{ at } y = H \\ \text{قسمت الاستیک کانال} \quad u = u_s, v = v_s, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \text{ at } y = H \end{aligned} \quad (7)$$

u_s و v_s به ترتیب سرعت در جهت X و Y است. همچنین در حل

یکنواخت بالادست، H ارتفاع کانال و y فاصله از سطح پایین کانال می باشد. از کالیبره کردن نتایج مسئله هندسه پایه با نتایج تحلیلی جریان پوازی، بخشی از جدار صلب عایق فوقانی کانال با جدار الاستیک جایگزین شده است. بنابراین تنها تفاوت هندسه هدف مورد بررسی با هندسه پایه جایگزین شدن جدار الاستیک در قسمتی از سطح بالایی کانال صلب می باشد و بقیه شرایط مطابق کانال صلب می باشد. طول سطح الاستیک جایگزین شده ۸ cm و ضخامت آن ۱ mm بوده و مدول یانگ آن ۵۰ MPa می باشد. این سطح با فرکانس ۱ Hz در چهار دامنه ۱/۰، ۳/۱، ۱/۰، ۰/۷، ۰/۴ تحت ارتعاش اجباری قرار می گیرد. طرحواره کانال الاستیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳- مدل ریاضی

با در نظر جریان آرام، دو بعدی، ناپایا و تراکم ناپذیر همراه با انتقال گرمای جابجایی 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

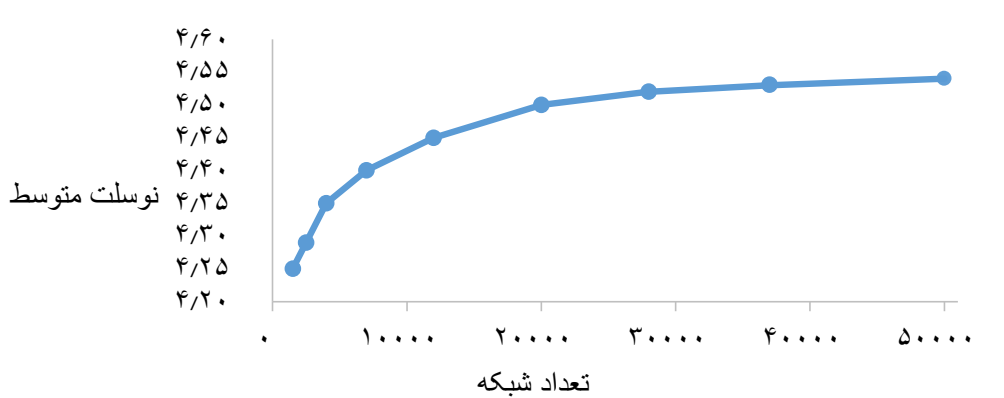
زیر می باشد [۵]:

برای جریان سیال [۵] و [۱۳]:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} - \mathbf{V}^{ms}) \cdot \nabla \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla P + U_f \nabla^2 \mathbf{V} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} - \mathbf{V}^{ms}) \cdot \nabla T = \alpha_f \nabla^2 T \quad (4)$$



شکل ۳. نمودار استقلال جواب عدد نوسلت متوسط از شبکه در کانال صلب در $Re = 100$

Fig. 3. Independence diagram of the answer of the mean Nusselt number of the mesh in the rigid channel at $Re = 100$

$$f.Re = 24 \quad (11)$$

که در این روابط Δp افت فشار در طول کانال، f ضریب اصطکاک کانال و Re عدد رینولدز می باشد.

۴- کالیبره کردن نرم افزار شبیه ساز

فیزیک‌های معرفی شده در نرم افزار کامسول ۵/۵ شبیه سازی شده است. برای هندسه‌های مورد نظر، شبکه مثلثی در نظر گرفته شده است. مسئله مورد نظر در تعداد شبکه‌های مختلف برای عدد نوسلت میانگین حل شده است که نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است. بر این اساس با تکرار حل مسئله در تعداد شبکه مختلف و اطمینان از مستقل شدن جواب‌های از شبکه، تعداد ۳۷۸۳۴ سلول برای هندسه مورد نظر در نظر گرفته شده است که شکل ۴ قسمتی از همین شبکه بندی هندسه را نشان می‌دهد. از این رو ابتدا هندسه پایه حل شده و ۲ پارامتر ضریب اصطکاک و عدد نوسلت متوسط به دست آمده از نتایج نرم افزار با نتایج حل تحلیلی جریان پواری برای کانال صلب اعتبار سنجی شده و تنظیمات نرم افزار بدین وسیله کالیبره شده است. سپس نتایج به دست آمده از نرم افزار، با نتایج تحلیلی راستی آزمایی شده است. سپس عدد نوسلت میانگین لحظه‌ای به دست آمده از روابط (۹) در جدول ۱ با مقادیر تحلیلی جریان پواری مقایسه شده است. همچنین در جدول ۲ ضریب اصطکاک بدست آمده از جواب تحلیلی جریان پواری کانال صلب در رابطه (۱۱) با نتایج به دست آمده از نرم افزار کالیبره شده و استفاده از رابطه (۱۰) مقایسه شده است. نتایج بیانگر اختلاف حدود ۵/۴٪ بین نتایج تحلیلی و حل نرم افزار می‌باشد که قابل قبول است. در ادامه با اطمینان از

معادلات برهم کنش شاره-جامد باید دو شرط مرزی نشان داده شده در معادله (۸) که شرط مطابقت جابجایی و تنش است برقرار باشد [۵]:

$$\frac{\partial d_s}{\partial t} = V, \quad \sigma_s \cdot n = -p + \mu_f \nabla V \quad (8)$$

که μ_f لزجت دینامیکی سیال می‌باشد. برای تعیین اثر برهم کنش شاره-جامد بر آهنگ انتقال گرما عدد نوسلت میانگین لحظه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد که به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۴].

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} \cdot D_h}{k_f}, \quad h_x = \frac{q''}{T_s - T_m}, \quad \bar{h} = \frac{1}{L} \int h_x dx \quad (9)$$

در این روابط \overline{Nu} عدد نوسلت میانگین لحظه‌ای، \bar{h} ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط، D_h قطر هیدرولیکی کانال، k_f ضریب رسانش سیال، h_x ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی، q'' شار حرارتی منتقل شده از سطح، T_m دمای متوسط سیال در هر x از کانال است. یکی دیگر از پارامترهای مورد بررسی، ضریب اصطکاک در کانال است که با افت فشار مطابق رابطه (۱۰) ارتباط داشته و مقدار تحلیلی آن در رابطه (۱۱) آورده شده است [۱۵].

$$\Delta p = 2f \cdot \rho u_m^2 \cdot \frac{L}{D_h} \quad (10)$$

جدول ۱. عدد نوسلت متوسط کالیبره شده نرم افزار

Table 1. The mean Nusselt number calibrated software.

خطا	عدد نوسلت متوسط (حل تحلیلی)	عدد نوسلت متوسط (حل شبیه سازی)
۵/۳٪	۴/۸۴	۴/۵۸

جدول ۲. ضریب اصطکاک کالیبره شده نرم افزار

Table 2. The coefficient of friction calibrated software.

خطا	ضریب اصطکاک (تحلیلی)	ضریب اصطکاک (شبیه سازی)	افت فشار	قطر هیدرولیکی	سرعت متوسط	چگالی	طول	رینولدز
۵/۴٪	۰/۲۴۰	۰/۲۵۳	۰/۰۰۴۲۵	۰/۰۴	۰/۰۳۸	۱/۱۶۲	۰/۲	۱۰۰

با عدد نوسلت میانگین لحظه‌ای کانال صلب در ادامه مقایسه شده است. همچنین نتایج در سه زمان ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵ ثانیه نشان داده شده و با نتایج کانال صلب مقایسه شده‌اند.

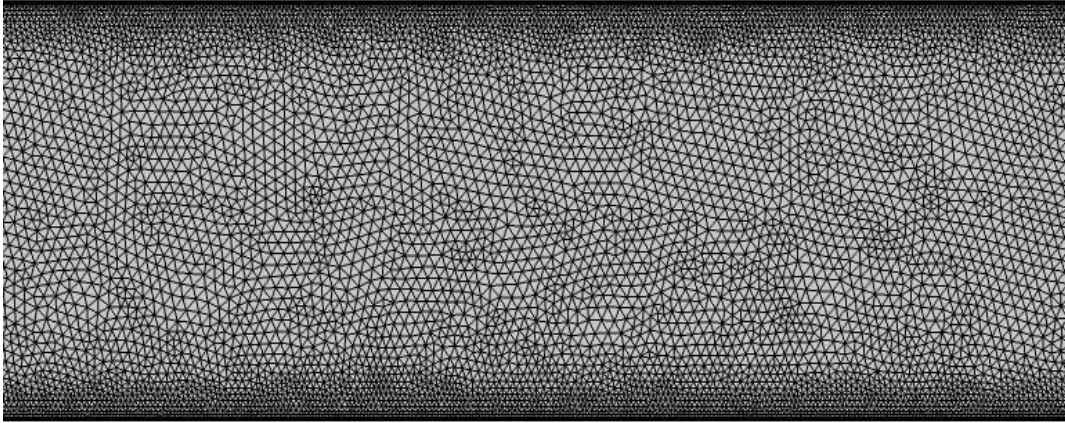
شکل ۵ کانتور سرعت در کانال صلب را نشان می‌دهد همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در کانال صلب با عبور جریان آرام کانتورهای سرعت یکنواخت و موازی جدار می‌باشد و خطوط جریان تداخلی با یکدیگر ندارند ولی در کانال الاستیک با ارتعاش سطح الاستیک، سطح مقطع تغییر کرده و موجب تغییر پروفیل و کانتورهای سرعت در کانال الاستیک می‌شود که در شکل‌های ۶-۹ کانتورهای سرعت در کانال صلب و الاستیک با دامنه‌های ارتعاشی مختلف در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵ ثانیه نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد با نوسان جدار الاستیک خطوط جریان از حالت یکنواخت خارج می‌شوند و گردابه‌هایی در طول کانال ایجاد می‌شود. در حقیقت با نوسان سطح الاستیک و افزایش سطح مقطع کانال، سیال نزدیک دیواره الاستیک تحت نوسانگر حرکت می‌کند و باعث کاهش فشار در محدوده سطح الاستیک می‌شود و موجب می‌شود سیال با فشار به نسبت زیاد در بالادست و پایین دست به محدوده مورد نظر جریان می‌یابد

نتایج حل نرم افزار در کانال صلب، قسمت الاستیک به کانال اضافه شده و تحت شرایط قبل کانال الاستیک در نرم افزار مورد بررسی قرار گرفته شده است که نتایج به دست آمده در ادامه نشان داده شده است.

۵- تفسیر و تحلیل نتایج

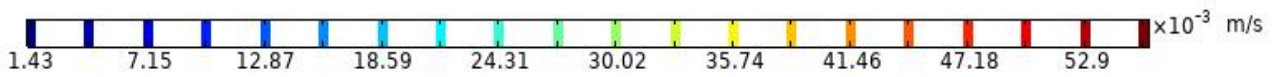
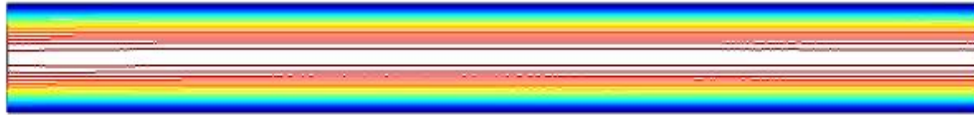
همانگونه که اشاره شد پس از اطمینان از نتایج بدست آمده از کانال صلب، کانال الاستیک در همان شرایط در دامنه‌های مختلف نوسانی مورد شبیه‌سازی قرار گرفته و نتایج حاصل از ارتعاش کانال الاستیک در دامنه‌های مختلف با کانال صلب کالیبره شده مقایسه شده است. بیشینه دامنه‌های CM ۳/۱، ۱/۰، ۰/۷ و ۰/۴ برای ارتعاش جدار الاستیک کانال الاستیک در نظر گرفته شده است که آهنگ انتقال گرما در این دامنه‌ها مورد بررسی قرار گرفته و با یکدیگر و کانال صلب مقایسه شده است.

نتایج به دست آمده بعد از طی مدت معینی در حدود ۷ ثانیه در دوره تناوب‌های ۱ ثانیه، ثابت مانده‌اند. بنابراین پارامترهای مورد نظر از جمله عدد نوسلت میانگین لحظه‌ای بعد از ۸ ثانیه و ثابت بودن جواب‌ها در یک دوره تناوب میانگین گیری شده و عدد نوسلت میانگین کلی به دست می‌آید که



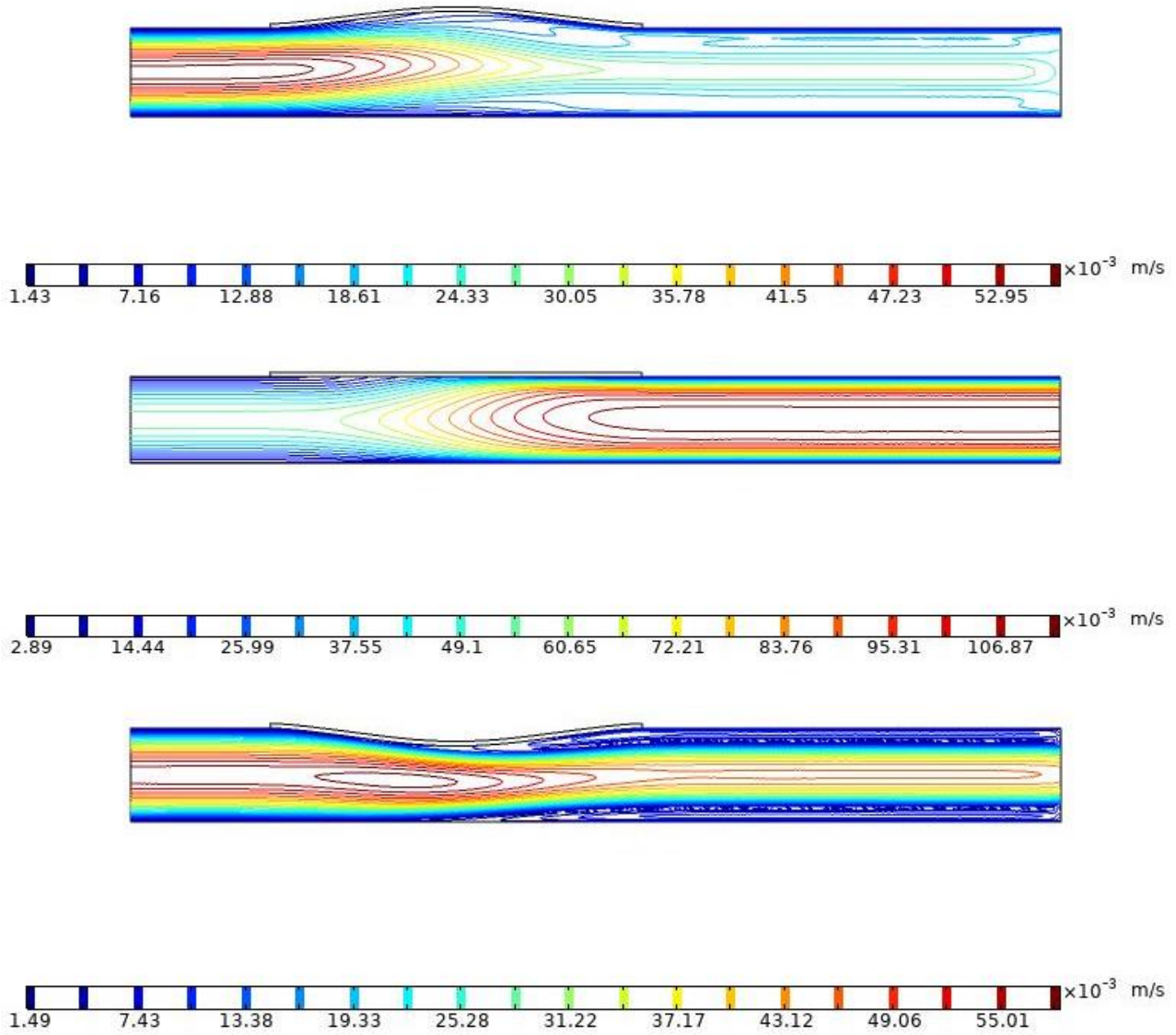
شکل ۴. قسمتی از شبکه بندی در طول کانال

Fig. 4. Part of the mesh along the channel



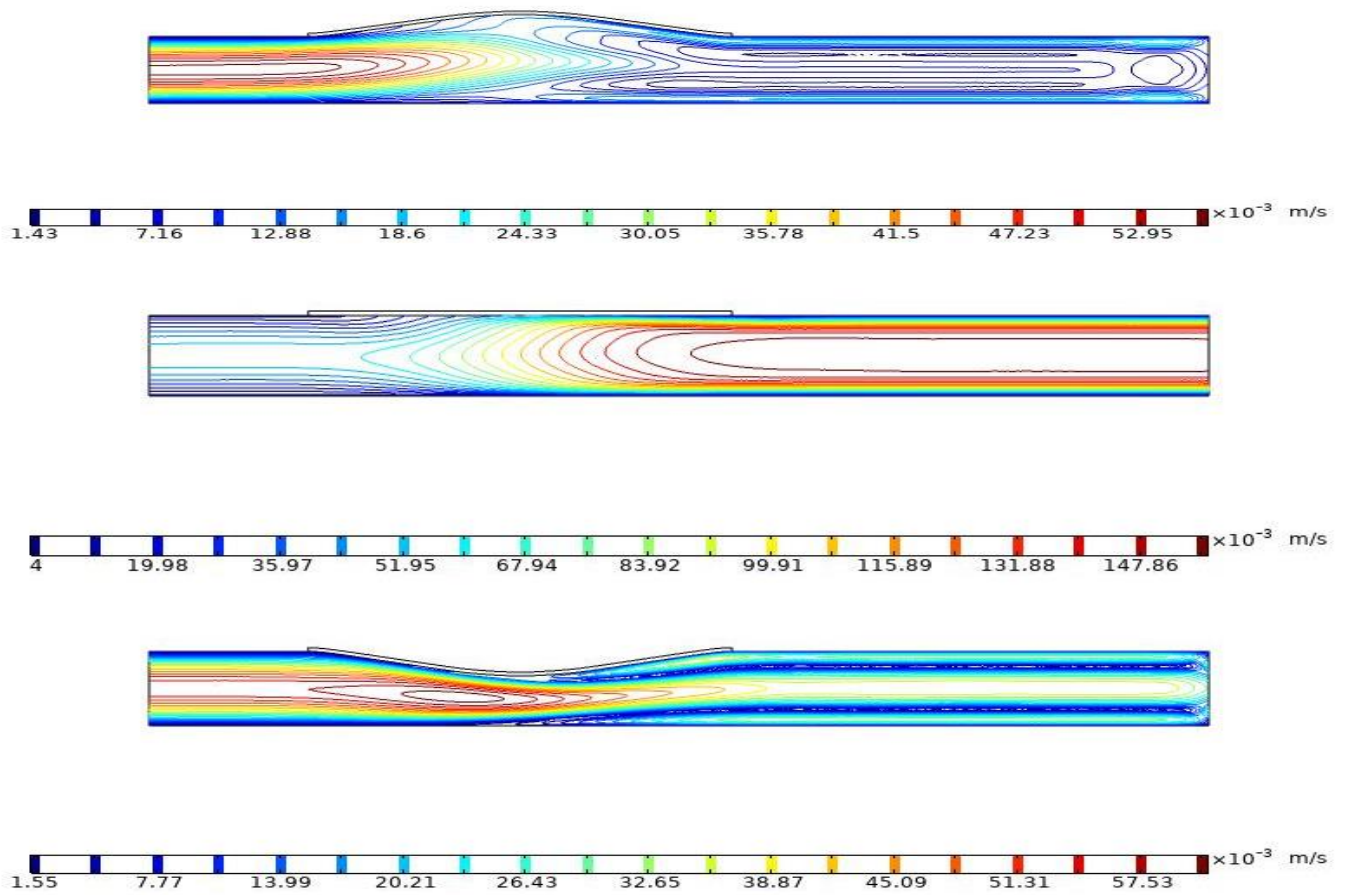
شکل ۵. کانتور سرعت در کانال صلب

Fig. 5. Velocity contour in rigid channel



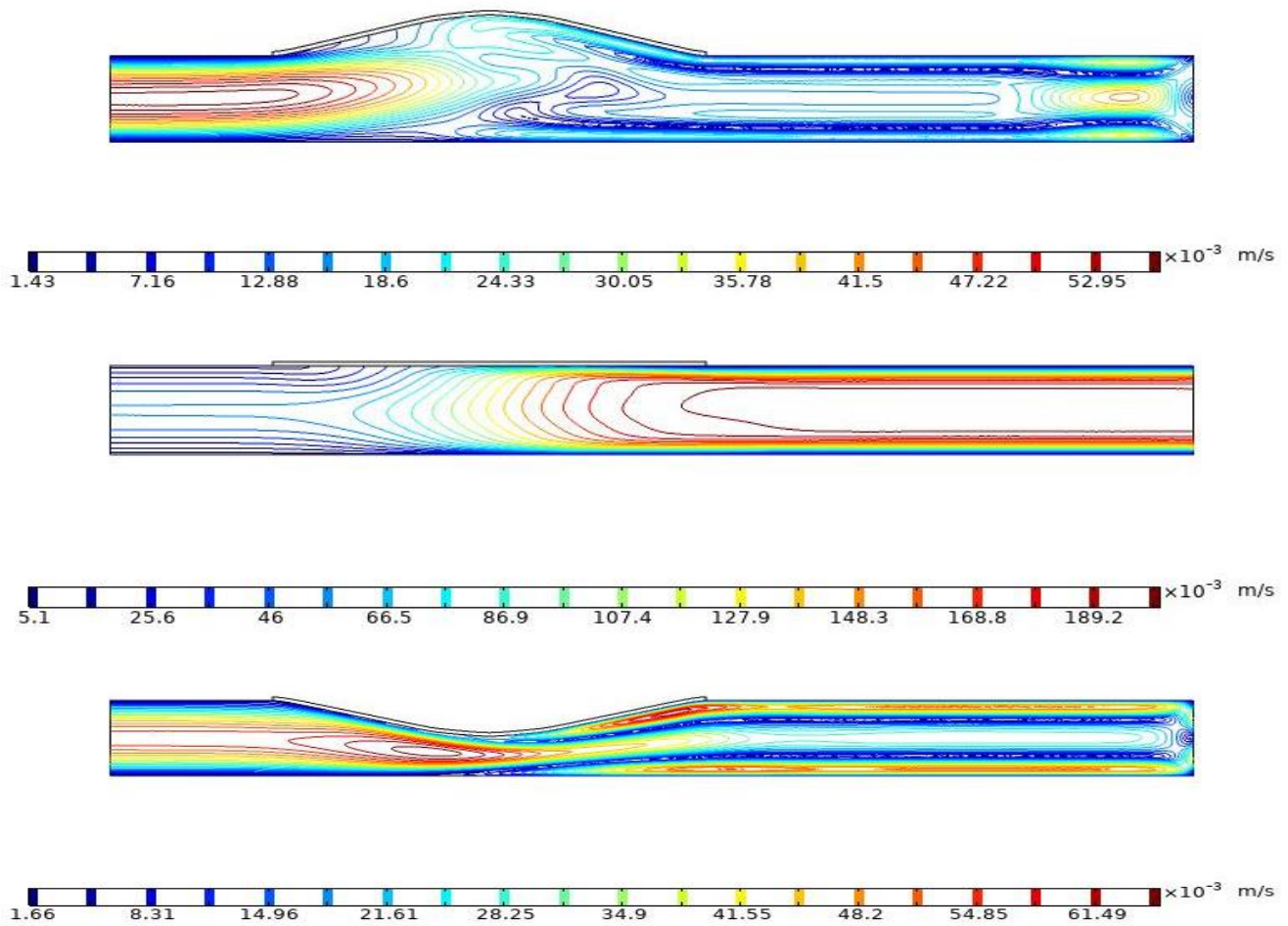
شکل ۶. کانتور سرعت در کانال الاستیک با دامنه ۰/۴ در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵

Fig. 6. Velocity contour in the elastic channel with amplitude 0.4 at times of 8.25, 8.5 and 8.75m



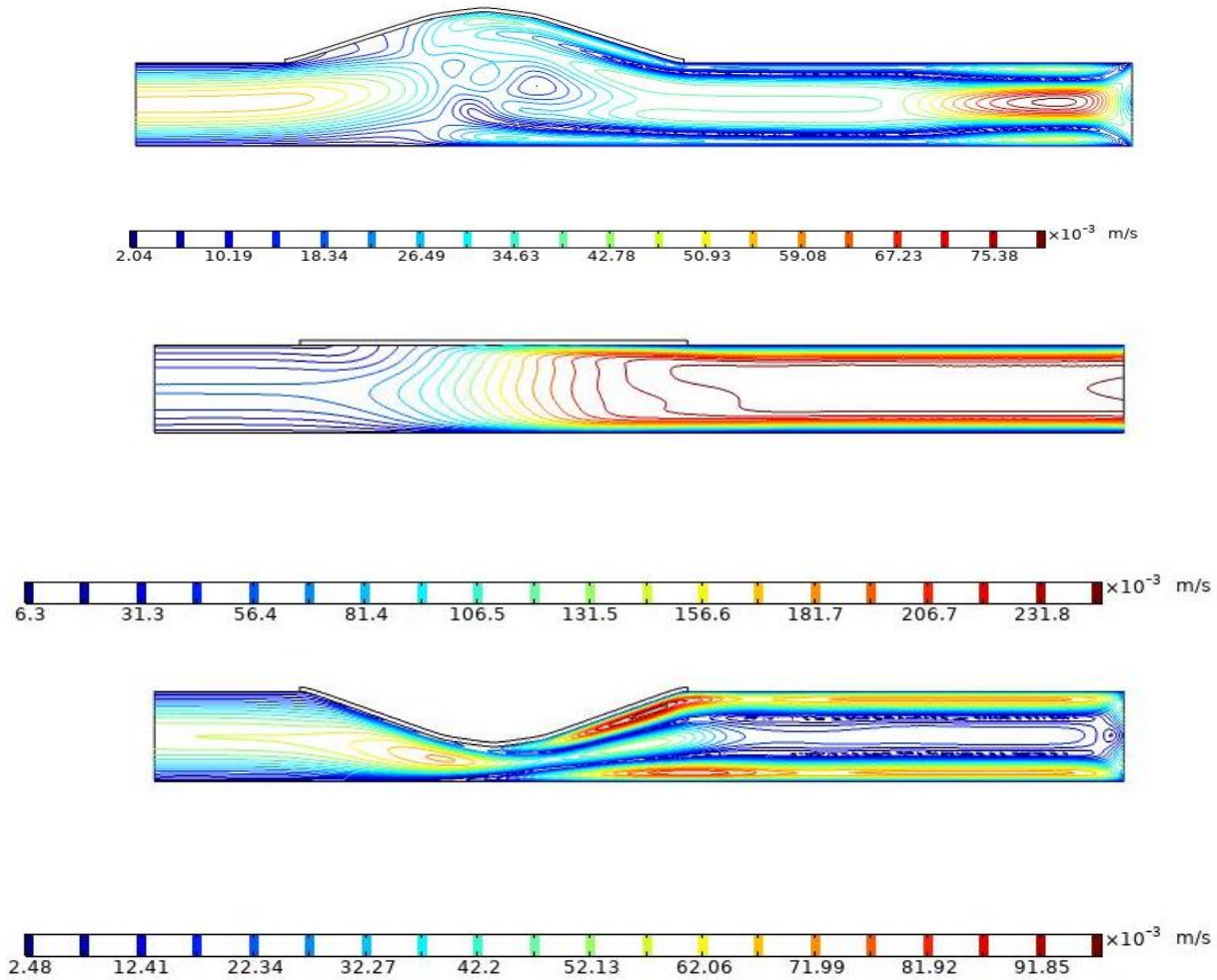
شکل ۷. کانتور سرعت در کانال الاستیک با دامنه ۰/۷ در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵

Fig. 7. Velocity contour in the elastic channel with amplitude 0.7 at times of 8.25, 8.5 and 8.75



شکل ۸. کانتور سرعت در کانال الاستیک با دامنه ۱ در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵

Fig. 8. Velocity contour in the elastic channel with amplitude 1 at times of 8.25, 8.5 and 8.75

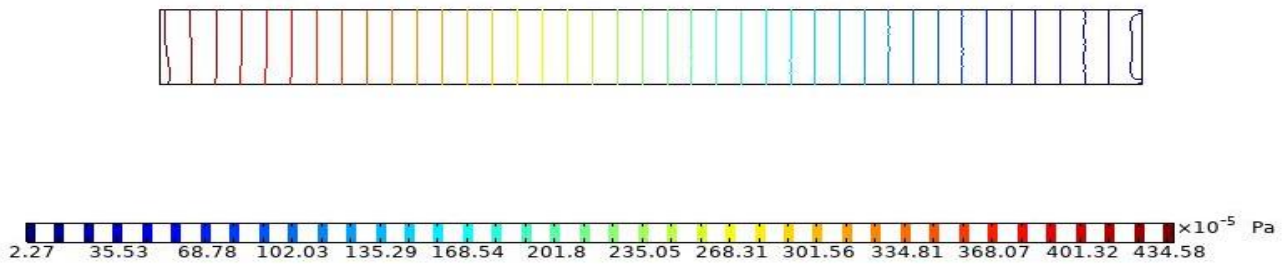


شکل ۹. کانتور سرعت در کانال الاستیک با دامنه ۱/۳ در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵

Fig. 9. Velocity contour in the elastic channel with amplitude 1.3 at times of 8.25, 8.5 and 8.75ms

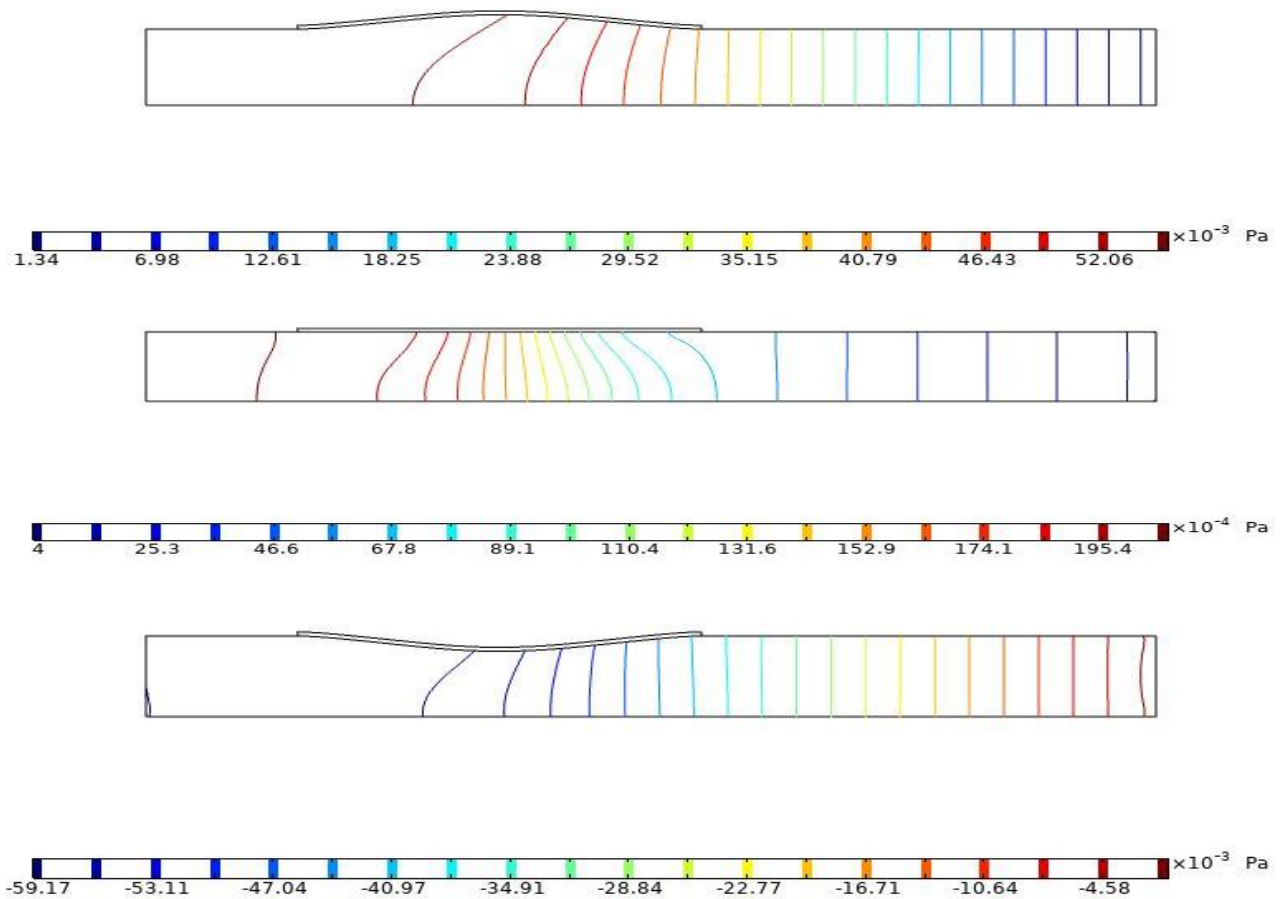
است خطوط هم فشار تحت تأثیر نوسانگر قرار گرفته و خطوط فشار ثابت در نزدیکی مرز الاستیک بسته به دامنه و فرکانس مرز الاستیک به طور پیوسته تغییر می‌کند. با دقت به کانتورهای فشار مشاهده می‌شود که در طول کانال فشار منفی بوده و موجب ایجاد جریان برگشتی می‌شود که این خود موجب به وجود آمدن گردابه‌هایی در طول کانال می‌شود. در حقیقت با نوسان سطح الاستیک سطح مقطع کانال پیوسته تغییر می‌کند و موجب می‌شود فشار در طول کانال پیوسته کاهش و افزایش می‌یابد و باعث به وجود آمدن جریان برگشتی و تشکیل گردابه در طول کانال می‌شود. بنابراین با افزایش دامنه ارتعاشی گرادین فشار افزایش یافته و موجب ایجاد گردابه‌ها پر قدرت می‌شود.

که این عامل موجب به وجود آمدن گردابه‌های نشان داده شده می‌شود. از طرف دیگر با کاهش سطح مقطع نوسان سرعت جریان افزایش پیدا کرده و تعداد گردابه‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش اندازه بیشینه دامنه نوسان، قدرت و تعداد گردابه‌ها بیشتر شده و جریان بیشتر تحت تأثیر نوسان سطح الاستیک قرار می‌گیرد که موجب تغییر سرعت جریان در طول کانال می‌شود. در ادامه شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ کانتورهای فشار در کانال صلب و الاستیک با دامنه‌های ارتعاشی مختلف در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵ ثانیه نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است کانتورهای فشار در کانال صلب موازی هم بوده و در هر مقطع، فشار ثابت می‌باشد. اما با جایگزینی سطح الاستیک که در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نشان داده شده



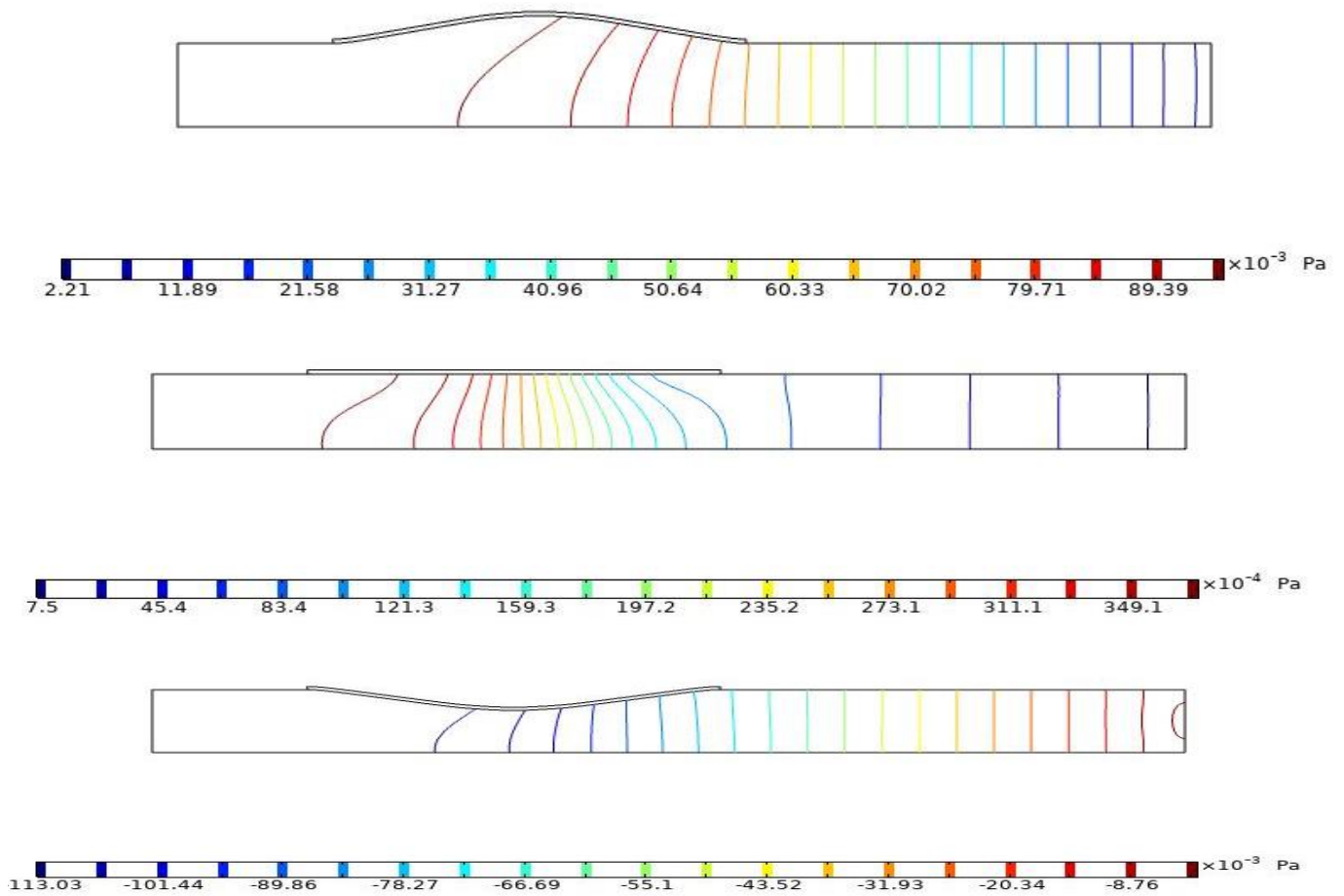
شکل ۱۰. کانتور فشار در کانال صلب

Fig. 10. Pressure contour in rigid channel



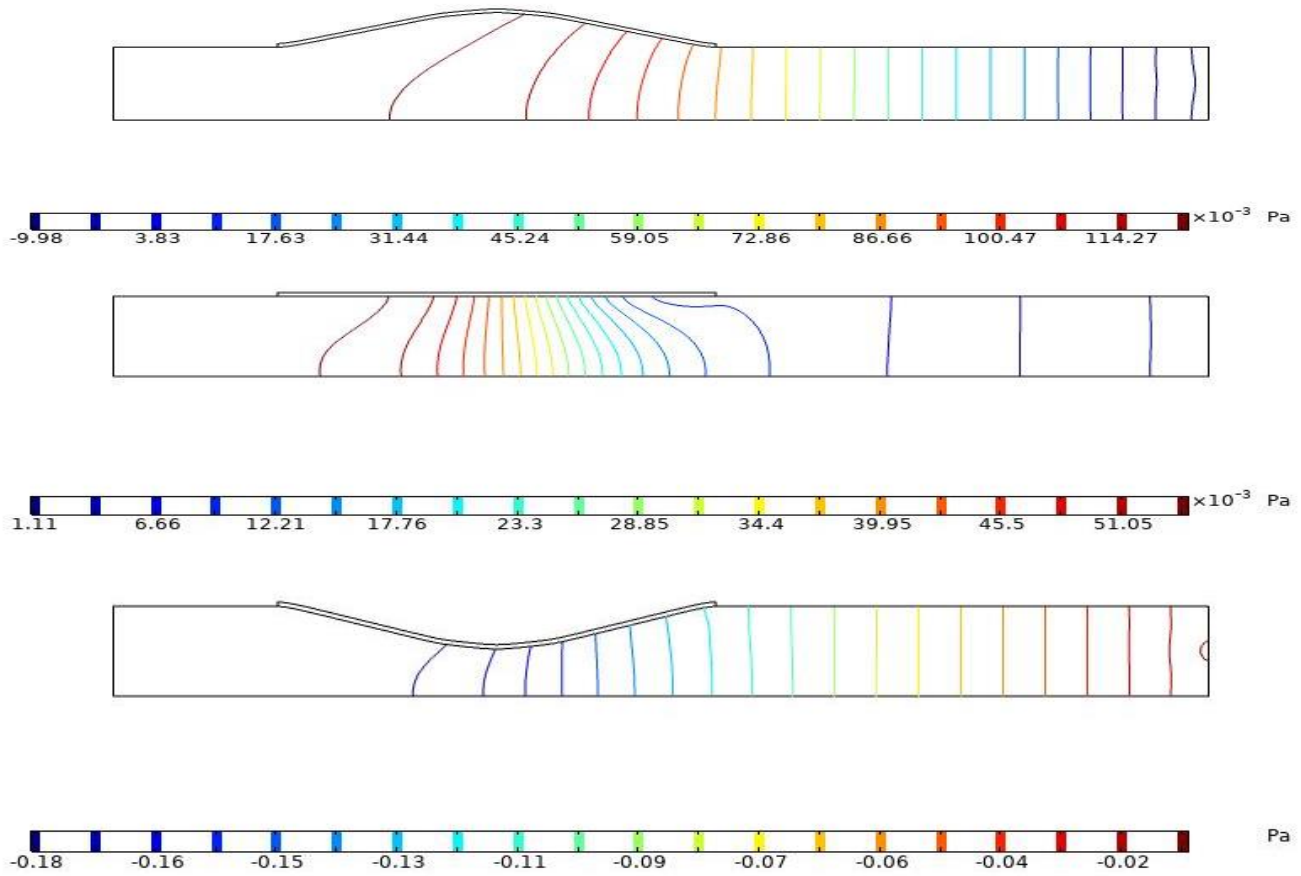
شکل ۱۱. منحنی دیسپرزشن سرعت فاز لوله فولادی با قطر ۲۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۴/۸ میلی‌متر

Fig. 11. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm



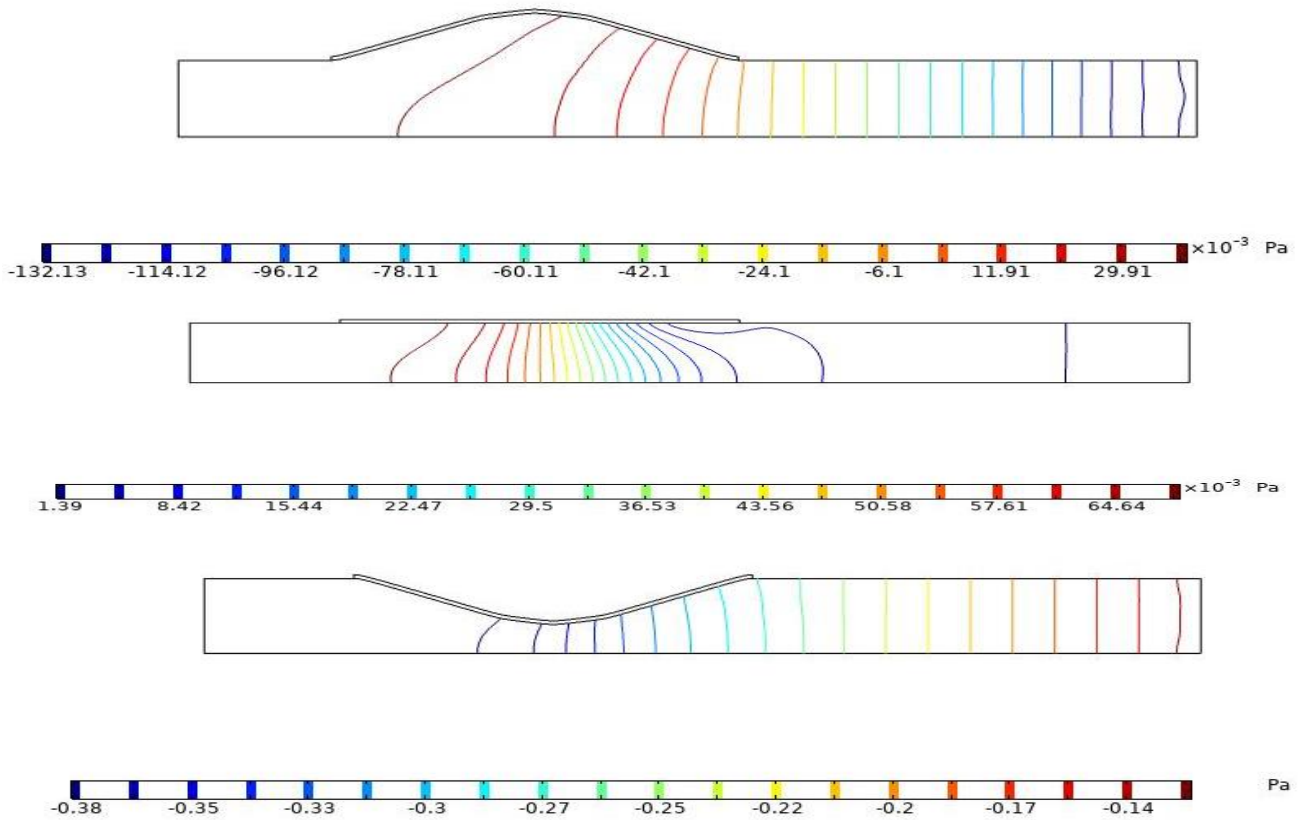
شکل ۱۲. کانتور فشار در کانال الاستیک با دامنه ۰/۷ در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵

Fig. 12. Pressure contour in the elastic channel with amplitude 0.7 at times of 8.25, 8.5 and 8.75



شکل ۱۳. کانتور فشار در کانال الاستیک با دامنه ۱ در زمان‌های $۸/۲۵$ ، $۸/۵۰$ و $۸/۷۵$

Fig. 13. Pressure contour in the elastic channel with amplitude 1 at times of 8.25, 8.5 and 8.75



شکل ۱۴. کانتور فشار در کانال الاستیک با دامنه ۱/۳ در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵

Fig. 14. Pressure contour in the elastic channel with amplitude 1.3 at times of 8.25, 8.5 and 8.75

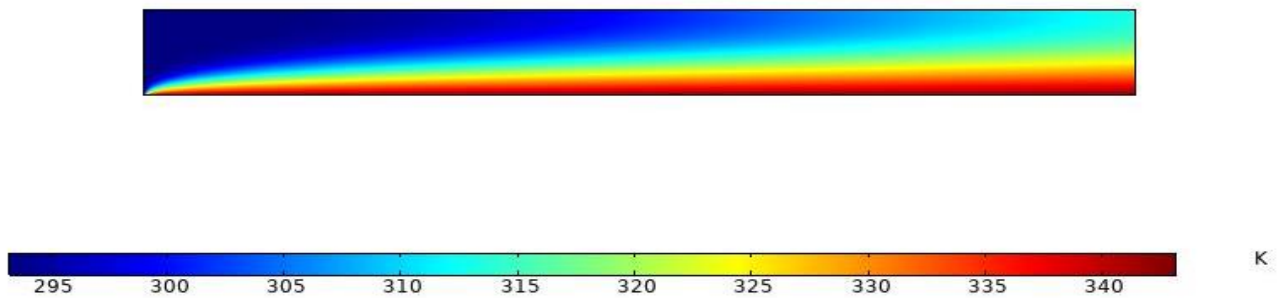
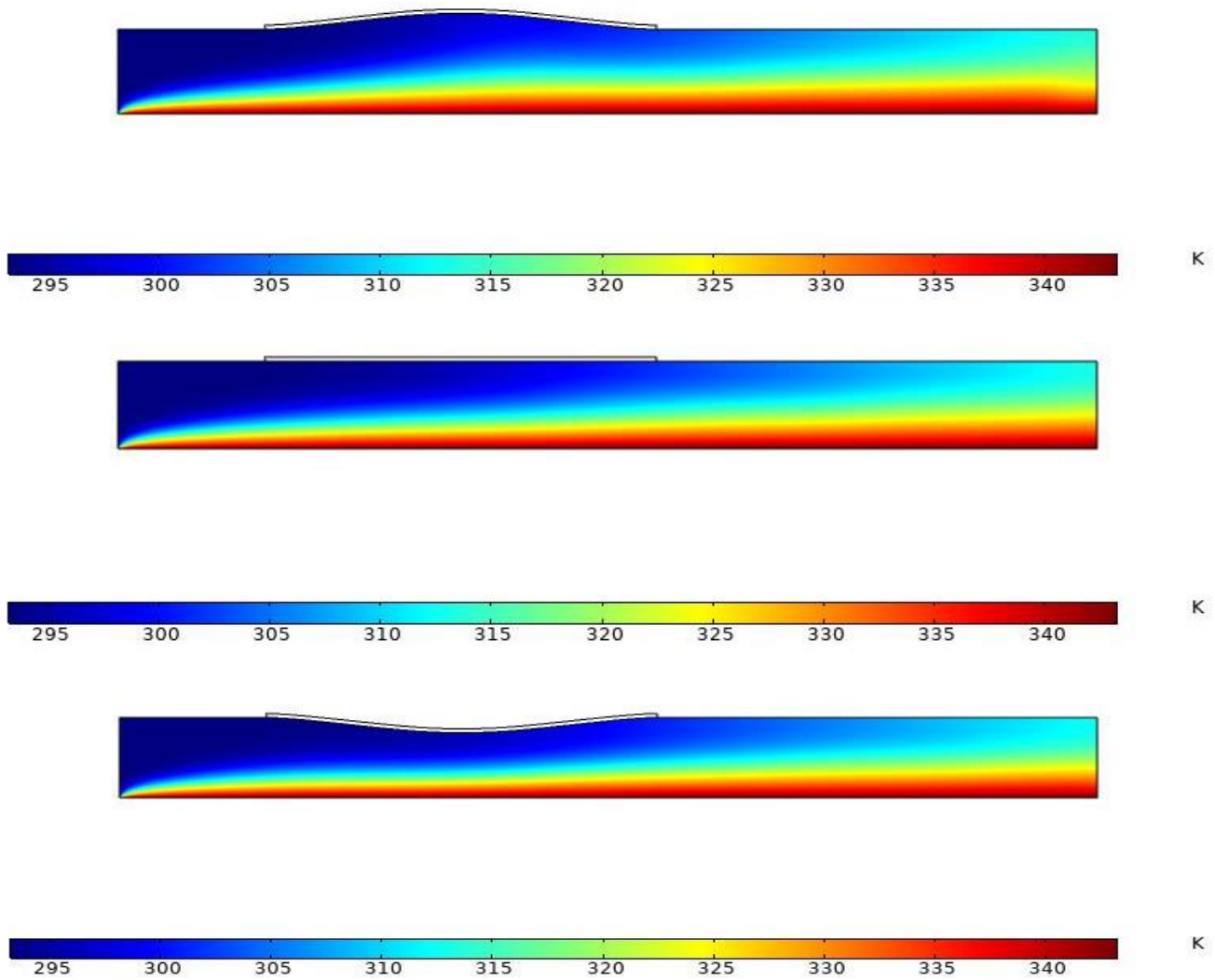


Fig. 15. Temperature distribution in rigid channel

شکل ۱۵. توزیع دما در کانال صلب

پدیده آن است که با افزایش سطح مقطع ناشی از نوسان سطح الاستیک همانطور که قبلاً گفته شد فشار نزدیک جدار الاستیک کاهش یافته و باعث می‌شود سیال عامل به طرف سطح بالایی (الاستیک)، جریان یابد که این خود باعث می‌شود ضخامت لایه مرزی دمایی افزایش یابد. از طرف دیگر با

شکل ۱۵ توزیع دما در طول کانال صلب و شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ توزیع دما در کانال الاستیک با دامنه‌های مختلف را نشان می‌دهد. با دقت در شکل‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش سطح مقطع ضخامت لایه مرزی دمایی افزایش یافته و با کاهش سطح مقطع، کاهش می‌یابد. دلیل این

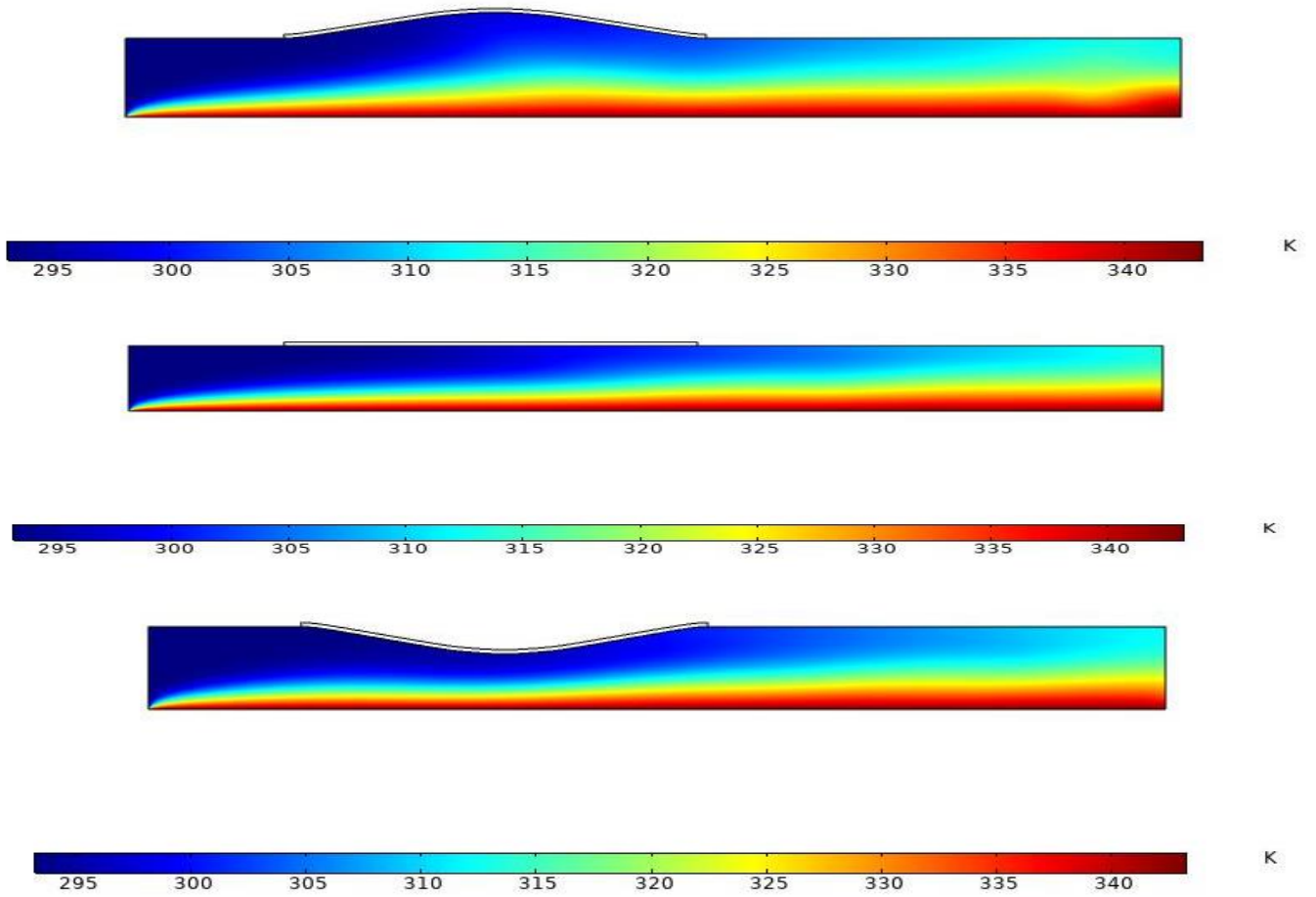


شکل ۱۶. توزیع دما در کانال الاستیک با دامنه ۰/۴ در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵

Fig. 16. Temperature distribution in the elastic channel with amplitude 0.4 at times of 8.25, 8.5 and 8.75

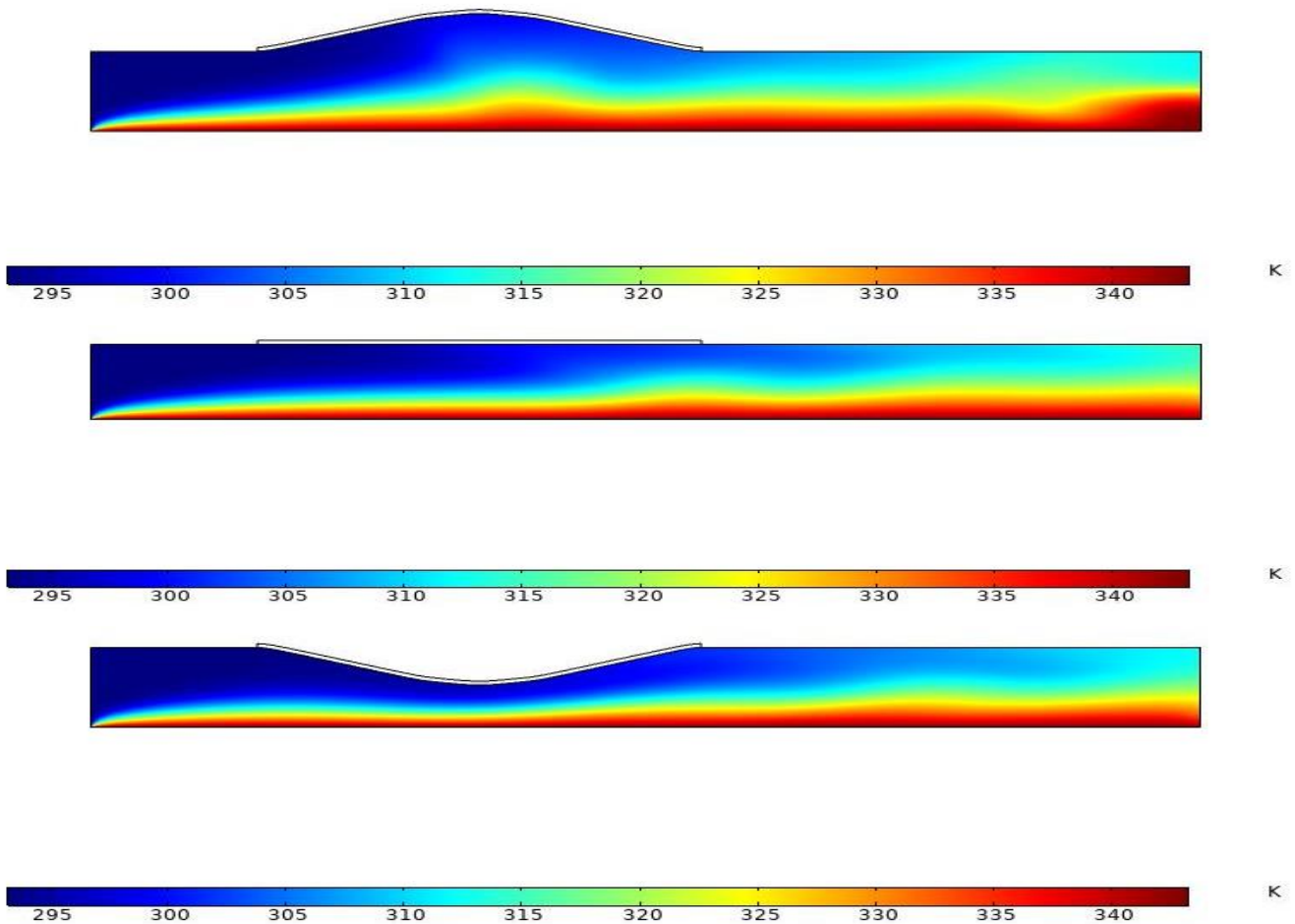
عرضی نیز در کانال دارد. بنابراین با افزایش دامنه نوسانی سیال بیشتر تحت تأثیر فرار گرفته و ضخامت لایه مرزی دمایی بیشتر تغییر می‌کند. علاوه بر آن با افزایش دامنه نوسانی سیال پایین دست نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد که نتیجه آن افزایش گرمای منتقل شده به سیال در پایین دست می‌شود.

کاهش سطح مقطع کانال به موجب نوسان سطح الاستیک لایه‌های سیال متراکم‌تر شده و ضخامت لایه مرزی دمایی کاهش می‌یابد که در شکل‌های زیر به وضوح قابل مشاهده است. در حقیقت با ارتعاش نوسانگر سیال عامل به دلیل تشکیل گردابه‌ها و جریان بازگشتی علاوه بر حرکت طولی حرکت



شکل ۱۷. توزیع دما در کانال الاستیک با دامنه ۰/۷ در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵

Fig. 17. Temperature distribution in the elastic channel with amplitude 0.7 at times of 8.25, 8.5 and 8.75

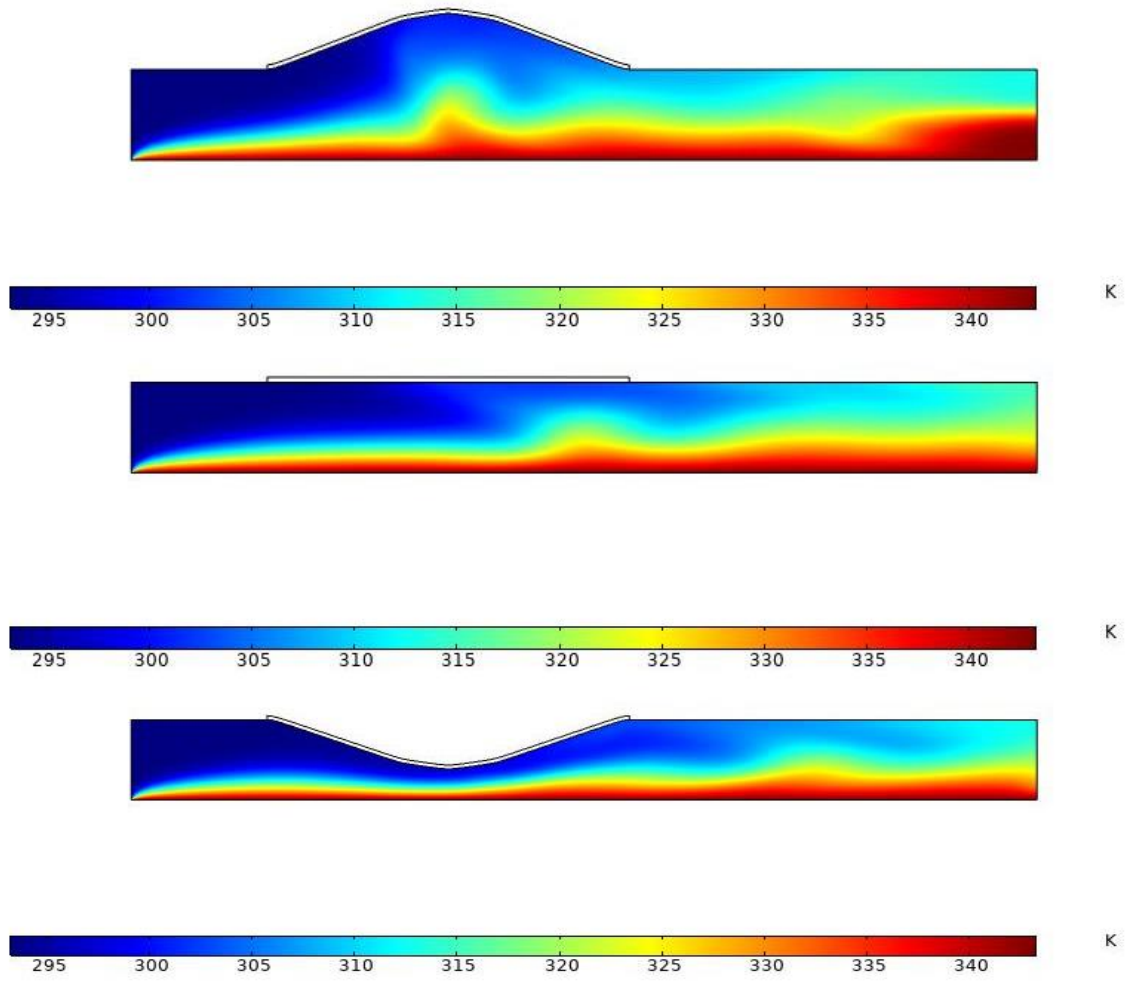


شکل ۱۸. توزیع دما در کانال الاستیک با دامنه ۱ در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵

Fig. 18. Temperature distribution in the elastic channel with amplitude 1 at times of 8.25, 8.5 and 8.75

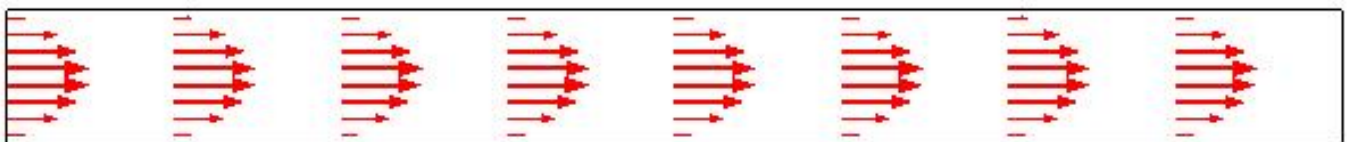
نوسان مرز الاستیک پروفیل سرعت تغییر می‌کند. همچنین با دقت در این شکل‌ها وجود جریان برگشتی و تغییر سرعت در کانال مشاهده می‌شود که علت آن تغییر سطح مقطع کانال، با نوسان مرز الاستیک می‌باشد. با افزایش دامنه نوسانی تغییرات سرعت و جریان برگشتی افزایش می‌یابد. همانطور که

همانطور که در شکل ۲۰ نشان داده شده است پروفیل سرعت در طول کانال صلب تغییر نکرده و همان پروفیل سرعت توسعه یافته ورودی کانال در طول کانال مشاهده می‌شود. از طرفی همانطور که در شکل‌های ۲۱ تا ۲۴ نشان داده شده است پروفیل سرعت در طول کانال ثابت نبوده و با



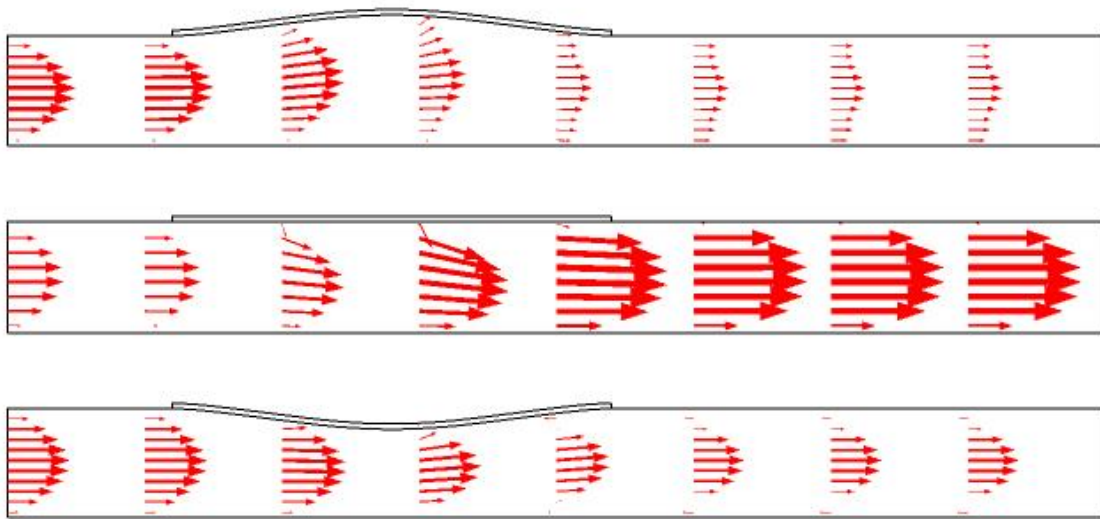
شکل ۱۹. توزیع دما در کانال الاستیک با دامنه ۰/۷ در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵

Fig. 19. Temperature distribution in the elastic channel with amplitude 1.3 at times of 8.25, 8.5 and 8.75



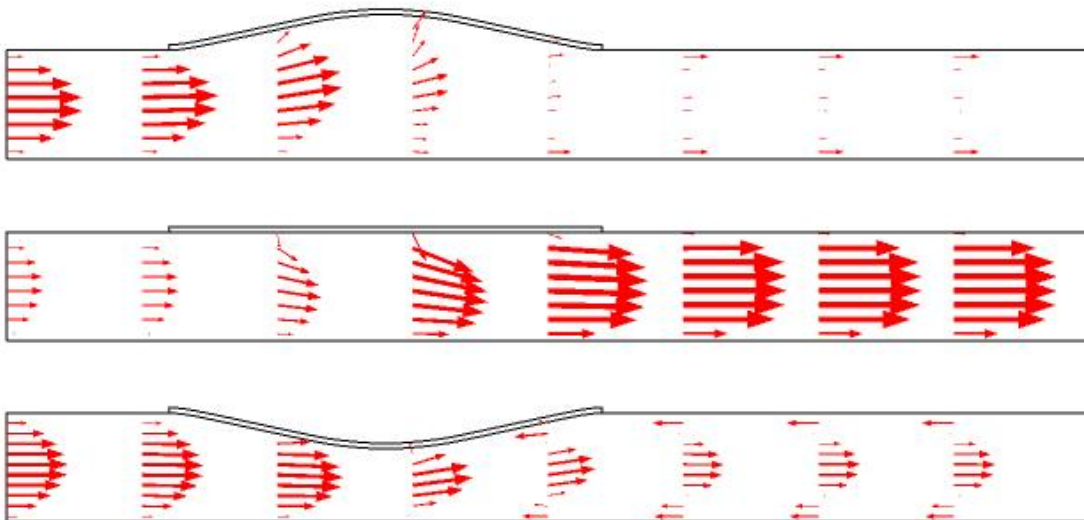
شکل ۲۰. پروفیل سرعت در طول کانال صلب

Fig. 20. Velocity profiles along rigid channels



شکل ۲۱. توزیع دما در کانال الاستیک با دامنه ۰/۴ در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵

Fig. 21. Velocity profiles in the elastic channel with amplitude 0.4 at times of 8.25, 8.5 and 8.75

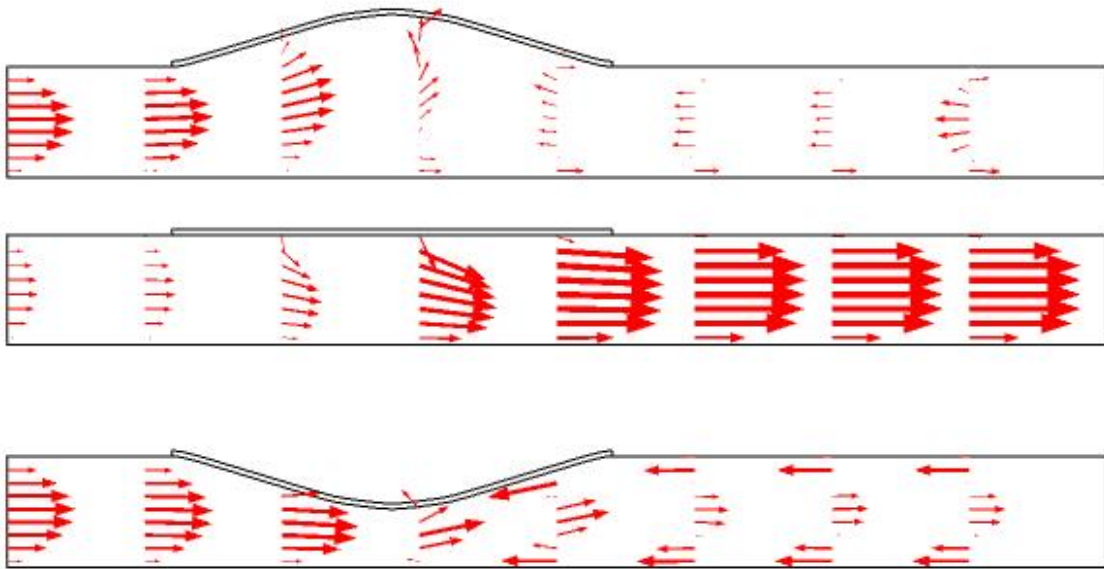


شکل ۲۲. توزیع دما در کانال الاستیک با دامنه ۰/۷ در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵

Fig. 22. Velocity profiles in the elastic channel with amplitude 0.7 at times of 8.25, 8.5 and 8.75

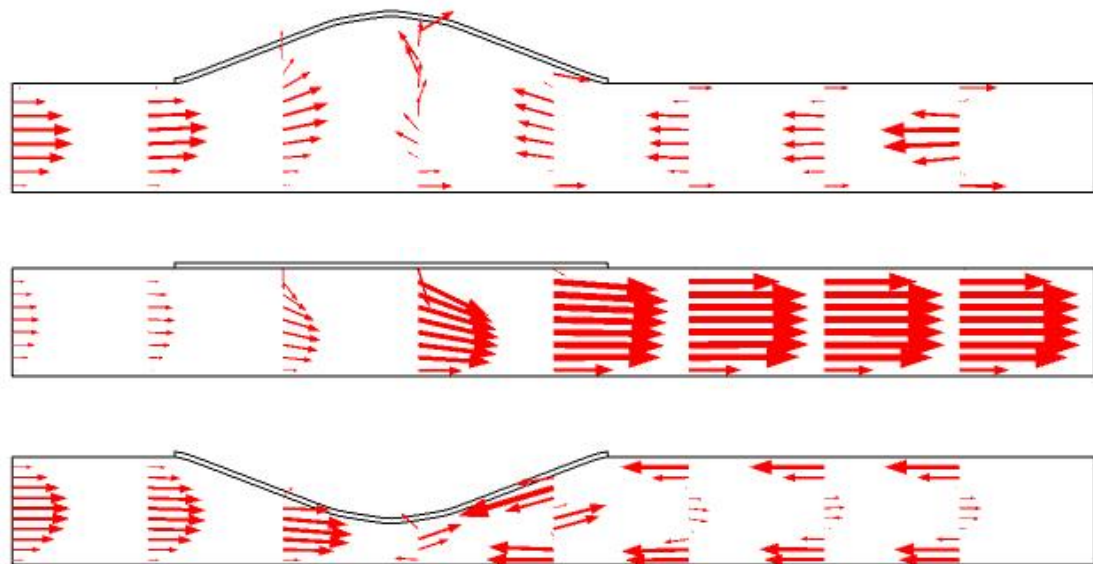
کاهش می‌یابد. در نتیجه مشاهده می‌شود با افزایش دامنه نوسانی، سرعت بیشینه جریان افزایش می‌یابد. با دقت بیشتر در این نتایج مشاهده می‌شود با رشد تدریجی دامنه سرعت سیال در اطراف دیواره‌ها در پایین دست جریان افزایش و در وسط کانال رفته رفته کاهش می‌یابد و با افزایش بیشینه دامنه

مشاهده می‌شود با نوسان جدار الاستیک و با حرکت مرز از نقطه بالایی به نقطه پایین سرعت سیال بیشتر می‌شود که علت آن کاهش سطح مقطع با ثابت بودن دبی است. همچنین با حرکت جدار از نقطه پایین به بالا سطح مقطع زیاد شده و موجب برگشت جریان می‌شود و در نتیجه سرعت جریان



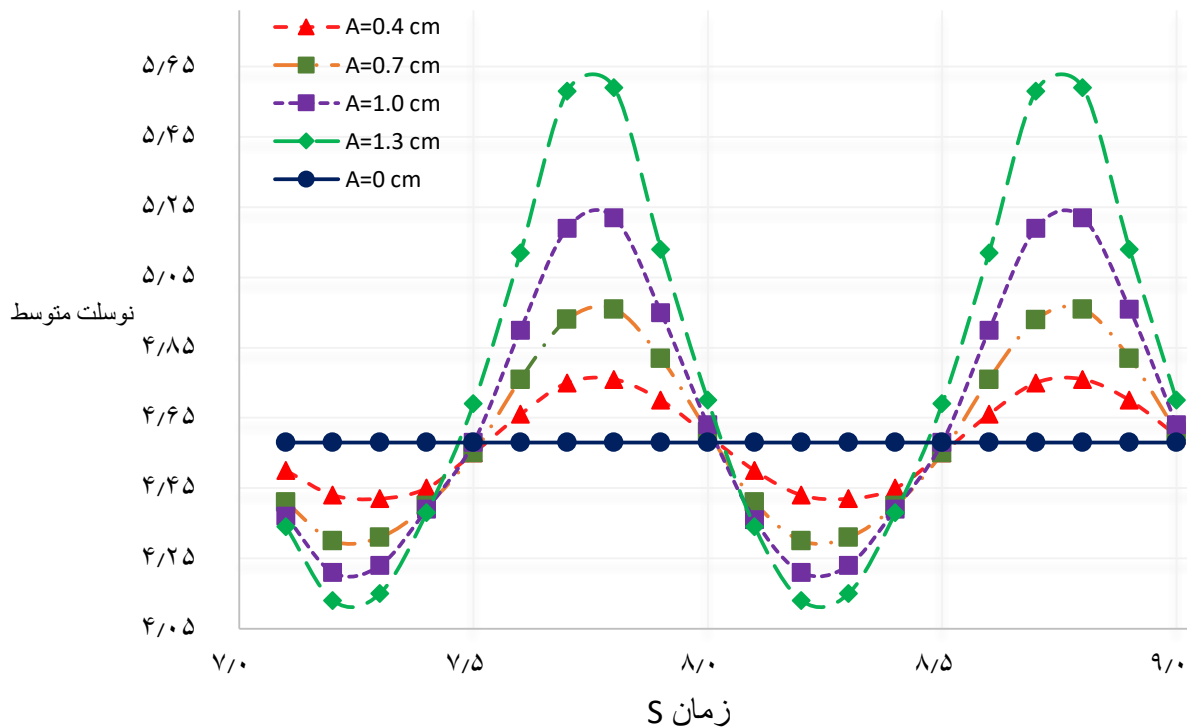
شکل ۲۳. توزیع دما در کانال الاستیک با دامنه ۱ در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵

Fig. 23. Velocity profiles in the elastic channel with amplitude 1 at times of 8.25, 8.5 and 8.75



شکل ۲۴. توزیع دما در کانال الاستیک با دامنه ۱/۳ در زمان‌های ۸/۲۵، ۸/۵۰ و ۸/۷۵

Fig. 24. Velocity profiles in the elastic channel with amplitude 1.3 at times of 8.25, 8.5 and 8.75

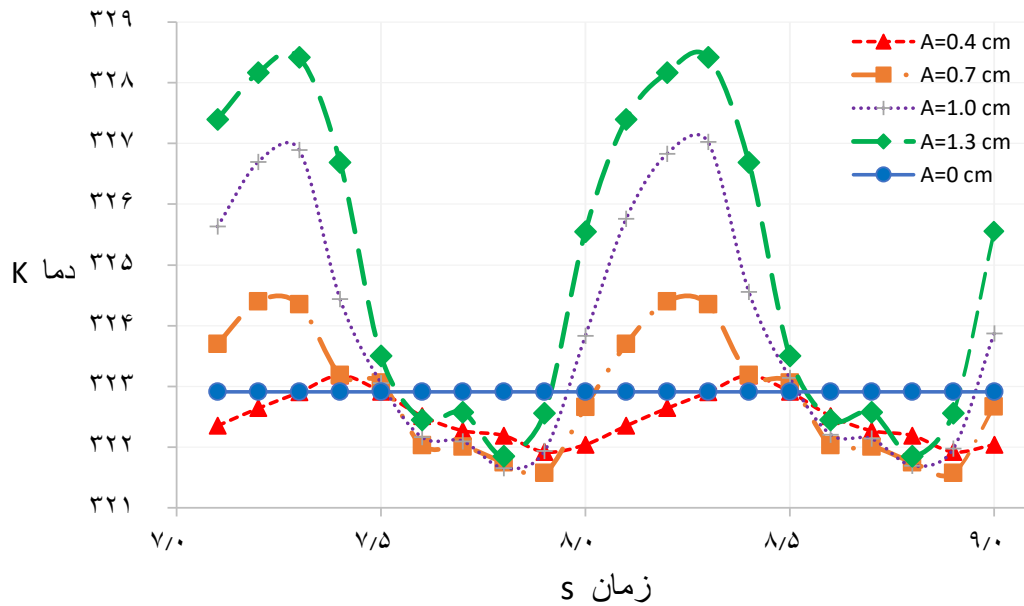


شکل ۲۵. عدد نوسلت متوسط در کانال صلب و کانال الاستیک در دامنه‌های ۰/۴، ۰/۷، ۱/۰، ۱/۳ و ۱/۴ cm

Fig. 25. Mean Nusselt number in rigid channel and elastic channel in the amplitude of 0.4, 0.7, 1 and 1.3 cm

شده است با افزایش دامنه، عدد نوسلت میانگین لحظه‌ای افزایش می‌یابد که بیانگر افزایش آهنگ انتقال گرمای جابجایی است. همانطور که نمودار نشان می‌دهد از زمان ۷/۷۵ تا ۸/۲۵ ثانیه که بیانگر نوسان سطح الاستیک از نقطه پایین به بالا می‌باشد سطح مقطع کانال افزایش یافته و سرعت جریان کاهش می‌یابد. با کاهش سرعت جریان، ضریب انتقال حرارت جابجایی کاهش یافته و باعث کاهش عدد نوسلت میانگین می‌گردد. همچنین از زمان ۸/۲۵ تا ۸/۷۵ که نیمه دوم دوره تناوب ارتعاشی می‌باشد، نوسان سطح الاستیک از نقطه بالا به پایین می‌باشد. در این حالت سطح مقطع کانال کاهش یافته و سرعت جریان افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت جریان موجب افزایش ضریب انتقال گرمای جابجایی شده و منجر به افزایش عدد نوسلت میانگین می‌شود. این تغییرات عدد نوسلت میانگین با افزایش بیشینه دامنه نوسانی شدت می‌یابد که در نمودار به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. همچنین برای درک بهتر از نتایج جایگزینی سطح الاستیک به جای سطح صلب دمای میانگین در سطح خروجی کانال در شکل ۲۶ برای کانال صلب و الاستیک در دامنه‌های نوسانی یاد شده نشان داده شده است که

مشاهده می‌شود این کاهش بیشتر شده و در ادامه منجر به برگشت سیال در پایین دست جریان به طرف سطح الاستیک می‌شود. از طرفی با کاهش تدریجی سطح مقطع تحت نوسان سطح الاستیک، سرعت جریان افزایش می‌یابد و با مقایسه پروفیل‌های سرعت با سرعت ورودی در هر لحظه از کانال، افزایش اندازه سرعت جریان مشاهده می‌شود و این افزایش سرعت با افزایش بیشینه دامنه نوسانی به طور پیوسته افزایش می‌یابد. نکته مهم دیگر که در پروفیل‌های سرعت دیده می‌شود جهت جریان در لحظات مختلف می‌باشد. به عنوان مثال در نزدیک سطح الاستیک جهت جریان از حالت افقی تغییر می‌کند که بیانگر این است که سیال علاوه بر سرعت افقی دارای سرعت عمودی در طول کانال می‌باشد. این مؤلفه عمودی سرعت علاوه بر مخلوط کردن سیال که موجب افزایش انتقال گرما بین خود لایه‌های سیال می‌شود، با برخورد به دیواره کانال می‌تواند بر رسوب زدایی در کانال نیز تأثیر گذار باشد. در ادامه عدد نوسلت میانگین لحظه‌ای در کانال صلب و الاستیک با دامنه‌های مختلف در شکل ۲۵ نشان داده شده است. همانگونه که نشان داده



شکل ۲۶. دمای متوسط سیال در مقطع خروجی کانال صلب و کانال الاستیک در دامنه‌های ۰/۴، ۰/۷، ۱/۰، ۱/۳ cm

Fig. 26. Mean fluid temperature in rigid channel and elastic channel in the amplitude of 0.4, 0.7, 1 and 1.3 cm

جدول ۳. عدد نوسلت متوسط میانگین و دمای میانگین در مقطع خروجی در کانال صلب با کانال الاستیک در دامنه‌های مختلف

Table 3. Mean Nusselt number and mean temperature at the outlet section in rigid channel with elastic channel in different amplitude.

دامنه	۰	۰/۴	۰/۷	۱/۰	۱/۳
دمای متوسط خروجی	۳۲۲/۹۱	۳۲۲/۴۹ (٪ -۰/۱)	۳۲۲/۸۷ (٪ -۰/۰۱)	۳۲۳/۸۸ (٪ +۰/۳)	۳۲۴/۹۲ (٪ +۰/۶)
نوسلت متوسط	۴/۵۸	۴/۵۸ (۰٪)	۴/۶۰ (٪ +۰/۴۵)	۴/۶۷ (+۲٪)	۴/۷۸ (٪ +۴/۴)

آورده شده است. همچنین میزان تغییر پارامترهای مورد بررسی در کانال الاستیک در دامنه‌های نوسانی مختلف نسبت به نتایج کانال صلب در این جدول آورده شده است. برای مثال با ارتعاش سطح الاستیک تحت شرایط یاد شده در دامنه ۱/۳ میانگین نوسلت میانگین کلی ۴/۴٪ و میانگین دمای میانگین خروجی ۰/۶٪ نسبت به کانال صلب افزایش می‌یابد که بیانگر افزایش انتقال گرما می‌باشد.

نشانگر تغییر دمای میانگین در زمان‌ها و دامنه‌های مختلف نسبت به کانال صلب می‌باشد.

در انتها برای جمع بندی از میزان بهبود انتقال گرما در کانال با سطح الاستیک در حال نوسان نسبت به سطح صلب پارامترهای عدد نوسلت متوسط و دمای متوسط سطح خروجی کانال در بازه زمانی ثابت ۸ الی ۹ ثانیه که نتایج پایدار شده‌اند میان گیری شده و در جدول ۳ برای مقایسه

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش بر هم کنش سیال-جامد با روش المان محدود گالرکین و با استفاده از معادلات دلخواه اویلری- لاگرانژی در یک کانال دو بعدی افقی با سیال عامل هوا بررسی شده است. یک سطح تحت دما ثابت قرار گرفته و سطح دیگر عایق بوده و قسمتی از آن با سطح الاستیک جایگزین شده است. این سطح الاستیک تحت نوسان با فرکانس ثابت اما دامنه‌های مختلف قرار می‌گیرد و ارتعاش این سطح موجب تغییر در رفتار جریان می‌شود که نتایج به دست آمده از حل عددی در زیر آورده شده است.

۱- نوسان سطح الاستیک موجب می‌شود خطوط جریان برخلاف کانال صلب یکنواخت نبوده و هر لحظه تغییر کرده و گردابه‌هایی با قدرت‌های مختلف در طول کانال به وجود می‌آید. با افزایش دامنه و افزایش سطح مقطع عبوری، سیال پایین دست به دلیلی افزایش یافتن حجم داخل کانال به سمت بالا دست حرکت کرده و موجب ایجاد جریان بازگشتی در داخل کانال می‌شود. درحقیقت این حالت را می‌توان مشابه جریان مکشی در نظر گرفت. ۲- 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 جریان مشابه جریان دمشی می‌باشد که موجب به وجود آمدن گردابه‌هایی در کانال می‌باشد. با افزایش بیشینه دامنه قدرت این گردابه‌ها نیز افزایش می‌یابد.

۳- ایجاد گردابه‌های ناشی از نوسان سطح الاستیک موجب تداخل بیشتر جریان شده و افزایش آهنگ گرمای منتقل شده از سطح به جریان 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 رسوب زدایی از سطوح را نیز از مزیت‌های جایگزینی سطح الاستیک در کانال صلب نام برد.

۴- ارتعاش سطح موجب تغییر لایه مرزی دمایی در کانال شده و دمایی میانگین سطح خروجی و عدد نوسلت میانگین کلی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش بیشینه دامنه ارتعاشی این مقادیر بیشتر می‌شود که بیانگر افزایش آهنگ انتقال گرما از سطح به سیال عامل می‌باشد.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

D	قطر (m)
d	بردار جابجایی (m)
E	مدول الاستیسیته (N/m^2)
F	نیروی وزن (N)
f	ضریب اصطکاک
H	ارتفاع کانال (m)
h	ضریب انتقال گرما جابجایی ($W/(m^2.K)$)
k	ضریب انتقال گرما رسانش ($W/(m.K)$)
L	طول کانال (m)
Nu	عدد نوسلت
P	فشار (Pa)
Δp	افت فشار (Pa)
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
t	زمان (s)
u	سرعت درجهت x ($\frac{m}{s}$)
V	بردار سرعت ($\frac{m}{s}$)

علائم

یونانی

α	ضریب نفوذ گرمایی (m^2/s)
ρ	چگالی (kg/m^3)
μ	ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s)
σ	تانسور تنش کوشی (Pa)
α	ضریب نفوذ گرمایی (m^2/s)

زیرنویس‌ها

in	ورودی
o	خارج
f	سیال
s	جامد
x	محلی
m	متوسط

- elastic bottom wall, Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 10(4) (2018).
- [8] S.M.H. Zadeh, S. Mehryan, E. Izadpanahi, M. Ghalambaz, Impacts of the flexibility of a thin heater plate on the natural convection heat transfer, International Journal of Thermal Sciences, 145 (2019) 106001.
- [9] X. Sun, Z. Ye, J. Li, K. Wen, H. Tian, Forced convection heat transfer from a circular cylinder with a flexible fin, International Journal of Heat and Mass Transfer, 128 (2019) 319-334.
- [10] M.A. Ismael, Forced convection in partially compliant channel with two alternated baffles, International Journal of Heat and Mass Transfer, 142 (2019) 118455.
- [11] F. Selimefendigil, H.F. Öztop, 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, 144 (2019) 118598.
- [12] G. Hwang, K. Cheng, Convective instability in the thermal entrance region of a horizontal parallel-plate channel heated from below, (1973).
- [13] F. White, Fluid Mechanics (Mechanical Engineering), in, McGraw-Hill, 2015.
- [14] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, Introduction to heat transfer, J. Wiley & sons, 1990.
- [15] A. Bejan, Convection heat transfer, John wiley & sons, 2013
- [1] V. Shankar, Stability of fluid flow through deformable tubes and channels: an overview, Sadhana, 40(3) (2015) 925-943.
- [2] A. Al-Amiri, K. Khanafer, 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, 54(17-18) (2011) 3826-3836.
- [3] S. Ali, C. Habchi, S. Menanteau, T. Lemenand, J.-L. Harion, Heat transfer and mixing enhancement by free elastic flaps oscillation, International Journal of Heat and Mass Transfer, 85 (2015) 250-264.
- [4] F. Selimefendigil, H.F. Öztop, Mixed convection in a partially heated triangular cavity filled with nanofluid having a partially flexible wall and internal heat generation, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 70 (2017) 168-178.
- [5] M. Ghalambaz, E. Jamesahar, M.A. Ismael, A.J. Chamkha, Fluid-structure interaction study of natural convection heat transfer over a flexible oscillating fin in a square cavity, International Journal of Thermal Sciences, 111 (2017) 256-273.
- [6] W.A. Sabbar, M.A. Ismael, M. Almudhaffar, Fluid-structure interaction of mixed convection in a cavity-channel assembly of flexible wall, International Journal of Mechanical Sciences, 149 (2018) 73-83.
- [7] F. Selimefendigil, H.F. Öztop, Laminar convective nanofluid flow over a backward-facing step with an

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. E. Razavi, H. Danandeh Oskuei, Investigating the Fluid-Solid Interaction in Incompressible Flow and The Effect of Oscillation Amplitude on Heat Transfer, Amirkabir J. Mech Eng., 53(9) (2021) 4747-4772.

DOI: 10.22060/mej.2021.18752.6882



