

بررسی تغییرات فشار در جریان اینرسی و غیر همدمای سیالات ویسکوالاستیک در کانال صفحه‌ای متقارن با انبساط ناگهانی

امین شهبانی ظهیری

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

حسن حسن زاده

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

محمد محسن شاه‌مردان*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

محمود نوروزی

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

در این تحقیق، جریان اینرسی و غیر همدمای سیال ویسکوالاستیک در کانال صفحه‌ای متقارن با انبساط ناگهانی ۱:۳ شبیه سازی شده است. برای مدل‌سازی رفتار رئولوژیکی و پیچیده سیال ویسکوالاستیک، از رابطه‌ی غیر خطی مدل رئولوژیکی فن تین-تر استفاده شده است. برای تولید جریان غیر همدمای، مقادیر دما در ورودی و دیواره‌های کانال ثابت و متفاوت هستند. برای شبیه سازی عددی جریان غیر همدمای از الگوریتم PISO استفاده شده و معادلات حاکم توسط روش حجم محدود خطی شده است. همچنین، خواص سیال ویسکوالاستیک تابع دما در نظر گرفته شده و جمله اتلاف ناشی از لزجت در معادله انرژی لحاظ شده است. هدف اصلی این تحقیق، بررسی اثرات خاصیت الاستیک، نیروی اینرسی و اتلافات ناشی از لزجت روی الگوی جریان، تغییرات فشار، ضریب افت فشار و ضریب تلفات برای جریان اینرسی و غیر همدمای در بخش انبساطی کانال صفحه‌ای است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز در محدوده جریان آرام، الگوی جریان نامتقارنی در بخش انبساطی کانال صفحه‌ای (بر خلاف لوله انبساط ناگهانی) ایجاد می‌شود که نقش عمده‌ای بر توزیع و افت فشار در این بخش دارد.

واژه‌های کلیدی: سیال ویسکوالاستیک، ضریب افت فشار، ضریب تلفات، بخش انبساطی، کانتور فشار، جریان غیر همدمای.

Investigation of Pressure Variation and Losses in Inertial and Non-isothermal Flow of Viscoelastic Fluids through the Symmetric Planar Channel with Sudden Expansion

A. Shahbani-Zahiri

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

H. Hassanzadeh

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

M. M. Shahmardan*

Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

M. Norouzi

Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract

In this study, the inertial and non-isothermal flow of viscoelastic fluid has been simulated inside the symmetric planar channel with 1:3 sudden expansion. The non-linear form of Phan Thien-Tanner (PTT) has been used for modeling the rheological and complex behavior of the viscoelastic fluid. For creating the non-isothermal flow, temperature values are constant and different at the inlet and on the walls of the channel. To simulate the non-isothermal flow, the PISO algorithm is used and the governing equations are linearized by finite volume method (FVM). Also, fluid properties are a function of temperature and viscous dissipation term has been applied in the energy equation. The main purpose of this study is to investigate the effects of elastic property, inertial force and viscous dissipation on the flow pattern, pressure changes, pressure drop coefficient and loss coefficient for inertial and non-isothermal flow in the expanded part of the planar channel. The results of this study show that increasing the Reynolds number in the range of laminar flow creates an asymmetric flow pattern in the expanded part of the planar channel (unlike the sudden expansion pipe) which plays a major role on the distribution and drop of pressure in this part.

Keywords: Viscoelastic fluid, pressure drop coefficient, loss coefficient, expanded part, pressure contour, non-isothermal flow.

از نوع سیالات غیرنیوتنی به‌خصوص سیالات ویسکوالاستیک هستند و این رفتارها وابسته به دما و نرخ کرنش برشی سیال است. همچنین، برای انتقال و جابجایی سیالات پلیمری غیر همدمای از کانال‌هایی استفاده می‌شود که سطح مقطع آنها توسط تبدیلاتی تغییر می‌کند. هنگامی که در این تبدیلات تغییر سطح مقطع به صورت ناگهانی باشد، فشار بشدت افت کرده و الگوی جریان و توزیع دما دچار تغییرات می‌شود. بنابراین بررسی افت فشار و تلفات در جریان غیر خزشی و غیر همدمای سیال غیرنیوتنی بخصوص سیال ویسکوالاستیک داخل کانال

۱- مقدمه

برخلاف سیالات نیوتنی، سیالات غیرنیوتنی طبیعت پیچیده‌ای دارند و در هنگام جریان خصوصیات و رفتارهای پیچیده‌ای را از خود نشان می‌دهند. جریان سیالات غیرنیوتنی کاربرد گسترده‌ای در صنایع پتروشیمی، صنایع غذایی، صنعت پلاستیک و مواد آرایشی و بهداشتی داشته و تحقیق در مورد آنها امروزه بشدت رو به افزایش است. در صنایع پلاستیک، مذاب‌های پلیمری دارای رفتارهای رئولوژیکی پیچیده

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mmshahmardan@yahoo.com

صفحه‌های متقارن با تبدیل انبساط ناگهانی مهم و ارزشمند است. پول و همکاران [۱] جریان خزشی سیال ویسکوالاستیک داخل کانال صفحه‌ای با انبساط ناگهانی ۱:۳ را برای اعداد دوبرا مختلف به صورت عددی شبیه سازی کردند. آنها با در نظر گرفتن سه مدل ماکسول بالادست^۱، اولدرویید-بی^۲ و شکل خطی فن-تین-تنر^۳ برای سیال ویسکوالاستیک، افت فشار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که در اعداد دوبرا^۴ کوچک، رشد عدد دوبرا سبب افزایش افت فشار می‌شود. در حالیکه برای اعداد دوبرا بزرگ ($De \geq 10$)، با افزایش عدد دوبرا، افت فشار کمتر می‌شود. در تحقیقی دیگر، پول و همکاران [۲] با استفاده از مدل ماکسول بالادست برای جریان خزشی سیال ویسکوالاستیک داخل کانال واگرای ناگهانی، تأثیر نسبت انبساط ($1.25 \leq ER \leq 32$) روی افت فشار را در محدوده اعداد دوبرا کوچک ($De \leq 1$) مورد مطالعه قرار دادند.

الیویرا [۳] و ژنگ و همکاران [۴] جریان اینرسی سیال ویسکوالاستیک داخل کانال صفحه‌ای با انبساط ناگهانی ۱:۳ را شبیه سازی کردند. آنها با استفاده از مدل تصحیح شده FENE-CR^۵ و FENE-P^۶، ضرایب افت فشار و تلفات را برای اعداد رینولدز مختلف ($1 \leq Re \leq 100$) بررسی کردند. نتایج شبیه سازی عددی آنها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت جریان، ضریب تلفات و ضریب افت فشار کم می‌شود. نوروزی و همکاران [۵] جریان اینرسی سیال ویسکوالاستیک داخل کانال صفحه‌ای با انبساط تدریجی ۱:۳ را به صورت عددی شبیه سازی کردند. آنها با استفاده از رابطه‌ی غیر خطی مدل فن-تین-تنر اثرات انبساط تدریجی را روی طول گردابه‌ها در اعداد رینولدز و وایزنبرگ مختلف بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که افزایش زاویه انبساطی سبب ناپایداری جریان و رشد طول گردابه‌ها می‌شود.

شاه‌مردان و همکاران [۶] جریان غیر خزشی سیال ویسکوالاستیک داخل کانال صفحه‌ای با انبساط تدریجی ۱:۳ را برای اعداد رینولدز و وایزنبرگ مختلف مورد مطالعه قرار دادند. آنها با استفاده از رابطه‌ی غیر خطی مدل فن-تین-تنر، تأثیر خاصیت الاستیک، نیروی اینرسی و انبساط تدریجی را روی طول گردابه‌های متقارن و نامتقارن بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که رشد زاویه انبساطی در اعداد رینولدز و وایزنبرگ کوچک سبب افزایش طول گردابه‌های متقارن و نامتقارن جریان می‌شود. کافوری و همکاران [۷] جریان سیال بینگهام^۷ و قانون توانی^۸ داخل لوله متقارن محوری با انبساط ناگهانی را در محدوده اعداد رینولدز $1 \leq Re \leq 200$ شبیه سازی کردند. در تحقیق آنها، افزایش مقدار شاخص توانی در مدل قانون توانی و افزایش تنش تسلیم در سیال بینگهام، سبب کاهش ضریب تلفات اصطکاکی جریان سیال غیرنیوتنی می‌شود. نوروزی و همکاران [۸، ۹] با استفاده از مدل

فن-تین-تنر، افت فشار و اختلاف تنش‌های عمودی اول و دوم را برای جریان اینرسی و همدمای سیال ویسکوالاستیک داخل کانال واگرای تدریجی با زوایای انبساطی مختلف مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که ضریب تلفات و ضریب افت فشار با افزایش زاویه انبساطی به صورت خطی زیاد می‌شوند.

وازجر و زدانسکی [۱۰] با استفاده از روش اختلاف محدود کاملاً ضمنی، جریان خزشی و همدمای مذاب پلیمری را داخل کانال صفحه‌ای با انبساط ناگهانی نامتقارن مدل‌سازی کردند. آنها با استفاده از معادله نیوتنی بهبود یافته کراس^۹ و با در نظر گرفتن تابعیت دمایی برای لزجت و زمان رهایی از تنش، ضریب افت فشار و توزیع دما برای جریان مذاب پلیمری را بررسی کردند. زدانسکی و وازجر [۱۱] جریان خزشی و غیر همدمای مذاب پلیمری را در کانال صفحه‌ای با انبساط ناگهانی نامتقارن به صورت عددی شبیه سازی کردند. آنها با استفاده از معادلات نیوتنی بهبود یافته کراس و قانون توانی اصلاح شده، توزیع فشار و پروفیل دما را مورد بررسی قرار دادند. منتهایی و همکاران [۱۲] انتقال حرارت جریان لایه‌ای و متقارن سیال ویسکوالاستیک داخل لوله متقارن محوری با انبساط ناگهانی ۱:۳ را شبیه سازی کردند. آنها با صرف نظر از جمله اتلافات ناشی از لزجت^{۱۰} در معادله انرژی، تأثیر خاصیت الاستیک روی تغییرات فشار محوری را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین شهبانی ظهیری و همکاران [۱۳، ۱۴] با شبیه سازی جریان اینرسی و غیر همدمای سیال ویسکوالاستیک داخل کانال واگرای ناگهانی، دیاگرام چند شاخه‌ای طول گردابه‌ها، توزیع سرعت، توزیع دما، اعداد ناسلت محلی و میانگین را مورد بررسی قرار دادند.

همانطور که ملاحظه می‌شود، بیشتر تحقیقات صورت گرفته روی تلفات و افت فشار سیال ویسکوالاستیک در کانال‌های واگرا مربوط به جریان خزشی و همدمای سیال ویسکوالاستیک است. حتی در موارد انگشت شماری که جریان به صورت غیر همدما شبیه سازی شده، اعداد رینولدز و وایزنبرگ جریان و اختلاف دما بین ورودی و دیواره‌های کانال، کوچک در نظر گرفته شده و کانال دارای تبدیل واگرای نامتقارن می‌باشد. لازم به ذکر است که افزایش عدد رینولدز در محدوده جریان لایه‌ای، باعث نامتقارن شدن الگوی جریان در کانال صفحه‌ای واگرا می‌شود؛ در حالیکه الگوی جریان در لوله واگرا، همچنان متقارن باقی می‌ماند. از این رو، بررسی افت و تلفات فشار در جریان اینرسی (غیر خزشی) و غیرهمدمای سیال ویسکوالاستیک داخل کانال صفحه‌ای متقارن با انبساط ناگهانی توسط مدل رئولوژیکی غیر خطی فن-تین-تنر همراه با خواص متغیر دمایی از نوآوری مطالعه حاضر است.

خواص لزجت و زمان رهایی از تنش در سیالات ویسکوالاستیک وابستگی زیادی به دما دارند و به دلیل اتلافات ناشی از لزجت و خاصیت الاستیک، انرژی گرمایی تولید و در سیال ذخیره می‌شود. لذا فرض وابستگی دمایی برای خواص سیال و همچنین در نظر گرفتن جمله اتلافات ناشی از لزجت در معادله انرژی تأثیر زیادی بر رفتار جریان سیال ویسکوالاستیک دارد [۱۵]. بنابراین در این تحقیق، ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب رسانایی گرمایی، لزجت و زمان رهایی از تنش وابستگی دمایی داشته و جمله اتلافات ناشی از لزجت در معادله انرژی

¹ Upper convected Maxwell (UCM)

² Oldroyd-B

³ Phan Thien-Tanner (PTT)

⁴ Deborah numbers

⁵ Finitely Extensive Nonlinear Elastic-Chilcott-Rallison (FENE-CR)

⁶ Finitely Extensive Nonlinear Elastic-Peterlin (FENE-P)

⁷ Bingham

⁸ Power-law

⁹ Modified Cross model

¹⁰ Viscous dissipation

می‌شود؛ ولی در نسبت‌های بسیار کوچک ($\beta \ll 1$)، افزایش عدد وایزنبرگ سبب ناپایداری جریان و رشد نواحی گردابه‌ای شکل می‌شود [۵]. در تحقیق حاضر، برای بررسی رفتار سیال ویسکوالاستیک در لزجت پلیمری بالا، مقدار نسبت لزجت نیوتنی به لزجت کل بسیار کوچک در نظر گرفته شده است ($\beta \approx 1/15$). از طرف دیگر برای مدل‌سازی رفتار غیر خطی محلول پلیمری، از شکل نمایی مدل فن تین-تنر استفاده شده است. در این مدل رئولوژیکی دو ثابت قابل تنظیم (ξ و ε) مربوط به خواص سیال ویسکوالاستیک وجود دارد که به صورت تجربی تعیین می‌شوند. بنابراین، برای شبیه سازی جریان و انتقال گرمای مواد مورد استفاده در صنایع مختلف از قبیل حلال‌های غلیظ و مذاب‌های پلیمری، مدل فن تین-تنر با داشتن دو ثابت قابل تنظیم دارای دقت کافی و لازم است [۱۶، ۱۷]. معادله متشکله فن تین-تنر به صورت زیر بیان می‌شود [۱۸].

$$F(\text{tr}\tau_p)\tau_p + \lambda(T) \left[\nabla \cdot (\mathbf{U}\tau_p) - \tau_p \cdot \nabla \mathbf{U} - (\nabla \mathbf{U})^T \cdot \tau_p \right] + \xi \left[\tau_p \mathbf{D} + \mathbf{D}\tau_p \right] = \eta_p(T) \left[\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T \right] \quad (6)$$

پارامترهای $\lambda(T)$ و $\eta_p(T)$ توابع وابسته به دما برای ضریب رهایی از تنش و لزجت محلول پلیمری هستند. در مطالعه حاضر، از شکل نمایی برای تابع ضریب تنش پلیمری ($F(\text{tr}\tau_p)$) استفاده شده که به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۹]:

$$F(\text{tr}\tau_p)\tau_p = \exp\left(\frac{\varepsilon\lambda(T)}{\eta_p(T)} \text{tr}\tau_p\right) \quad (7)$$

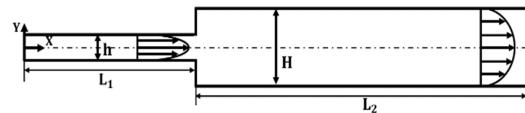
رفتار کششی سیال ویسکوالاستیک وابسته به مقدار ε است و میزان اثر گذاری انرژی جنبشی جریان سیال روی خاصیت کششی سیال ویسکوالاستیک توسط تابع ضریب تنش پلیمری ($F(\text{tr}\tau_p)$) تعیین می‌شود. هنگامی که از شکل نمایی برای تعریف تابع ضریب تنش پلیمری استفاده می‌شود، با تغییرات نرخ کشسانی سیال، بیشترین خاصیت کششی برای سیال ویسکوالاستیک حاصل می‌شود. بنابراین برای جریان‌هایی که نرخ کرنش سیال بالا است، رفتار کشسانی و رقیق شونده سیال ویسکوالاستیک به درستی مدل می‌شود [۲۰]. نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهند که مقادیر ثابت‌های قابل تنظیم مدل فن تین-تنر (ε , ξ) بایستی کوچک باشند تا مطابقت خوبی با داده‌های تجربی داشته باشند [۲۱، ۲۲]؛ به همین خاطر در تحقیق حاضر، از ثوابت مورد استفاده در تحقیق کرووز و پینهو [۲۲] استفاده شده است ($\varepsilon = 0.02$, $\xi = 0.04$). اعداد بدون بعد مورد استفاده در این تحقیق اعداد رینولدز (Re)، عدد برینکمن (Br)، عدد پرانتل (Pr) و عدد وایزنبرگ (We) هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۳]:

$$Re = \frac{\rho U_i D_h}{\eta_0(T_i)} \quad Br = \frac{\eta_0(T_i) U_i^2}{k_f(T_i) [T_w - T_i]} \quad (8)$$

$$Pr = \frac{\eta_0(T_i) C_{p,i}}{k_f(T_i)} \quad We = \frac{\lambda(T_i) U_i}{D_h}$$

پارامترهای U_i ، T_w و T_i بترتیب سرعت سیال در ورودی کانال، دمای دیواره‌ها و دمای سیال در ورود به کانال هستند. همچنین D_h قطر هیدرولیکی کانال است که دو برابر ارتفاع بخش اول کانال است ($D_h = 0.2$ (m)). پارامتر $\eta_0(T)$ لزجت کل سیال در نرخ کرنش برشی صفر است که از مجموع لزجت نیوتنی ($\eta_s(T)$) و لزجت پلیمری ($\eta_p(T)$) بدست می‌آید ($\eta_0(T) = \eta_p(T) + \eta_s(T)$). از طرف

در نظر گرفته شده است. همچنین رفتار رئولوژیکی و پیچیده سیال ویسکوالاستیک با شکل نمایی مدل رئولوژیکی فن تین-تنر مدل‌سازی شده است تا اثرات هر دو خواص لزجت و الاستیک سیال در جریان اعمال شود. هندسه کانال صفحه‌ای با تبدیل واگرایی ناگهانی متقارن ۱:۳ در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- هندسه کانال صفحه‌ای با تبدیل واگرایی ناگهانی متقارن ۱:۳

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، طول و ارتفاع بخش‌های اول و دوم کانال به ترتیب با L_1 ، h و L_2 ، H نامگذاری شده است. در مطالعه حاضر، طول مربوط به بخش‌های اول و دوم کانال به ترتیب ۶۰ و ۱۲۰ برابر ارتفاع بخش بالادست کانال در نظر گرفته شده است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثرات نیروی اینرسی، خاصیت الاستیک و اتلافات ناشی از لزجت بر ضریب افت فشار و ضریب تلفات در بخش انبساطی کانال صفحه‌ای متقارن است. به همین خاطر الگوی جریان، توزیع فشار روی خط مرکزی و در مجاورت دیواره‌های کانال، کانتور فشار، ضریب افت فشار و ضریب تلفات برای محدوده اعداد رینولدز ($100 \leq Re \leq 1000$)، محدوده اعداد وایزنبرگ ($0.5 \leq We \leq 100$) و محدوده اعداد برینکمن ($0.1 \leq Br \leq 20$) مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روابط ریاضی و روش حل عددی

برای شبیه سازی عددی انتقال گرما و جریان اینرسی سیال ویسکوالاستیک نیاز به حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی است که به صورت زیر نوشته می‌شوند:

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

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U}\mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau_s + \nabla \cdot \tau_p \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho C_p(T)\mathbf{U}T) = \nabla \cdot (k_f(T)\nabla T) + [\tau_s : \mathbf{D} + \tau_p : \mathbf{D}] \quad (3)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} [\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T] \quad (4)$$

در معادلات (۱) تا (۴)، متغیرهای \mathbf{U} ، p و T به ترتیب بردار سرعت، فشار و دما را نشان می‌دهند. پارامترهای ρ ، $C_p(T)$ و $k_f(T)$ به ترتیب چگالی، تابع دمایی ظرفیت گرمایی ویژه، تابع دمایی ضریب رسانایی گرمایی هستند. همچنین \mathbf{D} تانسور نرخ تغییر شکل است و تنش کلی جریان سیال ویسکوالاستیک از مجموع تانسور تنش حلال نیوتنی (τ_s) و تانسور تنش محلول پلیمری (τ_p) بدست می‌آید. تانسور تنش حلال نیوتنی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau_s = \eta_s(T) [\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T] \quad (5)$$

پارامتر $\eta_s(T)$ نشان دهنده لزجت حلال نیوتنی به صورت تابعی از دما است. هنگامی که نسبت لزجت حلال نیوتنی به لزجت کل ($\beta = \eta_s / (\eta_s + \eta_p)$) برابر با ۰/۵ یا بیشتر است؛ خاصیت الاستیک به صورت یک عامل پایدار کننده باعث کاهش طول نواحی گردابه‌ای شکل

دیگر، خواص سیال ویسکوالاستیک از قبیل لزجت، زمان رهایی از تنش، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب رسانایی گرمایی با دما تغییر می‌کنند و وابستگی دمایی برای این خواص به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۴، ۱۵].

$$\eta_0(T) = \eta_0(T_i) \times a(T) \quad k_f = k_f(T_i) \times [k_0^* + k_s^* T] \quad (9)$$

$$\lambda(T) = \lambda(T_i) \times a(T) \quad C_p = C_p(T_i) \times [C_{p,0}^* + C_{p,s}^* T]$$

پارامترهای $\eta_0(T_i)$ ، $\lambda(T_i)$ ، $k_f(T_i)$ و $C_p(T_i)$ نشان دهنده لزجت کلی، زمان رهایی از تنش، ضریب رسانایی گرمایی و ظرفیت گرمایی ویژه سیال در دمای ورودی کانال هستند. مقدار پارامتر $\eta_0(T_i)$ در جدول ۱ داده شده است و مقادیر پارامترهای $\lambda(T_i)$ ، $k_f(T_i)$ و $C_p(T_i)$ با توجه به اعداد بدون بعد و جدول ۱ بدست می‌آیند. همچنین عامل تغییرات دمایی $a(T)$ به صورت زیر بیان می‌شود [۲۴، ۱۵]:

$$a(T) = \exp \left[\alpha \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_0 + 273.15} \right) \right] \quad (10)$$

پارامتر T_0 دمای مرجع است که مقدار آن ثابت و برابر با مقدار دمای سیال در ورودی کانال است. همچنین مقادیر ثابت مورد استفاده در روابط (۸) تا (۱۰) در جدول ۱ نشان داده شده است [۲۴، ۱۵].

جدول ۱- مقادیر ثابت مورد استفاده در روابط (۸) تا (۱۰) [۲۴، ۱۵]

$\eta_{0,i}(T_i) = 4/0.7 \text{ (Pa.s)}$	$\alpha = 1720 \text{ (K)}$	$T_i = 19.0 \text{ (}^\circ\text{C)}$
$C_{p,s}^* = -0.00112 \left(\frac{1}{^\circ\text{C}} \right)$	$C_{p,0}^* = 1/2122$	$T_w = 29.0 \text{ (}^\circ\text{C)}$
$k_s^* = 0.00118 \left(\frac{1}{^\circ\text{C}} \right)$	$k_0^* = 0.7753$	$\rho = 1226 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$

ضریب افت فشار ($C_{p,exp}$) و ضریب تلفات (K_{exp}) برای بخش انبساطی کانال واگرای ناگهانی توسط روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌گردد.

$$C_{p,exp} = \frac{P_1 - P_2}{0.5\rho U_1^2} \quad (11)$$

$$K_{exp} = 1 - \left(\frac{h}{H} \right)^2 + C_{p,exp} \quad (12)$$

پارامترهای h و H به ترتیب ارتفاع بخش‌های اول و دوم کانال هستند. پارامتر P_1 فشار جریان قبل از ورود به بخش انبساطی کانال است که در فاصله $X/h = 10$ مانده به ابتدای بخش انبساطی کانال قرار گرفته و پارامتر P_2 فشار جریان در انتهای بخش دوم کانال است که در فاصله $X/h = 10$ مانده به خروجی کانال قرار گرفته است. انتخاب این فواصل به این خاطر است که فشار جریان در بخش‌های اول و دوم کانال در نواحی کاملاً توسعه یافته هیدروپنماتیکی و گرمایی واقع شود.

انتقال گرما و جریان سیال ویسکوالاستیک داخل کانال صفحه‌ای با انبساط ناگهانی متقارن ۱:۳ توسط نرم افزار کد باز OpenFOAM شبیه سازی شده است. همچنین حل همزمان معادلات مومنوم، معادله تنش پلیمری، معادلات تصحیح سرعت و فشار، معادله انرژی و

معادلات مربوط به خواص وابسته به دما داخل الگوریتم PISO انجام می‌شود [۲۵]. برای گسسته سازی عبارت جابجایی معادلات حاکم از روش اختلاف بالادست خطی استفاده شده است و عبارات دیورژانس و لاپلاسی توسط روش اختلاف مرکزی گسسته سازی شده‌اند [۲۶، ۲۷]. با گسسته سازی معادلات حاکم به روش حجم محدود، دستگاه معادلات خطی ایجاد می‌شوند. این دستگاه معادلات با استفاده از روش گرادیان مزدوج^۱ برای متغیر فشار و روش گرادیان غیر مزدوج پایدار شده^۲ برای مؤلفه‌های بردار سرعت، تانسور تنش پلیمری و دما حل می‌شوند [۲۸، ۲۹].

در ورودی کانال، توزیع سرعت و دما ثابت و یکنواخت است و مقدار تنش و گرادیان فشار نیز صفر در نظر گرفته شده‌اند. در خروجی کانال، مقدار فشار نسبی صفر است و مقادیر گرادیان برای متغیرهای سرعت، تنش و دما نیز صفر در نظر گرفته شده‌اند. روی دیواره‌های کانال، مقدار سرعت به دلیل شرط عدم لغزش صفر است و توزیع دما نیز ثابت و یکنواخت است. همچنین در راستای عمود بر دیواره کانال، مقادیر گرادیان فشار و تنش اصلاح شده نیز صفر در نظر گرفته شده است. برای حل عددی در این تحقیق، از الگوریتم PISO استفاده شده و مراحل بکار رفته در این الگوریتم به صورت خلاصه عبارتند از [۳۰]:

- ۱- گسسته سازی معادلات حاکم و اعمال شرط مرزی هیدروپنماتیکی و گرمایی.

۲- محاسبه مؤلفه‌های سرعت و شار جرمی با استفاده از درونیایی خطی در وجوه سلول‌های شبکه.

۳- حل معادله فشار برای محاسبه شار جرمی اصلاح شده در وجوه سلول‌های شبکه.

۴- تصحیح مؤلفه‌های سرعت توسط مقدار فشار جدید محاسبه شده.

۵- حل معادله فشار و تصحیح مؤلفه‌های سرعت توسط فشار جدید محاسبه شده برای بار دوم.

۶- حل معادله گسسته شده تنش پلیمری و بروز رسانی خواص وابسته به دما.

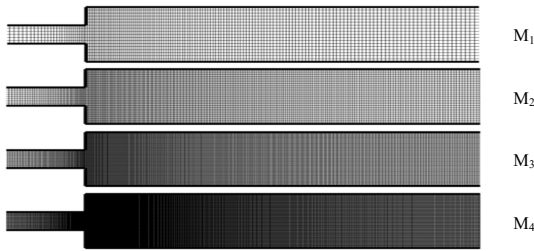
۷- حل معادله گسسته شده انرژی و بروز رسانی شرایط مرزی هیدروپنماتیکی و گرمایی.

۸- تکرار الگوریتم حل از مرحله شماره ۲ تا زمانی که معیار همگرایی برقرار شود.

ابتدا یک مقدار حدسی برای فشار در نظر گرفته شده (p^{**}) و سپس مؤلفه‌های بردار سرعت (u^{**}, v^{**}) در گام دوم محاسبه می‌شوند. با استفاده از مقدار فشار تصحیح شده (p^{***}) در گام سوم و حل معادله مومنوم، مقادیر تصحیح شده برای مؤلفه‌های سرعت در گام چهارم محاسبه می‌گردند (u^{***}, v^{***}) و سپس فاکتورهای تصحیح اولیه برای فشار و میدان سرعت بدست می‌آیند ($p' = p^{***} - p^{**}$ ، $u' = u^{***} - u^{**}$ ، $v' = v^{***} - v^{**}$). با بدست آمدن فاکتورهای تصحیح اولیه (p', u', v') و مقادیر سرعت و فشار در گام‌های اول و دوم (p^{**}, u^{**}, v^{**})، فاکتورهای تصحیح ثانویه (p'', u'', v'') نیز محاسبه شده و با استفاده از مقدار فشار در گام سوم و مقادیر میدان سرعت در

¹ Conjugated gradient (CG)

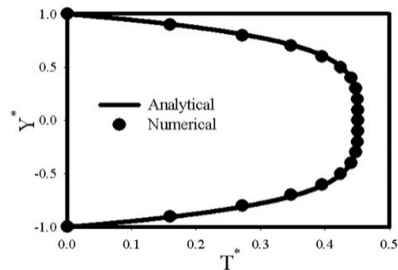
² Bi-conjugate gradient stabilized (BiCGstab)



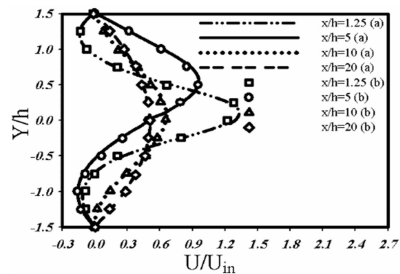
شکل ۳- بزرگ نمائی قسمتی از کانال صفحه‌ای با انبساط ناگهانی متقارن برای ۴ شبکه بندی مختلف

۳-۲- صحت سنجی نتایج

برای اعتبار سنجی روش حل عددی در تحقیق حاضر، شبیه سازی جریان اینرسی و غیر همدمای سیال ویسکوالاستیک بین دو صفحه موازی با استفاده از شکل ساده شده مدل فن تین-تنر و خواص سیال ثابت (صرف نظر از وابستگی دمایی) انجام شده است. نتیجه مربوط به توزیع دمای بدون بعد حاصل از این شبیه سازی عددی با نتیجه حل تحلیلی تحقیق کولپلو و همکاران [۳۱] برای $Re=10$ ، $Pr=100$ ، $Br=-1$ و $\epsilon We^2=0/1$ مقایسه شده و در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۵، پروفیل سرعت حاصل از شبیه سازی عددی جریان اینرسی و همدمای سیال نیوتنی ($We=0$) در فواصل مختلف از ابتدای بخش انبساطی کانال صفحه‌ای با نسبت انبساط ۱:۳ ($X/h=1/25, 5, 10, 20$) ترسیم شده و با نتایج تجربی تحقیق فرین و همکاران [۳۲] مقایسه شده است. همانطور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌گردد، مطابقت بسیار خوبی بین نتیجه عددی مطالعه حاضر و نتایج تحلیلی و تجربی تحقیقات گذشته وجود دارد و این بیانگر صحت و درستی روش حل عددی مورد استفاده در این تحقیق است.



شکل ۴- توزیع دمای بدون بعد حل عددی و حل تحلیلی برای جریان غیر همدمای سیال ویسکوالاستیک بین دو صفحه موازی



شکل ۵- پروفیل سرعت بدون بعد حل عددی (a) و نتایج تجربی (b) برای مقاطع عرضی مختلف در عدد رینولدز ۶۰

گام چهارم، مقادیر فشار و میدان سرعت برای بار دوم تصحیح می‌شوند.

$$p'' = p' + p^{**}, u'' = u' + u^{**}, v'' = v' + v^{**} \quad (13)$$

$$p^{****} = p^{***} + p'', u^{****} = u^{***} + u'', v^{****} = v^{***} + v'' \quad (14)$$

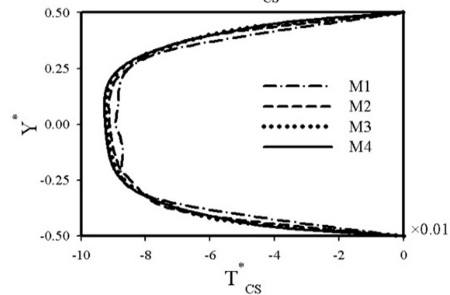
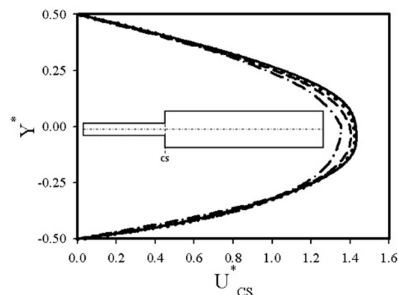
در ادامه، با بدست آمدن مقادیر تصحیح شده برای مؤلفه‌های سرعت در گام پنجم (u^{****}, v^{****})، مقادیر مؤلفه‌های تنش پلیمری و دما در گام‌های ششم و هفتم محاسبه شده و خواص وابسته به دما و شرایط مرزی بروز رسانی می‌شوند.

۳- ارزیابی شبکه بندی و اعتبار سنجی

۳-۱- استقلال حل از شبکه

برای بررسی استقلال حل عددی از شبکه بندی هندسه، توزیع سرعت و دمای جریان اینرسی و غیر همدمای سیال ویسکوالاستیک در مقطع عمودی کانال بررسی شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پروفیل سرعت و دما برای مقطع عرضی در ورودی بخش انبساطی کانال، برای ۴ شبکه بندی مختلف در عدد برینکمن ۱، عدد وایزنبرگ ۱۰ و عدد رینولدز ۶۰ ترسیم و با هم مقایسه شده‌اند. این چهار شبکه بندی مختلف از شبکه درشت تا شبکه بسیار ریز به ترتیب با M_4, M_3, M_2, M_1 نامگذاری شده‌اند.

نمای بزرگ شده از مش بندی قسمتی از کانال برای ۴ شبکه بندی مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنان که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پروفیل سرعت در شبکه‌های M_4 و M_3 بر روی هم منطبق هستند. با زیاد شدن تعداد سلول شبکه بندی، خطای برشی کاهش یافته و دقت حل نیز افزایش می‌یابد. از طرف دیگر زیاد شدن تعداد سلول‌های شبکه بندی، افزایش هزینه محاسباتی را نیز به همراه دارد؛ به همین خاطر شبکه بندی M_3 برای بررسی عددی این تحقیق انتخاب شده است.



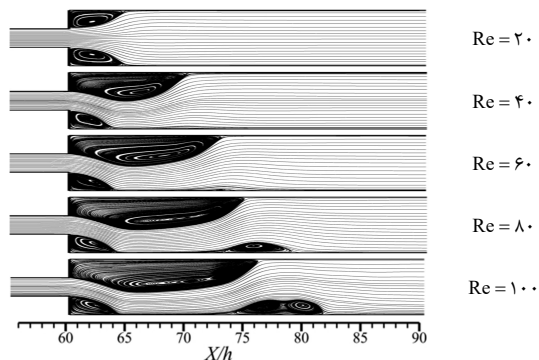
شکل ۲- توزیع سرعت و دما جریان سیال ویسکوالاستیک در ورودی بخش انبساطی کانال برای چهار شبکه بندی مختلف

۴- بررسی نتایج

هدف اصلی این تحقیق، شبیه سازی جریان اینرسی و غیر همدماي سیال ویسکوالاستیک داخل کانال صفحه‌ای متقارن با انبساط ناگهانی ۱:۳ و بررسی اثرات نیروی اینرسی، خاصیت الاستیک و اتلافات ناشی از لزجت بر ضریب افت فشار و ضریب تلفات در بخش انبساطی کانال است. بدین منظور الگوی جریان، کانتور فشار، توزیع فشار روی خط مرکزی و در مجاورت دیواره‌های کانال، ضریب افت فشار و ضریب تلفات در بخش انبساطی کانال برای اعداد رینولدز، وایزبرگ و برینکمن مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در تمام شکل‌ها، فشار بدون بعد (p^*) از تقسیم کردن فشار (p) بر عبارت $(0.5\rho U_1^2)$ بدست آمده است.

۴-۱- تأثیر نیروی اینرسی

برای مطالعه اثرات نیروی اینرسی روی تغییرات فشار جریان غیر همدماي سیال ویسکوالاستیک داخل کانال واگرای ناگهانی، خطوط جریان، کانتور فشار، توزیع فشار روی خط مرکزی و در مجاورت دیواره‌های کانال، ضریب افت فشار و ضریب تلفات برای محدوده اعداد رینولدز $(10 \leq Re \leq 100)$ در عدد وایزبرگ ۱۰، عدد برینکمن ۱ و عدد پراتنل ۱ ترسیم و بررسی شده است. در شکل ۶، خطوط جریان غیر همدماي سیال ویسکوالاستیک داخل کانال صفحه‌ای متقارن با انبساط ناگهانی ۱:۳ برای اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. در ابتدا که عدد رینولدز جریان کوچک است، اثرات لزجت و اختلالات متقارن جریان پایین دست بر اختلالات نامتقارن جریان بالادست غلبه کرده و الگوی جریان متقارن باقی می‌ماند. ولی با افزایش بیشتر نیروی اینرسی جریان، اختلالات نامتقارن جریان بالادست غلبه کرده و جریان به یک سمت دیواره‌های کانال (دیواره پایینی کانال) منحرف می‌شود و به تبع آن الگوی جریان نامتقارن ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش بیشتر عدد رینولدز، طول و قدرت گردابه بزرگ در مجاورت دیواره بالایی کانال افزایش یافته و جریان مجدداً به سمت دیواره بالایی کانال تغییر مسیر می‌دهد و باعث تشکیل گردابه سوم در مجاورت دیواره پایینی کانال می‌شود.

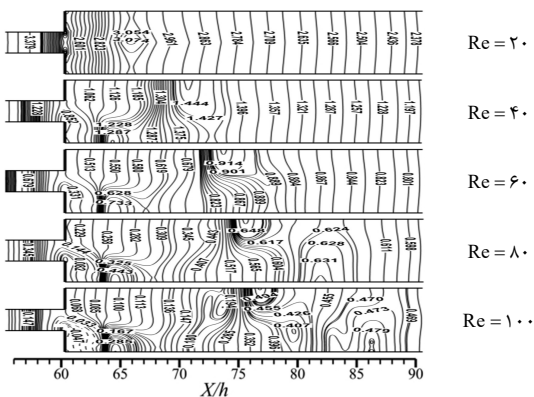


شکل ۶- خطوط جریان غیر همدماي سیال ویسکوالاستیک داخل کانال صفحه‌ای متقارن در اعداد رینولدز مختلف

در شکل ۷، تغییرات خطوط هم فشار برای جریان غیر همدماي سیال ویسکوالاستیک داخل بخش انبساطی کانال صفحه‌ای در اعداد

رینولدز مختلف نشان داده شده است. در اعداد رینولدز کوچک که جریان متقارن است، توزیع فشار در بخش انبساطی کانال نیز متقارن است. هنگامی که جریان وارد بخش انبساطی کانال می‌شود، مقدار سرعت دچار افت ناگهانی شده و این کاهش سرعت تا انتهای گردابه ادامه دارد؛ به همین خاطر، افزایش فشار تا انتهای گردابه‌های متقارن ادامه دارد ولی پس از آن مقدار فشار کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر نیروی اینرسی جریان، گردابه‌ها نامتقارن می‌شوند. در انتهای گردابه‌ها و در مجاورت دیواره‌های کانال، خطوط هم فشار تشکیل نواحی نیمه بیضوی شکل می‌دهند که به صورت یک سد عمل کرده و سبب تجمع خطوط توزیع فشار در پشت این نواحی می‌شود. در سمت دیگر، این خطوط هم فشار به دیواره مقابل وصل شده و با افزایش عدد رینولدز در جهت جریان جابجا می‌شوند.

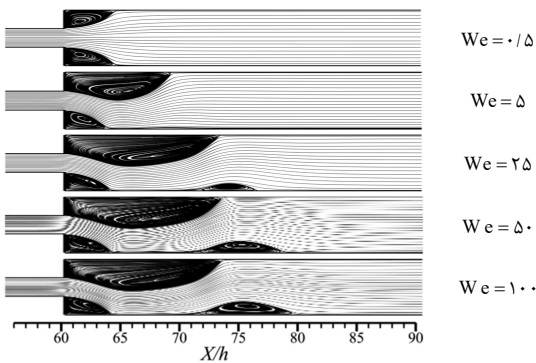
افزایش نیروی اینرسی (عدد رینولدز) باعث می‌شود که مقدار فشار در نواحی نیمه بیضوی شکل کاهش یافته و رشد آن در راستای عرضی بخش انبساطی کانال کم شود. علاوه بر این با افزایش عدد رینولدز و رشد گردابه‌ها، خطوط فشار در نواحی نیمه بیضوی شکل متراکم تر شده و مکان تشکیل آن نیز در جهت جریان جابجا می‌شود. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، توزیع فشار جریان غیر همدما روی خط مرکزی و در مجاورت دیواره‌های بخش انبساطی کانال برای اعداد رینولدز مختلف ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۷ توضیح داده شد و با توجه به شکل ۸، مکان نقاط بیشترین فشار در مجاورت دیواره‌های بخش انبساطی کانال، در انتهای گردابه‌ها قرار دارد. به دلیل تشکیل دو گردابه در مجاورت دیواره پایینی بخش انبساطی کانال، دو نقطه بیشینه در نمودار مشاهده می‌شود. افزایش نیروی اینرسی سبب کاهش مقدار بیشینه فشار و جابجایی آن در جهت جریان می‌شود. با افزایش نیروی اینرسی، افت فشار در مجاورت دیواره پایین (که دارای دو گردابه است) نسبت به افت فشار در مجاورت دیواره بالا بیشتر می‌باشد.



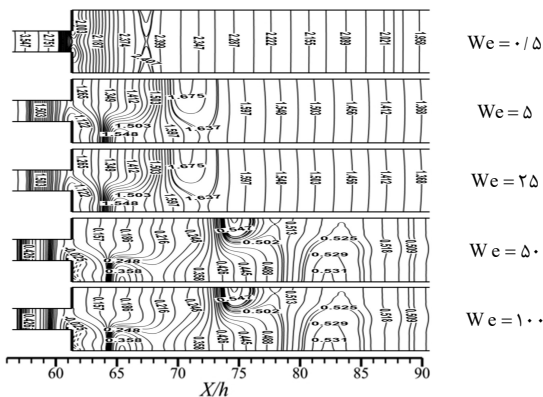
شکل ۷- کانتور فشار جریان غیر همدماي سیال ویسکوالاستیک داخل بخش انبساطی کانال صفحه‌ای در اعداد رینولدز مختلف

در شکل ۹، تغییرات ضریب افت فشار و ضریب تلفات جریان غیر همدماي سیال ویسکوالاستیک در بخش انبساطی کانال برای اعداد رینولدز مختلف ترسیم شده است. هنگامی که عدد رینولدز کوچک است ($Re \leq 20$) و گردابه‌ها متقارن هستند، افزایش نیروی اینرسی سبب کاهش ضرایب افت فشار و تلفات به صورت خطی و با شیب زیاد

سیال ویسکوالاستیک داخل کانال واگرای ناگهانی برای اعداد وایزبرگ مختلف در شکل ۱۰ نشان داده است. در ابتدا که عدد وایزبرگ کوچک است، اثرات نیروی لزجت و اختلالات متقارن جریان پایین دست بر اثرات اختلالات نامتقارن جریان بالادست غلبه کرده و گردابه‌های متقارن تشکیل می‌شود. با افزایش خاصیت الاستیک، اثر حافظه سیال تقویت شده و با کاهش تأثیر نیروی لزجت، باعث غالب شدن اثرات اختلالات نامتقارن جریان بالادست می‌شود؛ در نتیجه گردابه‌های نامتقارن تشکیل می‌شود. با افزایش بیشتر عدد وایزبرگ، خاصیت الاستیک و اثرات حافظه سیال افزایش یافته و گردابه سوم نیز تشکیل می‌گردد. در شکل ۱۱، کانتور فشار جریان غیر همدمای سیال ویسکوالاستیک در بخش انبساطی کانال برای اعداد وایزبرگ مختلف ترسیم شده است.



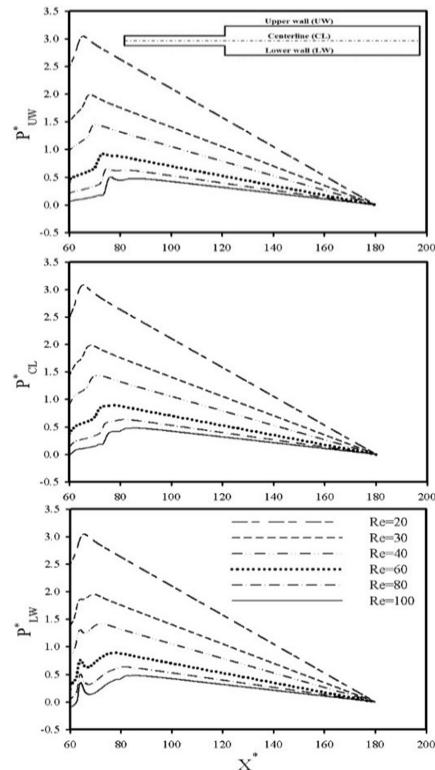
شکل ۱۰- خطوط جریان غیر همدمای سیال ویسکوالاستیک در کانال صفحه‌ای متقارن برای اعداد وایزبرگ مختلف



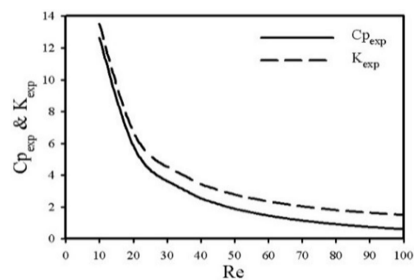
شکل ۱۱- کانتور فشار جریان غیر همدمای سیال ویسکوالاستیک در بخش انبساطی کانال برای اعداد وایزبرگ مختلف

هنگامی که جریان متقارن است، افزایش فشار تا انتهای هر دو گردابه ادامه دارد و پس از آن کاهش می‌یابد. ولی هنگامی که جریان نامتقارن است و گردابه سوم نیز تشکیل می‌شود، بیشتر مقدار فشار و تراکم خطوط فشار مربوط به ناحیه نیمه بیضوی شکل در انتهای گردابه بزرگتر (در مجاورت دیواره بالایی بخش انبساطی کانال) است. البته در انتهای گردابه سوم نیز خطوط هم فشار تشکیل نواحی نیمه بیضوی شکل را نیز می‌دهند که با افزایش خاصیت الاستیک، این نواحی از مجاورت دیواره پایینی بخش انبساطی کانال در جهت عرضی کانال

می‌شود. با افزایش بیشتر عدد رینولدز، نواحی گردابه‌ای شکل نامتقارن تشکیل می‌شود؛ با انتقال انرژی جنبشی سیال به گردابه‌ها، طول و قدرت آنها افزایش یافته و در نتیجه ضرایب افت فشار و تلفات با شیب کمتر و به صورت نمایی کاهش می‌یابند. با افزایش بیشتر عدد رینولدز و تشکیل گردابه سوم، شیب تغییرات این ضرایب همچنان کمتر می‌گردد.



شکل ۸- توزیع فشار جریان غیر همدما روی خط مرکزی و در مجاورت دیواره‌های بخش انبساطی کانال برای اعداد رینولدز مختلف

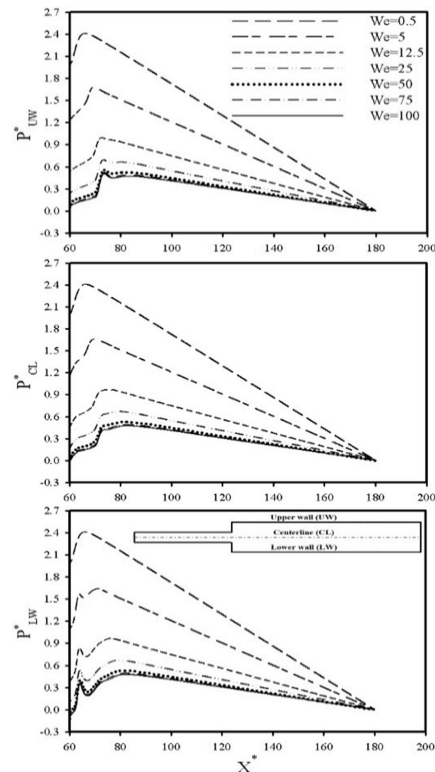


شکل ۹- منحنی تغییرات ضریب افت فشار و ضریب تلفات جریان غیر همدما در بخش انبساطی کانال برای اعداد رینولدز مختلف

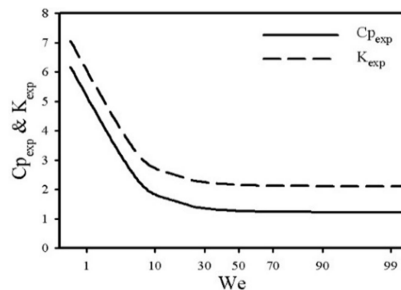
۴-۲- تأثیر خاصیت الاستیک

برای ارزیابی اثرات خاصیت الاستیک روی تغییرات فشار جریان غیر همدمای سیال ویسکوالاستیک داخل کانال واگرای ناگهانی، خطوط جریان، کانتور فشار، توزیع فشار روی خط مرکزی و در مجاورت دیواره‌های کانال، ضریب افت فشار و ضریب تلفات برای محدوده اعداد وایزبرگ (0.5 ≤ We ≤ 100) در عدد رینولدز ۵۰، عدد برینکمن ۱ و عدد پراتل ۱ ترسیم و بررسی شده است. خطوط جریان گرم شده

شروع به رشد کرده و به دیواره بالایی کانال نزدیک می‌شود. توزیع فشار جریان غیر همدماي سیال ویسکوالاستیک روی خط مرکزی و در مجاورت دیواره‌های بخش انبساطی کانال برای اعداد وایزبرگ مختلف، در شکل ۱۲ ترسیم شده است. نقاط بیشینه فشار در مجاورت دیواره‌های بخش انبساطی کانال در انتهای گردابه‌ها قرار دارد. بیشترین افت فشار جریان در بخش انبساطی کانال، در مجاورت دیواره پایینی کانال که دو گردابه قرار دارند، اتفاق می‌افتد. افزایش خاصیت الاستیک سیال باعث کاهش مقادیر بیشینه فشار و جایجایی مکان این نقاط بیشینه در جهت جریان می‌شود. نحوه تغییرات ضریب افت فشار و ضریب تلفات با عدد وایزبرگ در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- توزیع فشار روی خط مرکزی و در مجاورت دیواره‌های بخش انبساطی کانال برای اعداد وایزبرگ مختلف



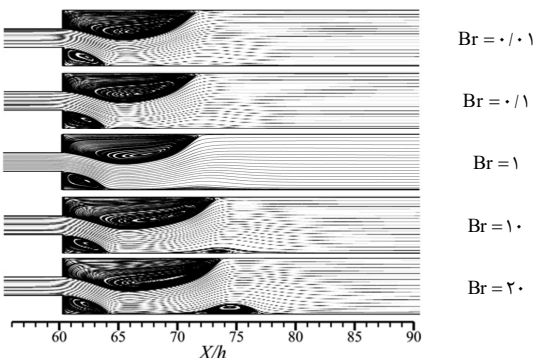
شکل ۱۳- منحنی تغییرات ضریب افت فشار و ضریب تلفات مربوط به جریان غیر همدماي در بخش انبساطی کانال در اعداد وایزبرگ مختلف

برای اعداد وایزبرگ کوچکتر از ۵، که گردابه‌ها متقارن هستند، نحوه تغییرات ضرایب افت فشار و تلفات با عدد وایزبرگ به صورت خطی و با شیب زیاد است؛ ولی با تشکیل دو گردابه نامتقارن در

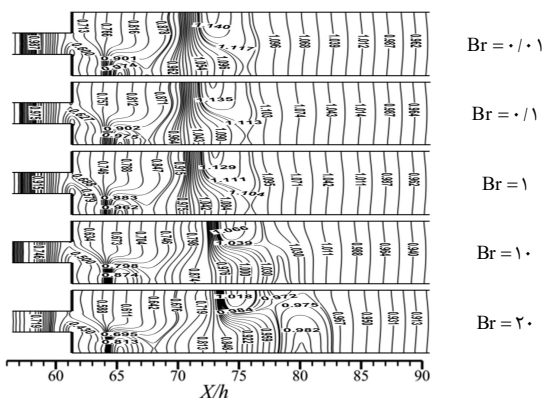
محدوده اعداد وایزبرگ ۵ تا ۲۵، شیب روند تغییرات بسیار کم شده و به صورت نمایی کاهش می‌یابد. با تشکیل گردابه سوم در اعداد وایزبرگ بزرگتر از ۲۵، ضرایب افت فشار و تلفات مستقل از خاصیت الاستیک هستند.

۴-۳- تأثیر اتلافات ناشی از لزجت

برای مطالعه تأثیر اتلافات ناشی از لزجت روی تغییرات فشار جریان غیر همدماي سیال ویسکوالاستیک در کانال واگرایی ناگهانی، خطوط جریان، کانتور فشار، توزیع فشار روی خط مرکزی و در مجاورت دیواره‌های کانال، ضریب افت فشار و ضریب تلفات برای محدوده اعداد برینکمن ($0.1 \leq Br \leq 20$) در عدد رینولدز ۵۰، عدد وایزبرگ ۱۰ و عدد پرانتل ۱ ترسیم و بررسی شده است. در شکل ۱۴، تأثیر اتلافات ناشی از لزجت بر خطوط جریان سیال ویسکوالاستیک در کانال واگرایی ناگهانی بررسی شده است. با افزایش عدد برینکمن، اتلافات انرژی بیشتر شده و گرمای ذخیره شده توسط خاصیت الاستیک نیز افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با تولید و ذخیره گرما، دمای سیال افزایش یافته و لزجت کم شده و طول و قدرت گردابه‌ها افزایش می‌یابند که این منجر به تشکیل گردابه سوم می‌شود. کانتور فشار جریان غیر همدماي سیال ویسکوالاستیک در بخش انبساطی کانال برای اعداد برینکمن مختلف در شکل ۱۵ نشان داده شده است. بیشترین مقدار فشار مربوط به نواحی نیمه بیضوی شکل تشکیل شده در انتهای گردابه بزرگتر است.



شکل ۱۴- خطوط جریان غیر همدماي سیال ویسکوالاستیک در کانال واگرایی ناگهانی برای اعداد برینکمن مختلف



شکل ۱۵- کانتور فشار جریان غیر همدماي سیال ویسکوالاستیک در بخش انبساطی کانال برای اعداد برینکمن مختلف

۵- نتیجه‌گیری

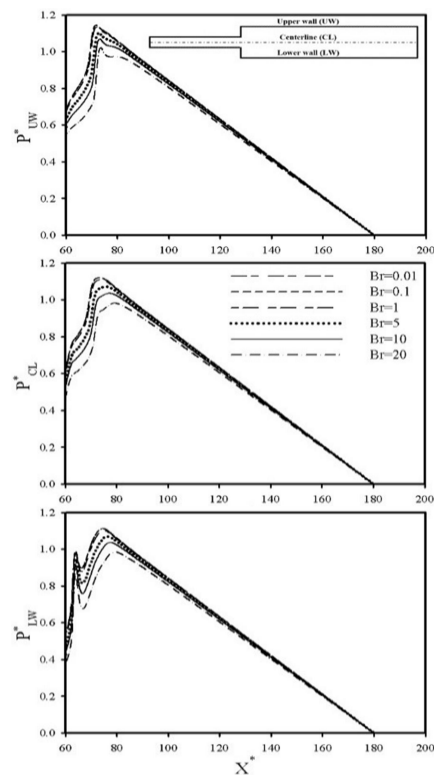
در این تحقیق، جریان اینرسی (غیر خزشی) و غیر همدمای سیال ویسکوالاستیک داخل کانال صفحه‌ای متقارن با انبساط ناگهانی ۱:۳ شبیه‌سازی شده است. مدل‌سازی رفتار رئولوژیکی و پیچیده سیال ویسکوالاستیک با شکل نمائی مدل رئولوژیکی فن-تین-تر انجام شده است تا اثرات هر دو خواص لزجت و الاستیک سیال در جریان اعمال شود. ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب رسانایی گرمایی، لزجت و زمان رهایی از تنش وابسته به دما بوده و جمله اتلافات ناشی از لزجت در معادله انرژی لحاظ شده است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی اثرات نیروی اینرسی، خاصیت الاستیک و اتلافات ناشی از لزجت روی الگوی جریان، نحوه تغییرات فشار و تلفات در جریان غیر همدمای سیال ویسکوالاستیک در بخش انبساطی کانال صفحه‌ای متقارن است. به همین خاطر خطوط جریان، کانتور فشار، منحنی توزیع فشار روی خط مرکزی و در مجاورت دیواره‌های کانال، ضریب افت فشار و ضریب تلفات برای اعداد رینولدز، وایزبرگ و برینکمن مختلف ترسیم و مورد بحث قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان بطور خلاصه به صورت زیر بیان کرد.

- ۱- نقاط بیشینه فشار در مجاورت دیواره‌های بخش انبساطی کانال، در انتهای گردابه‌ها قرار دارند. افزایش نیروی اینرسی سبب کاهش مقدار بیشینه فشار و جابجایی آن در جهت جریان می‌شود.
- ۲- با افزایش نیروی اینرسی، کاهش فشار در مجاورت دیواره پایین (که دارای دو گردابه کوچکتر است) نسبت به کاهش فشار در مجاورت دیواره بالا (که یک گردابه بزرگتر دارد) بیشتر است.
- ۳- هنگامی که عدد رینولدز کوچک بوده ($Re \leq 20$) و گردابه‌ها متقارن هستند، افزایش نیروی اینرسی سبب کاهش ضرایب افت فشار و تلفات به صورت خطی و با شیب زیاد می‌شوند. با افزایش بیشتر عدد رینولدز و تشکیل گردابه‌های نامتقارن، ضرایب افت فشار و تلفات با شیب کمتر و به صورت نمائی کاهش می‌یابند.
- ۴- افزایش خاصیت الاستیک سبب کاهش مقادیر بیشینه فشار و جابجایی مکان این نقاط بیشینه در جهت جریان می‌گردد.
- ۵- برای اعداد وایزبرگ کوچکتر از ۵ که گردابه‌ها متقارن است، نحوه تغییرات ضرایب افت فشار و تلفات با عدد وایزبرگ به صورت خطی هستند و با شیب زیاد کاهش می‌یابند. در حالیکه برای اعداد وایزبرگ بزرگتر از ۲۵ که گردابه سوم تشکیل می‌شود، مقادیر ضرایب افت فشار و تلفات مستقل از خاصیت الاستیک هستند.
- ۶- افزایش اتلافات ناشی از لزجت سبب کاهش مقادیر بیشینه فشار در مجاورت دیواره‌های بخش انبساطی کانال شده و بیشترین تغییرات فشار با عدد برینکمن، مربوط به داخل نواحی گردابه‌ای شکل است.
- ۷- بیشترین اثرات اتلافات ناشی از لزجت روی ضرایب افت فشار و تلفات مربوط به اعداد برینکمن بزرگتر از ۱ است. برای اعداد برینکمن کوچکتر از یک، تأثیر اتلافات ناشی از لزجت روی ضریب افت فشار و ضریب تلفات بسیار ناچیز است.

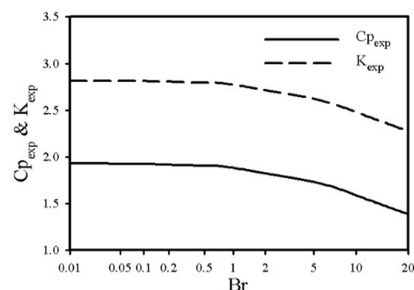
۶- مراجع

- [1] Poole R. J., Alves M. A., Oliveira P. J. and Pinho F. T., Plane sudden expansion flows of viscoelastic liquids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 146, No. 1, pp. 79-91, 2007.

با افزایش اتلافات ناشی از لزجت، تراکم خطوط هم فشار در ناحیه نیمه بیضوی شکل افزایش یافته و این نواحی کوچکتر می‌گردند. در شکل ۱۶، اثرات عدد برینکمن بر توزیع فشار روی خط مرکزی و در مجاورت دیواره‌های بخش انبساطی کانال بررسی شده است. افزایش اتلافات ناشی از لزجت سبب کاهش مقادیر بیشینه فشار در مجاورت دیواره‌های بخش انبساطی کانال می‌شود. همچنین بیشترین تغییرات فشار با عدد برینکمن داخل نواحی گردابه‌ای شکل روی می‌دهد. در شکل ۱۷، روند تغییرات ضرایب افت فشار و تلفات جریان گرم شده سیال ویسکوالاستیک داخل بخش انبساطی کانال در اعداد برینکمن مختلف نشان داده شده است. بیشترین اثرات اتلافات ناشی از لزجت روی ضرایب افت فشار و تلفات مربوط به اعداد برینکمن بزرگتر از ۱ است. برای اعداد برینکمن کوچکتر از یک، تأثیر اتلافات ناشی از لزجت روی ضریب افت فشار و ضریب تلفات بسیار ناچیز است.



شکل ۱۶- توزیع فشار جریان غیر همدما روی خط مرکزی و در مجاورت دیواره‌های بخش انبساطی کانال در اعداد برینکمن مختلف



شکل ۱۷- منحنی تغییرات ضریب افت فشار و ضریب تلفات جریان گرم شده داخل بخش انبساطی کانال برای اعداد برینکمن مختلف

- [16] Peters G. W. M., Schoonen J. F. M., Baaajens F. P. and Meijer H. E. H., On the performance of enhanced constitutive models for polymer melts in a cross-slot flow. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 82, No. 2, pp. 387-427, 1999.
- [17] Quinzani L. M., Armstrong R. C. and Brown R. A., Use of coupled birefringence and LDV studies of flow through a planar contraction to test constitutive equations for concentrated polymer solutions. *Journal of Rheology*, Vol. 39, No. 6, pp. 1201-1228, 1995.
- [18] Phan-Thien N. and Tanner R. I., A new constitutive equation derived from network theory. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 2, No. 4, pp. 353-365, 1977.
- [19] Phan - Thien N., A nonlinear network viscoelastic model. *Journal of Rheology*, Vol. 22, No. 3, pp. 259-283, 1978.
- [20] Bird R. B. and Wiest J. M., Constitutive equations for polymeric liquids. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 27, No. 1, pp. 169-193, 1995.
- [21] Alves M. A., Pinho F. T. and Oliveira P. J., Viscoelastic flow in a 3D square/square contraction: visualizations and simulations. *Journal of Rheology*, Vol. 52, No. 6, pp. 1347-1368, 2008.
- [22] Cruz D. O. A. and Pinho F. T., Fully-developed pipe and planar flows of multimode viscoelastic fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 141, No. 2, pp. 85-98, 2007.
- [23] Bird R. B., Armstrong R. C. and Hassager O., *Dynamics of polymeric liquids: Fluid mechanics*. Second ed.: New York: John Wiley and Sons Inc., 1987.
- [24] Mark J. E., *Physical properties of polymers handbook*, New York: American Institute of Physics, 1996.
- [25] Oliveira P. J., Pinho F. T. and Pinto G. A., Numerical simulation of non-linear elastic flows with a general collocated finite-volume method. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 79, No. 1, pp. 1-43, 1998.
- [26] Favero J. L., Secchi A. R., Cardozo N. S. M. and Jasak H., Viscoelastic flow analysis using the software OpenFOAM and differential constitutive equations. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 165, No. 23, pp. 1625-1636, 2010.
- [27] Patankar S. V. and Spalding D. B., A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, No. 10, pp. 1787-1806, 1972.
- [28] Ajiz M. A. and Jennings A., A robust incomplete Choleski - conjugate gradient algorithm. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 20, No. 5, pp. 949-966, 1984.
- [29] Lee J., Yoon S., Kwon Y. and Kim S., Practical comparison of differential viscoelastic constitutive equations in finite element analysis of planar 4: 1 contraction flow. *Rheologica Acta*, Vol. 44, No. 2, pp. 188-197, 2004.
- [30] Versteeg H. K. and Malalasekera W., *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Second ed., Harlow, United Kingdom: Pearson Education Limited, 2007.
- [31] Coelho P. M., Pinho F. T. and Oliveira P. J., Fully developed forced convection of the Phan-Thien-Tanner fluid in ducts with a constant wall temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 7, pp. 1413-1423, 2002.
- [32] Fearn R. M., Mullin T. and Cliffe K. A., Nonlinear flow phenomena in a symmetric sudden expansion. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 211, pp. 595-608, 2006.
- [2] Poole R. J., Pinho F. T., Alves M. A. and Oliveira P. J., The effect of expansion ratio for creeping expansion flows of UCM fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 163, No. 1, pp. 35-44, 2009.
- [3] Oliveira P. J., Asymmetric flows of viscoelastic fluids in symmetric planar expansion geometries. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 114, No. 1, pp. 33-63, 2003.
- [4] Zheng Z.-Y., Li F.-C. and Yang J.-C., Modeling Asymmetric Flow of Viscoelastic Fluid in Symmetric Planar Sudden Expansion Geometry Based on User-Defined Function in FLUENT CFD Package. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 5, pp. 1-13, 2013.
- [5] Norouzi M., Shahmardan M. M. and Shahbani Zahiri A., Bifurcation phenomenon of inertial viscoelastic flow through gradual expansions. *Rheologica Acta*, Vol. 54, No. 5, pp. 423-435, 2015.
- [6] شاه مردان م. م.، نوروزی م.، حسن زاده ح. و شهبانی ظهیری ا.، تأثیر خاصیت الاستیک و نیروی اینرسی بر طول گردابه‌های موجود در جریان سیال ویسکوالاستیک داخل کانال صفحه‌ای با انبساطی تدریجی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۵، ش. ۴، ص ۲۸۱-۲۹۱، ۱۳۹۴.
- [7] Kfuri S. L., Soares E. J., Thompson R. L. and Siqueira R. N., Friction coefficients for Bingham and Power-law fluids in abrupt contractions and expansions. *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 139, No. 2, pp. 021203, 2017.
- [8] Norouzi M., Shahbani Zahiri A., Shahmardan M. M., Hassanzadeh H. and Talebi Z., A numerical study on pressure losses in asymmetric viscoelastic flow through symmetric planar gradual expansions. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, Vol. 65, pp. 199-212, 2017.
- [9] Norouzi M., Shahbani Zahiri A., Shahmardan M. M., Hassanzadeh H. and Davoodi M., Investigation of stresses and normal stress differences behavior on symmetric and asymmetric polymeric fluid flow through planar gradual expansions. *Meccanica*, Vol. 52, No. 8, pp. 1889-1909, 2017.
- [10] Vaz Jr M. and Zdanski P. S. B., A fully implicit finite difference scheme for velocity and temperature coupled solutions of polymer melt flow. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol. 23, No. 4, pp. 285-294, 2007.
- [11] Zdanski P. S. B. and Vaz Jr M., Non-isothermal polymer melt flow in sudden expansions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 161, No. 1, pp. 42-47, 2009.
- [۱۲] منتهایی ع.، شاه مردان م. م.، و نوروزی م.، شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت خواص وابسته به دمای سیال ویسکوالاستیک در تبدیل واگرای متقارن محوری. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۶، ش. ۱۲، ص ۳۹-۴۹، ۱۳۹۵.
- [۱۳] شهبانی ظهیری ا.، حسن زاده ح.، شاه مردان م. م.، و نوروزی م.، بررسی اثرات نیروی اینرسی روی انتقال حرارت جریان سیال ویسکوالاستیک داخل کانال صفحه‌ای واگرا با انبساط ناگهانی متقارن. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۷، ش. ۶، ص ۱۳۹-۱۴۸، ۱۳۹۶.
- [14] Shahbani-Zahiri A., Hassanzadeh H., Shahmardan M. M. and Norouzi M., Investigation of pitchfork bifurcation phenomena effects on heat transfer of viscoelastic flow inside a symmetric sudden expansion. *Physics of Fluids*, Vol. 29, No. 11, pp. 1-16, 2017.
- [15] Nóbrega J. M., Pinho F. T., Oliveira P. J. and Carneiro O. S., Accounting for temperature-dependent properties in viscoelastic duct flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 6, pp. 1141-1158, 2004.