ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir



# تأثیر خاصیت الاستیک و نیروی اینرسی بر طول گردابههای موجود در جریان سیال ویسکوالاستیک داخل کانال صفحهای با انبساطی تدریجی

 $^4$ محمد محسن شاهمردان $^{1^*}$ ، محمود نوروزی  $^2$ ، حسن حسنزاده $^6$ ، امین شهبانی ظهیری

1- دانشيار، مهندسي مكانيك، دانشگاه شاهرود، شاهرود

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

4- دانشجوي دكتري، مهندسي مكانيك، دانشگاه بيرجند، بيرجند

\* شاهرود، صندوق پستی mmshahmardan@shahroodut.ac.ir ،**3619995161-316** 

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این تحقیق، جریان غیر خزشی سیال ویسکوالاستیک در داخل کانال صفحهای با انبساط تدریجی و نسبت انبساط 1:3 مورد بررسی قرار گرفته	مقاله پژوهشی کامل
است. شبیه سازی عددی جریان آرام و تراکم ناپذیر سیال ویسکوالاستیک با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم پیزو انجام شده است. برای	دریافت: 07 مهر 1393
مطالعه اثر خاصیت الاستیک بر روی طول گردابههای جریان سیال پلیمری از مدل رئولوژیکی غیرخطی فن تین-تنر استفاده شده است. در	پذیرش: 15 بهمن 1393
— مطالعه حاض پریسی طول گردابههای متقارن در محدوده وسعی از اعداد رینولدز و وازندگ و به بای سه زاویه انساط 3:4 مور	ارائه در سایت: 16 اسفند 1393
درجه انجام شده است. از نوآوری این تحقیق، مطالعه جریان سیالات پلیمری داخل کانال صفحه یا تغییرات تدریجی در سطح مقطع (زوایای	<i>کلید واژگان:</i>
انبساطی کمتر از 90 درجه) میباشد. همچنین مقادیر بحرانی اول و دوم برای اعداد رینولدز و وایزنبرگ در زوایای انبساطی مختلف گزارش	سیال ویسکوالاستیک
گردیده و طول گردابههای دوم و سوم به صورت توابعی از اعداد رینولدز و وایزنبرگ بیان و ترسیم شده است. برای اعداد وایزنبرگ کمتر از یک،	زاویه انبساط
طول گردابههای متقارن با افزایش خاصیت الاستیک در تمام زوایای اسطی کاهش می یابد. در حالی که افزایش اندازه زاویه انبساط در اعداد	طول گردایهها
میان می از می از می از می می مینون معانی این می از می از مین می از می می می می این می می می می می می می می می ب	معدر بنولزد بحرانه

# The influence of elastic property and inertial force on the length of vortices in viscoelastic fluid flow inside planar channel with the gradual expansion

Mohammad Mohsen Shahmardan<sup>1\*</sup>, Mahmood Norouzi<sup>1</sup>, Hassan Hassanzadeh<sup>2</sup>, Amin Shahbani Zahiri<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran. 2- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

\* P.O.B. 3619995161-316 Shahrood, Iran, mmshahmardan@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	ABSTRACT
Original Research Paper Received 29 September 2014 Accepted 04 February 2015 Available Online 07 March 2015	In this study, non-creep flow of viscoelastic fluid was investigated inside a planar channel with gradual expansion and expansion ratio of 1:3. The laminar and incompressible flow of viscoelastic fluid has been simulated numerically using finite volume method and PISO algorithm. The nonlinear Phan Thien-Tanner (PTT) rheological model has been applied to study effect of
<i>Keywords:</i> Viscoelastic fluid Expansion angle Length of vortices Critical Reynolds number Critical Weissenberg number	elasticity property on the length of vortices in the polymeric fluid flow. In present study, the investigation of symmetric and asymmetric vortices length is down in a wide range of Reynolds and Weissenberg numbers and for three angles of 30, 45 and 60 degrees. The study of polymeric fluids flow through the planar channel with gradual changes in cross section (with expansion angles less than 90 degrees) is the innovation of this research. Also, the critical values of first and second for Reynolds and Weissenberg numbers have been expressed in various expansion angles and furthermore, length of second and third vortices has been plotted and presented as a function of Reynolds and Weissenberg numbers. The length of symmetric vortices decreases with increment of elastic property at all expansion angles for values of Weissenberg numbers which is less than one. Whereas the growth of expansion angle value leads to increase in the length of symmetric and asymmetric vortices for low Revnolds and Weissenberg numbers.

# کاربردهای مهم آن می توان به صنایع داروسازی، مواد غذایی، پتروشیمی و نفت اشاره کرد. برای جریان سیالات داخل کانال با انبساط و انقباض ناگهانی، مطالعات فراوانی بصورت عددی و آزمایشگاهی انجام شده است. جریان

### 1- مقدمه

جریان سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی در کانالهایی با سطح مقطع متغیر (انبساطی یا انقباضی) یکی از مسایل رایج و پرکاربرد در صنعت است. از جمله

Please cite this article using:

# برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M.M. Shahmardan, M. Norouzi, H. Hassanzadeh, A. Shahbani Zahiri, The influence of elastic property and inertial force on the length of vortices in viscoelastic fluid flow inside planar channel with the gradual expansion, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 281-291, 2015 (In Persian)

سیالات غیرنیوتنی در انقباض ناگهانی بیشتر از انبساط ناگهانی بررسی شده است و مقالههای مختلفی در این زمینه موجود میباشد. در حالیکه تحقیقات کمتری در مورد جریان سیالات غیرنیوتنی (به ویژه سیالات ویسکوالاستیک) در انبساط ناگهانی انجام شده است.

در اواخر قرن نوزدهم، جریان سیالات نیوتنی در هندسه انبساط ناگهانی بصورت تجربی و عددی برای اعداد رینولدز کم توسط پژوهشگران مطالعه شده است. در این زمینه، هونگ و مکاگنو [1]، دورست و همکارانش [2] و چدرون و همکارانش [3]، شبیه سازی عددی جریان آرام سیال نیوتنی را برای انبساط ناگهانی و اعداد رینولدز کم انجام دادهاند. همچنین مکاگنو و هنگ [4] و فیرن و همکارانش [5] جریان آرام سیال نیوتنی را بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادهاند. نتایج همه این تحقیقات نشان میدهد که با زیاد شدن اینرسی جریان، طول نواحی گردابهای شکل افزایش مییابد.

سپس اکریوس و اسکرادر [6] و مایلس و همکارانش [7] جریان سیالات نیوتنی داخل کانال واگرای نامتقارن را برای اعداد رینولدز بزرگ ( $\mathbf{Re} \leq 500$ ) به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان می دهد که برای پروفیل سرعت سهمی در ورودی کانال، جریان در اعداد رینولدر بالا همچنان پایدار می ماند؛ در حالیکه اگر سرعت جریان در ورودی کانال یکنواخت باشد، جریان با شرط 1/54 >  $\overline{\lambda}$  پایدار می ماند و پارامتر  $\overline{\lambda}$  نصف عرض کانال پالادست است. همچنین شاهمردان و همکارانش [8] آستانه تغییر حالت پایداری جریان سیال نیوتنی از حالت متقارن به نامتقارن را در داخل کانال دارای انبساط تدریجی با نسبت انبساط 1:3 مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، تأثیر زوایای انبساط بر اعداد رینولدز بحرانی اول و دوم مورد بررسی قرار گرفته و نمودار چند شاخهای برای طول گردابهها در زوایای انبساطی مختلف ترسیم شده است.

مانيكا و بروتولى [9] حل عددى جريان سيال غيرنيوتنى در انبساط ناگهانی صفحهای را با مدل قانون توانی<sup>1</sup> برای نسبت انبساط **1:3** انجام دادند. آنها در تحقیق خود با استفاده از سیالات غیرنیوتنی رقیق شونده<sup>2</sup> و غلیظ شونده<sup>3</sup>، مقدار عدد رینولذر بحرانی و وابستگی آن به شاخص توانی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که با کاهش مقدار شاخص توانی برای سیالات غیرنیوتنی رقیق شونده، جریان در اعداد رینولدز کوچکتری نامتقاران می شود؛ در حالیکه این پدیده برای سیال غیرنیوتنی غلیظ شونده، برعکس مىباشد. نئوفيتو [10] نيز شبيه سازى عددى جريان سيال غيرنيوتنى در انبساط ناگهانی صفحهای 1:2 را برای دو مدل قانون توانی و کایسون <sup>\*</sup>انجام داده و حالت عدم تقارن جریان سیالات غیرنیوتنی را مورد مطالعه قرار داده است. دهینکارا و همکارانش [11] نیز جریان سیال غیرنیوتنی رقیق شونده و ( $0/2 \le n \le 4$ ) غليظ شونده در انبساط ناگهانی را با استفاده از قانون توانی ( $n \le 4 \ge n \le 0$ ) برای نسبت انبساط 1:3 مورد مطالعه قرار دادند. آنها با بررسی جریان در محدودہ وسیعی از اعداد رینولدز ( $0/01 \leq \mathbf{Re_{gen}} \leq 600$ )، حالت عدم تقارن جریان و گردابه سوم را مشاهده کردند و مقادیر اعداد رینولدز بحرانی را بدست آوردند.

تاوسند و والترز [12] رفتار جریان سیالات ویسکوالاستیک داخل انبساط ناگهانی برای نسبت انبساطهای بزرگ (3:40 و 1:80) در حالت صفحهای و متقارن محوری را بصورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در ادامه بالوچ و همکارانش [13] با استفاده از مدل فن تین-تنر خطی<sup>5</sup> جریان انبساطی دو

بعدی در نسبت انبساطهای 3:40 و 1:80 را برای اعداد رینولدز کم (≥ Re 4) به صورت عددی مدلسازی کردند. همچنین دارویش و همکارانش [14] و میسرلیس و همکارانش [15] با استفاده از مدل ماکسول بالادست<sup>6</sup> و روش المان محدود، جریان خزشی سیال ویسکوالاستیک (Re = 0/1) در انبساط ناگهانی 1:4 را شبیه سازی کردند. در تمام این تحقیقات با افزایش عدد دبورا، قدرت و طول گردابهها کاهش پیدا میکند و در اعداد دبورای بسیار بزرگ این گردابهها محو می گردند.

پول و همکارانش [16] ابتدا جریان خزشی سیال ویسکوالاستیک را با دو مدل ماکسول بالادست و اولدروید- بی<sup>7</sup> برای انبساط ناگهانی صفحهای با نسبت انبساط 1:3 مورد مطالعه قرار دادند و سپس در تحقیقی دیگر [17] با استفاده از مدل ماکسول بالادست، تأثیر نسبت انبساط بر روی الگوی جریان خزشی را بررسی کردند. نتیجه جالب مورد مشاهده در مطالعه آنها، روند تغییر طول گردابهها با نسبت انبساط در اعداد دبورای مختلف میباشد. برای نسبت انبساطهای کوچک، تغییرات غیر یکنواختی برای طول گردابهها با عدد دبورا مشاهده می گردد. بطوری که روند تغییرات طول گردابهها در اعداد دبورای کم بصورت کاهشی و در اعداد دبورای بزرگ بصورت افزایشی میباشد. در حالیکه برای نسبت انبساطهای بزرگ ( $E \leq R$ ) روند تغییرات طول گردابهها کاهش می یابد.

اوليويرا [18] مدلسازي عددي جريان سيالات ويسكوالاستيك با لزجت ثابت را در داخل انبساط ناگهانی صفحهای با نسبت انبساط 1:3 انجام داده است. او در تحقیق خود سیالات ویسکوالاستیک را با استفاده از مدل پیوستگی اصلاح شده فن - سی آر<sup>8</sup> مورد مطالعه قرار داد و مشاهده نمود که خاصیت الاستیک باعث افزایش پایداری جریان شده و مقدار بحرانی عدد رینولدز در سیالات نیوتنی بیشتر از سیالات غیرنیوتنی میباشد. همچنین با استفاده از همین مدل و نسبت انبساط 1:4، روچا و همکارانش [19] پدیده عدم تقارن جریان سیالات ویسکوالاستیک را در انبساط ناگهانی صفحهای مورد بررسی قرار داده و مقادیر عدد رینولدز بحرانی را بدست آوردند. زینگ و همكارانش [20] جریان سیال ویسكوالاستیک را با مدل رئولوژیکی اصلاح شده فن- پی<sup>9</sup> توسط نرم افزار فلوئنت مدلسازی کردند. آنها نتایج مطالعات خود را با تحقيق اليويرا مقايسه كردند و مشاهده نمودند كه انتخاب مدل رئولوژیکی و مقادیر پارامترهای مدل در نتایج بسیار مؤثر میباشد. همچنین عزیزی و همکارانش [21] نیز جریان متقارن سیال ویسکوالاستیک داخل کانال واگرای دو بعدی با نسبت انبساط 1:3 را برای سرعت ورودی کم (عدد رینولدز کوچک) مورد مطالعه قرار دادند. آنها با استفاده از مدلهای رئولوژیکی مختلف در محدوده وسیعی از اعداد وایزنبرگ، توزیع سرعت و تنش را بررسی کردند.

همانطور که اشاره شد، اکثر مطالعات انجام شده برای جریان سیال ویسکوالاستیک در داخل انبساط ناگهانی برای اعداد رینولدز کم (جریان خزشی) می اشد. در مطالعه حاضر، جریان غیرخزشی سیال ویسکوالاستیک در داخل انبساط تدریجی (زوایای انبساطی کمتر از 90 درجه) با نسبت انبساط 1:3 مدلسازی شده است. با توجه به مطالعات گذشته و بررسی دقیق-تر جریان سیال ویسکوالاستیک، مدل رئولوژیکی فن تین-تنر غیر خطی<sup>10</sup> برای مطالعه حاضر در نظر گرفته شده است. همچنین برای ایجاد انبساط تدریجی در بخش دوم کانال (بخش انبساطی)، زوایای انبساطی 30، 45 و 60

DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.15.7

<sup>1-</sup> Power Low

<sup>2-</sup> Shear-thinning 3- Shear-thickening

<sup>4-</sup> Casson model

<sup>5-</sup> Linear Phan Thien-Tanner (LPTT)

<sup>6-</sup> Upper Convected Maxwell (UCM)

<sup>7-</sup> Oldroyd-B

Finitely Extensive Nonlinear Elastic-Chilcott-Rallison (FENE-CR)
 Finitely Extensive Nonlinear Elastic-Peterlin (FENE-P)

<sup>10-</sup> Exponential Phan Thien-Tanner (EPTT)

درجه مورد مطالعه قرار گرفته است.

از نوآوری تحقیق حاضر، انتخاب زوایای انبساطی مختلف و بررسی جریان غیر خزشی با مدل فن تین-تنر غیرخطی میباشد. با توجه به شکل 1، کانال دارای سه بخش است و مبدأ محورهای مختصات در ورودی کانال و روی خط مرکزی واقع است. ارتفاع و طول در بخش اول و سوم کانال به ترتیب با  $L_1$ ، h و  $L_3$ ، H نشان داده شده است. بخش دوم کانال که همان بخش انبساطی است؛ با طول  $L_2$  و زاویه انبساط با  $\theta$  مشخص شده است.

همچنین طول گردابه اول، دوم و سوم به ترتیب با *LV*<sub>2</sub> ،*LV*<sub>1</sub> و *LV*<sub>3</sub> نامگذاری شده است. طول بخش اول و سوم کانال به ترتیب 20 و 60 برابر ارتفاع بخش اول مىباشد تا پروفيل سرعت به حالت توسعه يافته كامل دست یابد. در ادامه برای بررسی صحت و درستی نتایج تحقیق حاضر، جریان سیال نیوتنی در انبساط ناگهانی مدلسازی و با تحقیقات پیشین مقایسه شده است. همچنین با انتخاب 3 نوع شبکه مختلف برای زاویه انبساط 30 درجه، استقلال حل عددی از شبکه بررسی شده است.

# 2- معادلات حاكم و الگوريتم حل

در مطالعه حاضر جریان سیال ویسکوالاستیک آرام، تراکم ناپذیر و هم دما در نظر گرفته شده است. شکل بی بعد معادلات بقای جرم و اندازه حرکت بصورت رابطه (1) مى باشد [22]:

$$\cdot u = \mathbf{0} \tag{1}$$

 $\operatorname{Re}\frac{\partial u}{\partial t} + \operatorname{Re} u \cdot \nabla u = -\nabla p + \nabla \cdot \left(2\frac{\eta_{\mathrm{N}}}{\eta}d + \tau\right)$ (2)

که در رابطه (1) و (2) (2) و p و au به ترتیب بردار سرعت سیال، فشار هيدروديناميكي و تانسور تنش كل مىباشد. لزجت كل  $(\eta)$  سيال ويسكوالاستيک به دو لزجت نيوتنی  $(\eta_N)$  و پليمری  $(\eta_P)$  تقسيم می گردد. همچنین تانسور *b* نشان دهنده نرخ تغییرات شکل سیال است که بصورت رابطه (3) تعريف مي شود [22]:

$$d = \frac{(\nabla u + \nabla u^{T})}{2}$$
(3)

که بالانویس T نشان دهنده ترانسپوز ماتریس گرادیان سرعت است و در حالت دو بعدی بصورت رابطه (4) تعریف می گردد [22].

$$\nabla u^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_{\mathrm{x}}}{\partial x} & \frac{\partial u_{\mathrm{y}}}{\partial x} \\ \frac{\partial u_{\mathrm{x}}}{\partial y} & \frac{\partial u_{\mathrm{y}}}{\partial y} \end{bmatrix}$$
(4)

همچنین تانسور تنش کل شامل دو تانسور تنش نیوتنی (۲<sub>N</sub>) و تنش پلیمری میباشد که تنش نیوتنی از رابطه (5) بدست میآید [22]:  $( au_{
m P})$ (5)

$$\tau_{\rm N} = 2\eta_{\rm N} d$$

(8)

و تنش پلیمری ( $au_{
m P}$ ) با استفاده از مدل رئولوژیکی فن تین-تنر توسط رابطه (6) محاسبه می گردد [23]:  $n_{\rm p}$ 

$$f(tra\tau_{\rm P})\tau_{\rm P} - 2\frac{\gamma_{\rm P}}{\eta}d = We[(\tau_{\rm P}\cdot\nabla u + \nabla u^{\rm T}\cdot\tau_{\rm P})] - We\left[\frac{D\tau_{\rm P}}{Dt} + \xi(\tau_{\rm P}\cdot d + d\cdot\tau_{\rm P})\right]$$
(6)

$$UV_2$$
  
 $V$   $X$   $h$   $UV_1$   $UV_3$   $H$   
 $L_1$   $L_2$   $L_3$   
 $m$   $m$   $L_3$   
 $m$   $m$   $L_1$   $L_2$   $L_3$ 

$$f(tra\tau_{\rm P}) = \begin{cases} \exp\left(\frac{\varepsilon \, W e}{\eta_{\rm P}/\eta} \, tra\tau_{\rm P}\right) & \text{ $\widehat{}$ $$$

در تحقیق حاضر از فرم غیرخطی برای مدل رئولوژیکی فن تین-تنر استفاده شده است. همچنین ثابتهای ع و 🕹 پارامترهای کشش و تنظیم پذیر این مدل میباشند. همچنین پارامتر کشش ( $\varepsilon \ge 0$ )، میزان انعطاف پذیری سیال ویسکوالاستیک را نشان میدهد و پارامتر 🛃 نماینده نسبت اختلاف تنش نرمال دوم به اول میباشد. مقادیر این پارامترها از روی نتایج آزمایشگاهی بدست مىآيد. در صورتى كه مقدار اين پارامترها صفر و تابع تريس تانسور تنش دارای مقدار یک باشد، مدل الدروید- بی بدست میآید. در نتیجه مدل رئولوژیکی فن تین-تنر دارای رفتار رقیق شوندگی در لزجت برشی میباشد؛ در حاليكه لزجت برشى مدل الدرويد- بى ثابت مىباشد. آلوز و همکارانش [25] در تحقیق خود نشان دادند که هر چه مقادیر این پارامترهای کشش و تنظیم پذیر در مدل فن تین-تنر کوچک تر باشد با نتایج تجربی تطابق بهتری دارند. آنها در تحقیق خود، مقادیر پارامترهای کشش و تنظیم پذير را برابر باc = 0/02 و  $\varepsilon = 3$  وc = 0/02 گزارش کردند. اعداد بی بعد مورد استفاده در مطالعه حاضر، اعداد رینولدز و وایزنبرگ هستند که بصورت (8) تعريف مي گردند:

Re = 
$$\frac{\rho U_{\rm in} h}{r}$$
, We =  $\frac{\lambda U_{\rm in}}{h}$ 

که پارامترهایho، h،  $\lambda$  و  $h_{
m in}$  به ترتیب بیانگر چگالی، زمان رهایی از تنش،  $J_{
m in}$ ارتفاع بخش اول کانال و سرعت یکنواخت جریان در ورودی کانال میباشد. برای حل عددی این مسئله از الگوریتم پیزو با روش حجم محدود در داخل نرم افزار کد باز اپن فوم استفاده شده است. الگوریتم پیزو دارای دو مرحله تصحيح براى فشار است؛ در نتيجه از لحاظ همگرايي نسبت به الگوريتم هاي دیگر قویتر بوده و زمان همگرایی آن کمتر میباشد [26]. در روش حجم محدود، انتگرال هر متغیر در مرکز سلول با استفاده از روش دیورژانس گاوس بر روی سطح المان محاسبه می گردد. برای گسسته سازی ترم های لاپلاسین و دیورژانس متغیرها در مرکز سلول از روش اختلاف محدود مرکزی استفاده شده است که دقت آن از مرتبه دوم میباشد. ترم جابجایی معادلات با استفاده از روش اختلاف بالادست خطی، گسسته شده است و گسسته سازی ترم مشتق زمانی با روش کرنک نیکلسون میباشد.

برای محاسبه مقادیر متغیرها بر روی وجوه سلول (برای مرزها و ترم جابجایی) از درونیابی خطی بر روی مقادیر مرکز سلول ها استفاده گردیده است. دقت گسسته سازی تمام ترمهای معادلات از مرتبه دوم میباشد. با گسسته سازی معادلات حاکم بر مسئله، دستگاه معادلات خطی تشکیل می-گردد. این دستگاه معادلات با استفاده از روش گرادیان مزدوج برای اسکالر فشار و گرادیان غیر مزدوج پایدار برای مؤلفههای میدان سرعت و تانسور تنش حل می گردد. در ورودی کانال، مقدار مؤلفههای میدان سرعت و تانسور تنش ثابت و یکنواخت بوده و گرادیان فشار صفر میباشد. در حالیکه در خروجی کانال، گرادیان مؤلفه های میدان سرعت و تانسور تنش صفر بوده و مقدار فشار برابر فشار محيط است. بر روى ديواره كانال، به دليل شرط عدم لغزش، مقدار مؤلفه های سرعت صفر بوده و گرادیان فشار و مؤلفههای تانسور تنش برابر صفر میباشد. روند اجرای الگوریتم پیزو به صورت مختصر در شکل 2 آورده شده است.

برای بررسی استقلال حل عددی جریان سیال ویسکوالاستیک از شبکه محاسباتی، 3 نوع شبکه مختلف برای زاویه انبساط 30 درجه در نظر گرفته شده است.

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-03

283



	,		0			••••
NCtot	$\Delta y_{\text{min}}$	$\Delta x_{min}$	NC 3	NC 2	NC 1	شبكه
8340	0/0033	0/0075	6000	340	2000	M1
25360	0/0025	0/0050	18000	1360	6000	M2
43450	0/0020	0/0025	30000	3450	10000	M3

### 3 - استقلال حل از شبکه محاسباتی

نامگذاری این 3 نوع شبکه از حالت المان متوسط تا المان بسیار ریز به ترتیب M1، M2 و M3 میباشد. مشربندی این سه نوع شبکه برای زاویه انبساط 30 درجه در شکل 3 نشان داده شده و مشخصات کامل سه نوع شبکه در جدول 1 آورده شده است. همانطور که در شکل 4 مشاهده میشود، اختلاف سه شبکه با یکدیگر کم میباشد. ولی شبکه M1 به دلیل ریز نبودن المان، دارای اندکی خطا در بخش انبساطی میباشد، ولی شبکه 2M کاملاً منطبق بر شبکه M3 میباشد. از آنجایی که استفاده از شبکه بسیار ریز M3 برای مدلسازی جریان زیادی را به همراه دارد؛ در مطالعه حاضر از شبکه M2 برای مدلسازی جریان در داخل کانال با بخش انبساطی استفاده شده است.

# 4 - اعتبارسنجی نتایج حل عددی

همچنان که در مقدمه اشاره شد، هیچ مطالعه ای برای جریان سیال ویسکوالاستیک داخل انبساط تدریجی انجام نگرفته است و تحقیقات انجام شده تاکنون فقط برای جریان خزشی سیال ویسکوالاستیک در انبساط ناگهانی است.



-0.3 0.0 0.3 0.6 0.9 1.2 1.5 1.8 2.1 2.4 2.7 U/U<sub>in</sub>

**شکل** 5 مقایسه پروفیل سرعت جریان سیال نیوتنی در مقاطع عرضی مختلف کانال در **Re = 60.** برای نتایج مطالعه حاضر (a) و نتایج تحقیق فیرن و همکارانش [5] (b)

از آنجایی که تحقیقی برای جریان غیرخزشی سیال ویسکوالاستیک با مدل رئولوزیکی فن تین-تنر غیرخطی در انبساط ناگهانی 1:3 نیز وجود ندارد؛ برای اعتبار سنجی نتایج تحقیق حاضر، جریان سیال نیوتنی (We = 0) در انبساط ناگهانی 1:3 با تحقیقات گذشته مقایسه شده است. فیرن و همکارانش [5] با استفاده از روشهای تجربی و عددی، جریان سیال نیوتنی در کانال با انبساط ناگهانی را مورد بررسی قرار دادند. آنها توزیع سرعت جریان را برای سه سطح مقطع مختلف ترسیم نمودند. در تحقیق آنها، فاصله هر سطح مقطع از ابتدای بخش انبساطی کانال در نظر گرفته شده و با ارتفاع بخش اول کانال بیبعد شده است. همانطور که در شکل 5 مشاهده می گردد، فواصل این مقاطع عرضی از ابتدای بخش انبساطی کانال به ترتیب 1/25، 5 و 20 برابر ارتفاع بخش اول كانال مىباشد. با توجه به شكل 5، مطابقت خوبى (با بیشترین خطای مطلق 4/5 درصد) بین نتایج عددی مطالعه حاضر (a) و نتایج تجربی فیرن و همکارانش **[5] (b)** مشاهده می گردد. پس از اطمینان از صحت و درستی نتایج مدلسازی عددی، در ادامه طول گردابههای جریان سیال ویسکوالاستیک در کانال با انبساط تدریجی برای زوایای انبساطی مختلف بررسی و تشریح گردیده است.

# 5- بیان و تفسیر نتایج

هدف اصلی در این پژوهش، بررسی تأثیر زوایای انبساطی، اعداد رینولدز و وایزنبرگ بر طول گردابهها و مطالعه اعداد رینولدز و وایزنبرگ بحرانی می-باشد. از آنجایی که جریان غیر خزشی و سیال غیرنیوتنی پلیمری (با نسبت لزجت نیوتنی به پلیمری بسیار کم) می،اشد؛ اعداد رینولدز و وایزنبرگ

بحرانی اول و دوم برای جریان سیال ویسکوالاستیک مشاهده می گردد. مقدار بحرانی اول برای اعداد رینولدز و وایزنبرگ در حالتی تعریف می گردد که گردابهها از حالت متقارن تبدیل به حالت نامتقارن می گردند.

همچنین حالتی که دو گردابه نامتقارن تبدیل به سه گردابه نامتقارن می گردد، مقدار بحرانی دوم برای اعداد رینولدز و وایزنبرگ تعریف می شود. این تغییر حالت از متقارن به غیرمتقارن مربوط به تعادل بین نیروهای لزجت، اینرسی و الاستیک در بخش انبساطی کانال می باشد. در واقع خاصیت الاستیک سیال سبب ایجاد نوعی حافظه برای سیال ویسکوالاستیک می شود و سبب می گردد تغییر شکل ایجاد شده در المان سیال باقی بماند. همچنین به دلیل خاصیت الاستیک، سیال در مقابل تغییر شکل جدید ایجاد شده ناشی از اعمال نیروی تنش بر المان سیال مقاومت می کند.

همانطور که در شکل 6 مشاهده می گردد، برای اعداد رینولدز یا وایزنبرگ کوچک، اثرات جابجایی و اختلالات جریان سیال توسط اثرات لزجت و خاصیت الاستیک از بین می ود و گردابه ها متقارن می ماند. در مقدار بحرانی اول برای اعداد رینولدز و وایزنبرگ، حالت جدیدی از تعادل بین اثرات

لزجت، خاصیت الاستیک و نیروی اینرسی جریان ایجاد گردیده و گردابهها نامتقارن می شوند. با افزایش بیشتر عدد رینولدز یا وایزنبرگ (بعد از مقدار بحرانی اول)، جهت جریان به سمت یکی از دیوارهای کانال منحرف می گردد. بنابراین در مجاورت دیواره کانال، طول یکی از گردابهها کاهش و طول گردابه دیگر افزایش پیدا می کند. با زیاد شدن عدد رینولدز یا وایزنبرگ (بعد از مقدار بحرانی دوم)، اختلالات جریان سیال افزایش یافته و ایجاد حالت جدیدی از تعادل بین نیروی اینرسی، خاصیت الاستیک و لزجت منجر به شکل گیری اعداد وایزنبرگ و رینولدز، مشخصات گردابهها در جداول 2 و 3 آورده شده است. با توجه به شکل 1 در بخش مقدمه، گردابههای اول و دوم به ترتیب همان گردابه سوم می کوچکتر و بزرگتر بعد از حالت بحرانی اول می باشند و گردابه سوم بعد از حالت بحرانی دوم تشکیل می گردد.

همچنین در جداول 2 و 3، طول گردابههای اول، دوم و سوم با ارتفاع بخش اول کانال بی بعد شده است. در جدول 2، تأثیر زوایای انبساطی بر طول گردابهها، برای اعداد وایزنبرگ مختلف نشان داده شده است.



DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.15.7

( <b>Re</b> = 60)	انبساطی مختلف (	وایزنبرگ و زوایای ا	تدريجي براي اعداد	کوالاستیک در انبساط	جريان سيال ويسك	<b>جدول 2</b> طول گردابههای
-------------------	-----------------	---------------------	-------------------	---------------------	-----------------	-----------------------------

	$\theta = 60^{\circ}$			$\theta = 45^{\circ}$			$\theta = 30^{\circ}$		زاويه انبساط
$LV_2/h$	LV <sub>3</sub> /h	$LV_1/h$	LV <sub>2</sub> /h	LV <sub>3</sub> /h	$LV_1/h$	LV <sub>2</sub> /h	LV <sub>3</sub> /h	$LV_1/h$	We
4/662	0	4/728	4/554	0	4/554	4/405	0	4/405	0/1
4/500	0	4/500	4/237	0	4/237	4/104	0	4/104	0/5
4/566	0	4/631	4/300	0	4/300	4/045	0	4/045	1
5/963	0	4/795	5/075	0	5/075	4/836	0	4/774	2
7/362	0	3/951	6/952	0	4/427	6/472	0	5/151	3
8/298	0	3/762	8/159	0	3/803	8/121	0	4/104	4
9/195	0	3/762	9/032	0	3/742	9/118	0	3/840	5
11/75	0	3/762	11/881	0	3/803	12/24	0	3/899	10
12/03	1/933	3/762	12/16	0/639	3/803	12/51	0	3/899	11
12/41	4/139	3/762	12/72	3/720	3/803	13/16	3/297	3/958	14
12/60	4/969	3/762	12/91	4/637	3/864	13/45	4/295	3/958	16
12/79	5/738	3/762	13/11	5/393	3/864	13/64	5/141	3/958	19
12/79	5/869	3/762	13/11	5/608	3/864	13/73	5/353	3/958	20
12/98	8/474	3/762	13/30	8/291	3/803	13/83	8/110	3/986	50
12/98	9/027	3/762	13/20	8/924	3/803	13/83	8/823	3/986	75
12/98	9/273	3/762	13/20	9/169	3/742	13/73	9/065	3/986	100

عتلف ( <b>e = 1</b> 0	نبساطی مخ	ز و زوایای ا	اعداد رينولد	ريجي براي	انبساط تدر	الاستیک در	ميال ويسكو	ی جریان س	, 3 طول گردابهها
	$\theta = 60^{\circ}$			$\theta = 45^{\circ}$			$\theta = 30^{\circ}$		زاويه انبساط
$LV_2/h$	$LV_3/h$	$LV_1/h$	$LV_2/h$	LV <sub>3</sub> /h	$LV_1/h$	$LV_2/h$	$LV_3/h$	$LV_1/h$	Re
1/224	0	1/277	0/259	0	0/259	0	0	0	10
2/672	0	2/672	2/129	0	2/129	1/345	0	1/345	15
3/825	0	3/699	3/428	0	3/428	2/703	0	2/703	19
4/142	0	3/825	3/742	0	3/609	3/0292	0	2/972	20
6/835	0	4/787	6/590	0	4/943	5/912	0	5/408	30
8/946	0	3/762	8/871	0	3/803	8/875	0	4/077	40
11/75	0	3/762	11/881	0	3/803	12/24	0	3/899	60
11/75	0/919	3/762	11/97	0	3/803	12/42	0	3/899	61
11/84	1/762	3/762	12/158	0/642	3/803	12/88	0	3/899	63
12/21	2/789	3/762	12/44	1/577	3/803	12/88	0/365	3/899	65
12/69	4/084	3/825	13/11	3/560	3/803	13/45	2/533	3/986	70
13/48	3/848	3/888	13/69	4/690	3/864	14/32	5/152	4/045	80
14/49	8/121	3/888	14/80	8/424	3/864	15/63	8/180	4/045	100

همانطور که در جدول 2 مشاهده می گردد، طول گردابههای متقارن تا قبل از عدد وایزنبرگ یک (**We = 1**) برای تمام زوایای انبساطی کاهش پیدا می کند. زیرا تأثیر خاصیت الاستیک بسیار کم است. با افزایش تأثیر خاصیت الاستیک و ایجاد حالت جدیدی از تعادل، طول گردابهها تا بعد از عدد وایزنبرگ بحرانی دوم افزایش می ابد. زیرا افزایش خاصیت الاستیک و لزجت بر نیروی اینرسی غلبه می کند. البته بیشترین تغییرات طول برای گردابههای اول و دوم از اعداد وایزنبرگ یک تا عدد وایزنبرگ بحرانی دوم می باشد.

بعد از عدد وایزنبرگ بحرانی دوم، تغییرات طول گردابههای اول و دوم با افزایش اندازه زاویه انبساط بیشتر می گردد. همچنین با افزایش خاصیت الاستیک بعد از مقدار بحرانی دوم برای عدد وایزنبرگ، طول گردابه سوم افزایش مییابد. ولی روند تغییرات طول گردابه سوم در اعداد وایزنبرگ بزرگ کم می اشد. با زیاد شدن مقدار زاویه انبساط نیز طول گردابه سوم و روند تغییرات آن بیشتر می گردد.

جدول 3، تأثیر زوایای انبساطی بر طول گردابهها را برای اعداد رینولدز مختلف نشان میدهد. با توجه به جدول 3، ابتدا با زیاد شدن سرعت جریان،

انرژی جریان افزایش مییابد. انتقال انرژی به گردابهها، منجر به افزایش طول گردابهها تا قبل از عدد رینولدز بحرانی اول می گردد. با افزایش زاویه انبساط طول گردابهها بزرگتر می گردد، ولی روند رشد طول گردابهها با عدد رینولدز کاهش مییابد. بعد از عدد رینولدز بحرانی اول، با انحراف جریان به سمت دیوار پایین، نیروی جابجایی سیال بر لزجت غالب شده و طول گردابه در مجاورت دیوار پایین کاهش می یابد.

در حالیکه برای گردابه در مجاورت دیوار بالا، نیروی لزجت غالب بوده و طول آن افزایش مییابد. بعد از عدد رینولدز بحرانی اول، طول گردابه در مجاورت دیوار پایین به دلیل خاصیت الاستیک ابتدا کمی افزایش و سپس کاهش مییابد. با زیاد شدن اندازه زاویه انبساط، طول گردابهها و روند رشد آنها با عدد رینولدز کاهش مییابد. بعد از عدد رینولدز بحرانی دوم، جریان به سمت دیوار بالا تغییر مسیر میدهد. به دلیل غلبه خاصیت لزجت بر نیروی اینرسی در مجاورت دیوار پایین گردابه سوم تشکیل میشود و با افزایش انرژی جنشی جریان، طول هر سه گردابه بیشتر می گردد. ولی به خاطر خنثی شدن نیروی اینرسی با خاصیت لزجت و الاستیک، افزایش طول گردابه اول در مجاورت دیوار پایین بسیار کم میباشد.



**شکل 8** طول گردابههای اول، دوم و سوم در اعداد رینولدز مختلف برای زوایای انبساط متفاوت (We = 10)

جدول 4 مقادیر بحرانی اول و دوم برای اعداد رینولدز و وایزنبرگ در زوایای انبساطی مختلف

مقدار بحراني	$\theta = 60^{\circ}  \theta = 45^{\circ}  \theta = 30^{\circ}$	مشخصه جريان
Re <sub>Cr1</sub>	18 19 19	wa - 10
Re <sub>Cr2</sub>	60 62 64	<b>we</b> = 10
We <sub>Cr1</sub>	1 2 1	- (0
We <sub>Cr2</sub>	10 10 11	<b>Re =</b> 00

با افزایش اینرسی جریان، طول گردابهها افزایش مییابد ولی نرخ تغییرات آنها کمتر میگردد؛ که این به دلیل غلبه نیروی جابجایی بر خاصیت لزجت میباشد. طول گردابههای اول و دوم در زاویه انبساط 45 درجه برای اعداد رینولدز کوچک دارای کمترین مقدار است در حالیکه برای اعداد رینولدز بزرگ عکس آن برقرار میباشد (با توجه به شکل 8).

با بکارگیری رگرسیون غیرخطی برای طول گردابههای دوم و سوم در زوایای انبساطی مختلف، معادلاتی بر حسب اعداد رینولدز (در عدد وایزنبرگ ثابت 10) و اعداد وایزنبرگ (در عدد رینولدز ثابت 60) محاسبه گردیده و در روابط (12-9) ذکر شده است.



**شکل 7** طول گردابههای اول، دوم و سوم در اعداد وایزنبرگ مختلف برای زوایای انبساطی متفاوت (RE= **60)** 

با زیاد شدن عدد رینولدز، طول گردابهها و روند تغییرات آنها با مقدار زاویه انبساط بصورت یکنواخت نیست. بلکه با افزایش اندازه زاویه انبساط، طول گردابهها ابتدا کاهش و سپس افزایش مییابد.

در شکلهای 7 و 8 روند تغییرات طول گردابهها با اعداد رینولدز و وایزنبرگ در زوایای انبساطی مختلف به صورت نمودار نمایش داده شده است. همچنین با استفاده از رگرسیون غیرخطی، معادلاتی برای انطباق بر طول گردابههای دوم و سوم در زوایای انبساطی مختلف محاسبه و ترسیم شده است. همانطور که در شکل 7 مشاهده می گردد، افزایش خاصیت الاستیک، منجر به افزایش مقاومت سیال پلیمری در برابر تغییر شکل می گردد؛ به همین خاطر، با افزایش عدد وایزنبرگ شیب تغییرات طول گردابهها کمتر می گردد.

همچنین در اعداد وایزنبرگ بسیار زیاد، با تجمع تغییر شکلها در سیال ویسکوالاستیک پایداری جریان افزایش یافته و تغییر طول گردابهها بسیار کم میباشد. هنگامی که سطح مقطع با تغییرات ملایم تر (زاویه انبساط کوچکتر) افزایش مییابد، مقاومت سطح در برابر اثر جابجایی جریان بالادست بیشتر شده و طول گردابهها افزایش مییابد. به همین دلیل در زوایای انبساطی کوچکتر، طول گردابههای اول و دوم بیشتر میباشد.

287



شكل 9 پروفيل سرعت جريان سيال ويسكوالاستيك در مقاطع عرضي و اعداد رينولدز مختلف براي زاويه انبساط 60 درجه (we = 10)

این معادلات برای جریان سیال پلیمری در کانال صفحهای با انبساط تدریجی 1:3 میباشد. با استفاده از این معادلات و معلوم بودن مقادیر اعداد رینولدز و وایزنبرگ، میتوان طول گردابههای دوم و سوم را برای جریان سیال پلیمری در کانال صفحهای با سطح مقطع متغیر محاسبه نمود. در جدول 4، تأثیر اندازه زاویه انبساط بر اعداد رینولدز و وایزنبرگ بحرانی نشان داده شده است.

$LV_2$ (We = 10) = $-19.13 \times \exp(-0.024 \times \text{Re}) + 16.11$	(9)
$LV_3$ (We = 10) = -75.01 × exp(-0.030 × Re) +11.90, Re $\geq$ 60	(10)
$LV_2$ (Re = 60) = 3.304 × (1 – exp( $-5789 \times We$ )) +10.13 × (1 – exp( $-0.164 \times We$ ))	(11)
$LV_3$ (Re = 60) = -478.6 × exp(-0.455 × We) +9.242 - 8.842 × exp(-0.045 × We) , We $\ge 1$	(12)
که قبلاً نیز اشاره گردید، به دلیل زیاد بودن نیروی اینرسی و	همانطور '
استیک جریان سیال پلیمری، دو مقدار بحرانی برای اعداد رینولدز	خاصيت الا
مشاهده می گردد. همانطور که در جدول 4 مشاهده می شود، روند	و وايزنبرگ

تغییرات عدد رینولدز بحرانی اول بعد از زاویه 45 درجه کاهش مییابد. از

آنجایی که نیروی جابجایی جریان در عدد رینولدز بحرانی اول کم است؛ تأثیر مقدار زاویه انبساط ابتدا ناچیز است ولی سپس زیاد می گردد. ولی روند تغییرات عدد رینولدز بحرانی دوم در تمام زوایای انبساطی نزولی است و این به دلیل اینرسی زیاد جریان میباشد. با افزایش اندازه زاویه انبساط، طول بخش انبساطی کاهش یافته و اختلالات جریان افزایش میباد. با کم شدن اثر لزجت و خنثی شدن آن با نیروی اینرسی، حالت جدیدی از تعادل برای تشکیل گردابههای نامتقارن و گردابه سوم ایجاد می گردد.

همچنین در زوایای انبساطی بزرگتر، این حالت تعادلی جدید در اعداد رینولدز کوچکتر اتفاق میافتد. همانطور که قبلاً اشاره گردید، افزایش خاصیت الاستیک، منجر به ایجاد نوعی حافظه برای سیال پلیمری میشود که منجر به افزایش مقاومت سیال پلیمری در برابر تغییر شکل میگردد. به همین خاطر برای اعداد وایزنبرگ بحرانی دوم، که خاصیت الاستیک زیاد است؛ تأثیر زوایای انبساطی بزرگ بر اعداد وایزنبرگ بحرانی دوم ناچیز می-باشد. در حالیکه مقدار عدد وایزنبرگ بحرانی اول با زیاد شدن خاصیت الاستیک، ابتدا افزایش و سپس کاهش مییابد.



شکل 10 توزیع سرعت جریان سیال ویسکوالاستیک بر روی خط مرکزی کانال برای اعداد وایزنبرگ و زوایای انبساطی مختلف (**Re = 60)** 

در شکل 9، تأثیر نیروی اینرسی بر توزیع سرعت در مقاطع عرضی مختلف کانال مورد بررسی قرار گرفته است. برای تعیین محل این مقاطع عرضی، ابتدا و انتهای بخش انبساطی در نظر گرفته شده و با ارتفاع بخش اول کانال بی بعد شده است. نامگذاری این مقاطع عرضی به ترتیب A، B، C، B، J و F میباشد. مقاطع عرضی B و C به ترتیب ابتدا و انتهای بخش انبساطی است. فاصله مقطع عرضی A از ابتدای بخش انبساطی 10 برابر ارتفاع بخش اول کانال (در جهت منفی محور افقی مختصات) میباشد. فاصله مقاطع عرضی C، B و F از انتهای بخش انبساطی، به ترتیب 10، 00 و 50 برابر ارتفاع بخش اول کانال (در جهت مثبت محور افقی مختصات) میباشد.

مقاطع عرضی A و F پروفیل سرعت جریان توسعه یافته در بخش اول و سوم کانال را نشان میدهند. همانطور که مشاهده میشود، بیشترین مقدار سرعت در حالت توسعه یافته به عدد رینولدز وابسته نمیباشد. البته نیروی اینرسی جریان بر انحنای پروفیل سرعت حالت توسعه یافته در نزدیک دیوارهای کانال مؤثر میباشد. به گونهای که پروفیل سرعت در بخش اول کانال برای اعداد رینولدز کم با شیب بیشتری تغییر میکند. همچنین در اعداد رینولدز کوچک که گردابههای متقارن تشکیل میگردد، پروفیل سرعت

مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1394، دورہ 15، شمارہ 4

متقارن میباشد. بیشترین تغییرات پروفیل سرعت با عدد رینولدز در ابتدای بخش سوم کانال (مقطع عرضی D) مشاهده می گردد. زیرا افزایش اینرسی جریان و تشکیل گردابههای نامتقارن سبب می گردد که پروفیل سرعت در مجاورت دیوار بالایی کانال دارای مقدار منفی باشد و بیشترین مقدار سرعت (شکم پروفیل سرعت) به سمت دیواره پایینی کانال منحرف می گردد.

در شکل 10، حالت توسعه یافته برای پروفیل سرعت جریان سیال ویسکوالاستیک در بخشهای اول و سوم کانال برای زوایای انبساطی مختلف مشاهده می گردد. همچنین بیشترین مقدار سرعت در حالت توسعه یافته به عدد وایزنبرگ وابسته می باشد. با افزایش خاصیت الاستیک سیال، پایداری جریان افزایش یافته و بیشترین مقدارسرعت در حالت توسعه یافته به مقدار سیال نیوتنی نزدیکتر می گردد.

با افزایش عدد وایزنبرگ، مقدار کاهش سرعت در بخش انبساطی و افزایش سرعت در بخش سوم کانال بیشتر می شود . با غلبه خاصیتهای لزجت و الاستیک بر نیروی اینرسی، طول و ارتفاع گردابهها افزایش و انرژی جنبشی سیال کاهش می یابد. تغییر سطح مقطع سیال منجر به کاهش ناگهانی سرعت و تغییر شکل المان سیال می گردد. از آنجایی که سیال دارای خاصیت الاستیک می باشد، این تغییر شکل در داخل سیال ماندگار می شود و طول توسعه یافته برای پروفیل سرعت جریان بیشتر می گردد. همچنین تأثیر اندازه زاویه انبساط روی روند تغییرات توزیع سرعت بر روی خط مرکزی کانال بسیار کم می باشد.

# 6- جمع بندي نتايج

در این مطالعه، جریان سیال ویسکوالاستیک که لزجت پلیمری آن بسیار بزرگتر از لزجت نیوتنی میباشد؛ با استفاده از مدل رئولوژیکی فن تین-تنر غیرخطی مورد مطالعه قرار گرفته است. جریان سیال پلیمری داخل کانال صفحهای با انبساط تدریجی 1:3 میباشد. برای مدلسازی انبساط تدریجی کانال، سه زاویه انبساط 30، 45 و 60 درجه در نظر گرفته شده است. همچنین تأثیر نیروی اینرسی و خاصیت الاستیک بر طول گردابههای متقارن و نامتقارن در زوایای انبساطی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج حاصل از این بررسی عبارتند از:

1- بیشترین مقدار سرعت در حالت توسعه یافته، وابسته به عدد وایزنبرگ و مستقل از عدد رینولدز می باشد.

2- قبل از عدد رینولدز بحرانی دوم، با افزایش اندازه زاویه انبساط طول گردابهها بزرگتر می گردد، ولی نرخ رشد طول گردابهها با عدد رینولدز کاهش می یابد.

3- با زیاد شدن سرعت جریان بعد از عدد رینولدز بحرانی دوم، طول گردابهها و روند تغییرات آنها با مقدار زاویه انبساط بصورت یکنواخت نیست؛ بلکه با زیاد شدن اندازه زاویه انبساط، طول گردابهها ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد.

4- طول گردابههای متقارن تا قبل از عدد وایزنبرگ یک برای تمام زوایای انبساط کاهش پیدا می *ک*ند.

5- با افزایش خاصیت الاستیک، طول توسعه یافته برای پروفیل سرعت جریان زیاد می گردد. در اعداد وایزنبرگ بسیار بزرگ، بیشتر شدن خاصیت الاستیک دیگر بر روند تغییرات سرعت مؤثر نمی، اشد.

6- بیشترین تغییرات طول برای گردابههای اول و دوم از عدد وایزنبرگ یک تا عدد وایزنبرگ بحرانی دوم است. همچنین بعد از عدد وایزنبرگ بحرانی دوم، تغییرات طول گردابههای اول و دوم با افزایش اندازه زاویه انبساط بیشتر می شود.

289

7- بعد از مقدار بحرانی دوم برای عدد وایزنبرگ، طول گردابه سوم افزایش می یابد؛ ولی روند تغییرات آن در اعداد وایزنبرگ بزرگ کمتر می گردد. همچنین با زیاد شدن مقدار زاویه انبساط، طول گردابه سوم و روند تغییرات آن بیشتر می گردد.

8- تأثیر زوایای انبساطی بزرگ بر اعداد وایزنبرگ بحرانی دوم ناچیز میباشد، در حالیکه مقدار عدد وایزنبرگ بحرانی اول با زیاد شدن خاصیت الاستیک ابتدا افزایش و سیس کاهش می یابد.

9- در اعداد وایزنبرگ بزرگ، تأثیر خاصیت الاستیک و اندازه زاویه انبساط بر تغییرات طول گردابههای جریان کم است.

# 7- فهرست علائم

تانسور نرخ تغییر شکل (s<sup>-1</sup>) d نسبت انبساط كانال FR ارتفاع بخش اول كانال (m) h ارتفاع بخش سوم كانال (m) Н طول بخش اول كانال (m)  $L_1$ طول بخش دوم کانال (m) 12 طول بخش سوم كانال (m) L3 طول گردابه کوچکتر نامتقارن (m)  $LV_1$ طول گردابه بزرگتر نامتقارن (m)  $LV_2$ طول گردابه سوم(m) 11/2 شبكه بندى متوسط M1 شبکه بندی ریز M2 شبکه بندی بسیار ریز M3 تعداد سلولهای شبکه NC تعداد سلولهای شبکه بخش اول کانال NC1 تعداد سلول های شبکه بخش دوم کانال NC2 تعداد سلول های شبکه بخش سوم کانال NC3 فشار (kgm<sup>-1</sup>s<sup>-2</sup> p عدد رينولدز Re مقطع عرضي كانال Sec ; مان (s) t بردار سرعت (ms<sup>-1</sup>) и سرعت يكنواخت (ms<sup>-1</sup>) U عدد وايزنبرگ We محورهای مختصات کارتزین (m) х, у علايم يوناني طول سلول شبکه بندی (m) Λχ عرض سلول شبکه بندی (m)  $\Delta y$ پارامتر بی بعد کشش مدل رئولوژیکی فن تین-تنر ε لزجت (kgm<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>) η () زاویه انبساط θ زمان رهایی از تنش (s) λ نصف عرض كانال بالادست λ

- پارامتر بی بعد تنظیم پذیر مدل رئولوژیکی فن تین-تنر ξ
  - چگالی (kgm-3) ρ

تانسور تنش (kgm<sup>-1</sup>s<sup>-2</sup> τ

# بالانويسها

- توان مدل قانون تواني
- علامت درجه برای زاویه انبساط

# زيرنويسها

CL	خط مرکزی کانال
Cr1	حالت بحراني اول
Cr2	حالت بحرانی دوم
in	ورودى كانال
min	كمترين مقدار
Ν	نوع سيال نيوتني
Р	نوع سيال پليمري
tot	کل شبکه

#### 8- مراجع

- [1] T. K. Hung, E. O. Macagno, Laminar eddies in a two-dimensional conduit expansion, La Houille Blanche, Vol. 21, pp. 391–401, 1966.
- [2] F. Durst, A. Melling, J. H. Whitelaw, Low Reynolds number flow over a plane symmetric sudden expansion, J. Fluid Mechanic, Vol. 64, pp. 111-128.1974.
- [3] W. Cherdron, F. Durst, J. H. Whitelaw, Asymmetric flows and instabilities in symmetric ducts with sudden expansions, J. Fluid Mechanic, Vol. 84, pp. 13-31, 1978.
- [4] E. O. Macagno, T. K. Hung, Computational and experimental study of a captive annular eddy, J. Fluid Mechanic, Vol. 28, pp. 43-64, 1967.
- [5] R. M. Fearn, T. Mullin, K. A. Cliffe, Nonlinear phenomena in a symmetric sudden expansion, J. Fluid Mechanic, Vol. 211, pp. 595-608, 1990.
- [6] A. Acrivos, M. L. Schrader, Steady flow in a sudden expansion at high Reynoldsnumber, J. Phys. Fluids, Vol. 25, pp. 923-930, 1982.
- [7] F. S. Milos, A. Acrivos, J. Kim, Steady flow past sudden expansion at large Reynolds number-II. Navier-Stokes solutions for the cascade expansion, J. Phys. Fluids, Vol. 30, pp. 7-18, 1987.
- [8] M. M. Shahmardan, M. Norouzi, A. S. Zahiri, instability investigation of Newtonian flow in a planar gradual expansion, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 28-36, 2013. (In Persian)
- [9] R. Manica, A. L. De Bortoli, Simulation of sudden expansion flows for power-lawfluids, *J. Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 121, pp. 35–40, 2004.
- [10] P. Neofytou, Transition to asymmetry of generalised Newtonian fluid flowsthrough a symmetric sudden expansion, J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 133, pp. 132-140, 2006.
- [11] S. Dhinakaran, M. S. N. Oliveira, F. T. Pinho, M. A. Alves, Steady flow of power-law fluids in a 1:3 planar sudden expansion, J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 198, pp. 48–58, 2013.
- [12] P. Towsend, K. Walters, Expansion flows of non-Newtonian liquids, Chem. Eng. Science, Vol. 49, pp. 749–763, 1994
- [13] A. Baloch, P. Townsend, M. F. Webster, Onvortexdevelopment in viscoelastic expansion and contraction lows, J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 65, pp. 133-149, 1996.
- [14] M. S. Darwish, J. R. Whiteman, M. J. Bevis, Numerical modelling of viscoelastic liquids using finite-volumemethod, J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 45, No. 3, pp. 311-337, 1992.
- [15] K. A. Missirlis, D. Assimacopoulos, E. Mitsoulis, A finite volume approach in the simulation of viscoelastic expansion lows, J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol.78, No. 2-3, pp. 91-118, 1998.
- [16] R. J. Poole, M. A. Alves, P. J. Oliveira, F. T. Pinho, Plane sudden expansion flows ofviscoelastic liquids, J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 146, pp. 79-91, 2007.
- [17] R.J. Poole, F.T. Pinho, M.A. Alves, P.J. Oliveira, The effect of expansion ratio forcreeping expansion flows of UCM fluids, J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 163, pp. 35-44, 2009.
- [18] P. J. Oliveira, Asymmetric flows of viscoelastic fluids in symmetric planarexpansion geometries, J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 114, pp. 33-63, 2003
- [19] G. N. Rocha, R. J. Poole, P. J. Oliveira, Bifurcation phenomema in viscoelastic flows through a symmetric 1:4 expansion, J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 141, pp. 1-17, 2007.

DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.15.7

- [23] N. Phan-Thien, R. I. Tanner, A new constitutive equation derived from networktheory, J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 2, pp. 353–365, 1977.
- [24] N. Phan-Thien, A non-linear network viscoelastic model, J. Rheology, Vol. 22, pp. 259–283, 1978.
- [25] M. Alves, F. Pinho, P. Oliveira, Viscoelastic flow in a 3D square.square contraction: visualizations and simulations, *J. Rheology*, Vol. 52 pp. 1347-1368, 2008.
- [26] H. K. Versteeg, W. Malalasekera, An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method, 2<sup>ed</sup>, Pearson Education, 2007.
- [20] Z. Y. Zheng, F. C. Li, J. C. Yang, Modeling asymmetric flow of viscoelastic fluid in symmetric planar sudden expansion geometry based on userdefined function in Fluent CFD package. *Advances in Mechanical* Engineering, Vol. 2013, pp. 1-13, 2013.
- [21] M. Azizi, S. A. Ahmad Ramazani, M. Habib Etemadi, S. Ehsan Shirzaei, Simulation of viscoelastic fluid flows in expansion geometry using finite volume approach, *Chinese Journal of Polymer Science*, Vol. 31, No. 12, pp. 1599-1612, 2013. (In English)
- [22] R. B. Bird, R. C. Armstrong, O. Hassager, Dynamics of polymeric liquids. Vol. 1: Fluid mechanics, Wiley, 1987.