



بررسی اثر سیال غیرنیوتنی در جریان غیرماندگار در سیستم لوله‌ها

احمد احمدی^۱، علی مجد^{۲*} و محمود نوروزی^۳^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۹۳/۰۶/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۲۳

چکیده

تغییر ناگهانی دبی در سیستم لوله‌ها منجر به نوسانات فشار می‌گردد که به عنوان ضربه کوچ شناخته می‌شود. در این مقاله به بررسی جریان غیرماندگار ناشی از بستن سریع شیر در یک سیستم شیر، لوله، مخزن پرداخته شده است. فرضیه اساسی به کار گرفته شده آن است که سیال موجود در سیستم، سیالی با ویژگی‌های غیرنیوتنی است. در ابتدا با اعمال این فرض معادلات حاکم استخراج خواهند شد. در ادامه با استفاده از روش‌های عددی نتایج معادلات حاکم برای سیال غیرنیوتنی بدست آورده شده‌اند. برای محاسبه عبارت‌های زمانی از رانج کوتای مرتبه چهارم و جهت تقریب ترم‌های مکانی از تفاضل مرکزی مرتبه دوم استفاده شده است. برای حصول اطمینان از صحت الگوریتم حل نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. جهت مدل سازی سیال غیرنیوتنی مدل کراس به کار برده شده است. نتایج حاصل از مدل سازی سیال غیرنیوتنی نشان دهنده تغییراتی قابل توجه در مقادیر فشار و پروفیل سرعت می‌باشد. تاریخچه تغییرات فشار نشان دهنده کاهش افت و اثر لاین پکینگ بوده. همچنین نمودارهای لزجت و تنش برشی در مقطع لوله نشان داده شده‌اند و در ادامه مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

کلمات کلیدی: جریان غیرماندگار؛ شبکه لوله؛ سیال غیرنیوتنی؛ مدل کراس؛ پروفیل سرعت

Investigation of Non Newtonian fluid effects in unsteady flow of pipe system

Ahmad Ahmadi¹, Ali Majd^{2,*}, Mahmood Norouzi³¹ Assoc. Prof., Civil Eng. Dept., Shahrood Univ., Shahrood, Iran² Ph.D. Student, Civil Eng. Dept., Shahrood Univ., Shahrood, Iran³ Assistant Prof., Mech. Eng. Dept., Shahrood Univ., Shahrood, Iran

Abstract

Sudden change in discharge brings about significant pressure oscillations in a piping system which is known as waterhammer. Unsteady flow of a non-Newtonian fluid due to instantaneous valve closure is studied. The Cross model is used to model non-Newtonian effects. Firstly, the appropriate governing equations are derived and then, they are solved by a numerical approach. A fourth-order Runge-Kutta scheme is used for time integration and a central difference scheme is employed for spatial derivatives discretization. To verify the proposed mathematical model and numerical solution, a comparison with corresponding experimental results are made. The results reveal a remarkable deviation in pressure history and velocity profile with respect to conventional waterhammer models in Newtonian fluids. The significance of the fluid behavior is manifested in drag reduction and line packing effect observed in the pressure history results. A detailed discussion regarding the fluid viscosity and its shear-stress diagrams are also included.

Keywords: Unsteady flow; Pipe system; Non Newtonian fluid; Cross model; Velocity profile

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۶۱۱۴۸۶۴۰

آدرس پست الکترونیک: majd_2800@yahoo.com

۱- مقدمه

جریان‌های سیال غیرنیوتنی در بسیار از موارد طبیعی و کاربردهای صنعتی به کار رفته‌اند، از جمله این کاربردها می‌توان به خطوط انتقال محصولات صنعتی، فرآیندهای پلیمری و در بسیاری از کاربردهای بیولوژیکی مانند جریان خون در بدن و برخی از دستگاه‌ها مانند قلب مصنوعی اشاره نمود. موضوع مورد مطالعه از سه منظر کلی قابل بررسی است. نگاه اول در تفکیک جریان آرام و آشفته، دوم جریان ماندگار و غیرماندگار و سوم در تفاوت سیال نیوتنی و سیال غیرنیوتنی می‌باشد.

در بیشتر جریان‌های غیرنیوتنی به علت بالا بودن لزجت موثر رژیم جریان لایه‌ای می‌باشد، که با مشخص بودن رئولوژی جریان می‌توانیم شبیه سازی عددی قابل اطمینانی از مسئله داشته باشیم. اما چنانچه جریان در محدوده انتقالی و یا آشفته قرار داشته باشد در زمینه‌های حل عددی و روابط حاکم همچنان نیاز به پیشرفت‌های قابل توجه‌ای می‌باشد. به عنوان مثال با توجه به سیال غیرنیوتنی مورد نظر و الگوی جریان مورد بررسی روش‌های متفاوتی برای میانگین‌گیری از معادلات ناویر استوکس وجود خواهد داشت. همچنین مرتبه و اهمیت عبارات به کار رفته در معادلات در هر مورد می‌بایست به صورت جداگانه بررسی شود. از جمله بررسی‌های انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعات پینهو اشاره نمود [۱، ۲]، که روابط و معادلات جریان آشفته را برای سیالات نیوتنی تعمیم یافته بسط داده است. و بزرگی مرتبه عبارات‌های بدست آمده را با یکدیگر مقایسه نموده است. از دیگر موارد قابل توجه بررسی جریان سیال غیرنیوتنی در لوله‌ها و اندازه‌گیری سرعت متوسط جریان در جریان‌های کاملاً توسعه یافته است که در این مورد سیال با چهار محلول رقیق پلیمری در محدوده اعداد رینولدز ۲۴۰ تا ۱۱۱۰۰۰ بررسی شده و اثرات کاهش درگ در نتیجه افزایش اثر غیرنیوتنی مشاهده شده است [۳].

چنانچه سیالات غیرنیوتنی از دیدگاه جریان غیرماندگار مورد توجه قرار بگیرند، خود جنبه‌های مختلفی را شامل می‌شود. به عنوان نمونه می‌توان به بررسی جریان خون در رگ‌ها اشاره نمود که جریانی نوسانی و در برخی موارد غیرماندگار می‌باشد. در این خصوص می‌توان به مطالعات مویر و همکاران [۴-۶] اشاره نمود که مدل‌های مختلف سیال

غیرنیوتنی را برای حالت‌های مختلف جریان در یک رگ بررسی کرده‌اند. در زمینه جریانات تناوبی در لوله‌ها، با مدل‌های مختلف سیال غیرنیوتنی، مانند سیالات ویسکوالاستیک، وابسته زمانی و انواع مدل‌های دیگر تحقیقات بسیاری صورت گرفته که می‌توان به مطالعه واردی و همکاران پیرامون جریان لایه‌ای با لزجت وابسته زمانی اشاره کرد که تحلیلی ریاضی از جریان با سیال وابسته زمانی تحت اثر بار ثابت و خطی انجام داده‌اند [۷]. از دیگر زمینه‌های جریان غیرماندگار بررسی پروفیل سرعت در لوله برای جریان لایه‌ای و آشفته با سیال نیوتنی است که توسط ریاسی و همکاران انجام شده است [۸].

در دیدگاه سوم، پیرامون سیال غیرنیوتنی به خصوص سیالات نیوتنی تعمیم یافته تحقیقات فراوانی از سال ۱۹۴۸ انجام شده است، اولین مطالعه توسط توماس [۹] که به وجود کاهش درگ در سیالات غیرنیوتنی پی‌برد قابل توجه می‌باشد. این تحقیق در اولین کنفرانس رئولوژی ارائه شده است. در ادامه مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی ریاضی و عددی بسیاری در مورد جریان سیال غیرنیوتنی در لوله‌ها انجام شده است. از آن جمله مطالعه اولیویرا و همکاران است که انتقال فشار در یک لوله با انتهای بسته حاوی سیال بینگهام را به صورت تحلیلی بررسی کرده‌اند [۱۰].

در این مقاله به بررسی جریان غیرماندگار لایه‌ای حاوی سیال غیرنیوتنی پرداخته می‌شود. مسئله مورد بررسی یک سیستم شیر - لوله - مخزن می‌باشد، که در اثر بسته شدن شیر انتهای لوله، مقادیر فشار و سرعت در طول لوله دچار نوسان می‌گردند (پدیده ضربه قوچ). سیال به کار رفته از جنس سیال شبه پلاستیک^۱ می‌باشد. در مقاله حاضر ابتدا معادلات جریان غیرماندگار به نحوی بدست آمده‌اند که در مورد سیالات غیرنیوتنی صادق باشند. سپس روابط سیال غیرنیوتنی بررسی شده‌اند. در ادامه روش عددی برای حل معادلات شرح داده شده است و برای صحت روش عددی نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. در انتها به بررسی و تحلیل نتایج جریان غیرماندگار با سیال غیرنیوتنی پرداخته شده است.

¹ Shear thinning or pseudoplastic

در رابطه فوق c سرعت سیال است. با انتگرال گیری روی سطح مقطع لوله ($Q = \int v_z dA$) و حذف عبارات همرفتی رابطه زیر بدست خواهد آمد

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial z} = 0 \quad (۶)$$

و رابطه ممنتوم در راستای محوری به شکل زیر خواهد بود

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} = -g \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{1}{r\rho} \frac{\partial r\tau}{\partial r} \quad (۷)$$

که فرم ساده شده آن به صورت زیر می‌باشد

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{1}{r\rho} \frac{\partial r\tau}{\partial r} \quad (۸)$$

چنانچه در سمت راست این رابطه مشاهده می‌شود عبارت تنش برشی باقیمانده می‌بایست از روابط سیال محاسبه گردد. برای بدست آوردن معادلات فوق تا این قسمت فرضی برای نوع سیال نشده است در نتیجه معادلات فوق برای جریان غیرماندگار در لوله برای هر نوع سیالی صادق خواهند بود.

۳- معادلات حاکم بر سیال غیر نیوتنی

سیالات غیرنیوتنی را در یک دسته بندی می‌توان به سه دسته کلی تقسیم نمود. دسته اول سیالات مستقل از زمان، دوم سیالات وابسته به زمان، و دسته سوم سیالات ویسکوالاستیک. که در این مقاله به بررسی اثرات سیالات مستقل از زمان در جریان‌های غیرماندگار پرداخته خواهد شد.

سیالات مستقل از زمان که در زمره مجموعه سیالات غیرالاستیک قرار می‌گیرند به نام سیالات نیوتنی تعمیم یافته نیز معروف می‌باشند. این دسته، مشابه سیالات نیوتنی هستند با این تفاوت که رابطه تنش برشی و نرخ کرنش برشی سیال مانند سیال نیوتنی خطی نخواهد بود. در حقیقت مقدار تنش برشی تابعی غیر خطی از مقدار کرنش برشی خواهد بود. بر این اساس و نوع رابطه‌ای که بین کرنش برشی و تنش برشی برقرار می‌باشد که از ویژگی‌های ذاتی سیال نشات می‌گیرد، این دسته از سیالات خود به زیر گروه‌های دیگری تقسیم‌بندی می‌شوند. این مجموعه را می‌توان به دو بخش دارای تنش تسلیم و بدون تنش تسلیم

۲- معادلات حاکم بر جریان غیرماندگار لوله

روابط پیوستگی و ممنتوم در مختصات استوانه‌ای در راستای محوری از مبحث مکانیک محیط‌های پیوسته به صورت زیر برقرار می‌باشند [۱۱، ۱۲]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot (\nabla \rho) + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (۱)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_r \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \rho \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (۲)$$

در روابط فوق ρ چگالی و v_i مولفه‌های سرعت می‌باشند. معادله ممنتوم در نمایش اندیسی به شکل زیر خواهد بود [۱۱، ۱۲]

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \rho b_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (۳)$$

عبارت τ مقدار تنش در سیال و b_i نیروهای حجمی می‌باشد. معادله ممنتوم در راستای محور لوله به شکل زیر می‌باشد

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \rho g_z + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\tau_{zr}}{r} \quad (۴)$$

برای دستیابی به فرم نهایی معادلات جریان غیرماندگار غیرنیوتنی، فرضیات و ساده سازی‌های زیر باستی صورت گیرد. ابتدا اعمال فرضیات جریان دو بعدی سپس حذف ترم‌های کوچک همرفتی، اعمال روابط سیال غیرنیوتنی و در نهایت استفاده از معادله حالت [۱۳-۱۵].

در جریان‌های دو بعدی با تقارن محوری پس از انجام ساده سازی‌ها و همچنین با فرض $p = \rho gH$ که در آن H ارتفاع پیزومتریک سیال است، معادله پیوستگی [۱۳-۱۵] معادلات فوق به شکل زیر تبدیل خواهند شد

$$\frac{g}{c^2} \left(\frac{\partial H}{\partial t} + v_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (rv_r)}{\partial r} = 0 \quad (۵)$$

جهت حذف و از بین بردن نوسانات عددی (اغتشاشات روش عددی) از ترم‌های مستهلک کننده مرتبه دوم^۴ استفاده شده است. این عبارات به گونه‌ای عمل می‌کنند که در نواحی هموار متغیرها، بی تاثیر شده و فقط در نواحی با گرادیان بالا منجر به حذف نوسانات شدید عددی می‌گردند. عبارت افزوده شده که $A(W)$ نام‌گذاری شده است، به صورت زیر به معادلات پایه اضافه می‌شود

$$\frac{\partial W}{\partial t} + B \frac{\partial W}{\partial x} = C + A(W) \quad (11)$$

که W شامل بردار متغیرهای دبی و فشار می‌باشد $(W = [Q \ H])$. B و C ضرایب معادله می‌باشد. روش به کار رفته برای عبارت‌های مستهلک کننده در این مقاله مشابه روش جامسون و همکاران [۱۸، ۱۹] انجام گرفته است. روش کار بدین صورت است که عبارت‌های مستهلک کننده به معادلات پایه اضافه می‌شوند، که این عبارت به صورت زیر هستند

$$A(W) = \frac{1}{\Delta t} [\varepsilon_{i+1/2}(W_{i+1} - W_i) - \varepsilon_{i-1/2}(W_i - W_{i-1})] \quad (12)$$

$$\varepsilon_{i+1/2} = \frac{1}{2} \max(\alpha_{i+2}, \alpha_{i+1}, \alpha_i, \alpha_{i-1})$$

α_i یک متغیر عددی است که به صورت یک سوئیچ عمل می‌کند، بدین صورت که نواحی با گرادیان بالا را تشخیص می‌دهد، که در این جا از سوئیچ کاهنده مجموع تغییرات^۵ استفاده شده است [۱۸، ۱۹]. عملکرد آن به صورت روابط زیر نشان داده شده است.

$$\alpha_i = \frac{|W_{i+1} - 2W_i + W_{i-1}|}{(1 - \omega)\Psi_{TVD} + \omega\Psi} \quad (13)$$

$$\Psi = |W_{i+1} + 2W_i + W_{i-1}|$$

$$\Psi_{TVD} = |W_{i+1} - W_i| + |W_i - W_{i-1}|$$

که با اعمال $\omega = 0$ ، فرم بالا به صورت زیر ساده خواهد شد

$$r = \frac{W_i - W_{i-1}}{W_{i+1} - W_i} \quad (14)$$

$$\alpha_i = \frac{|1 - r|}{1 + 1}$$

تقسیم بندی کرد. در دسته بدون تنش تسلیم دو گروه شبه پلاستیک‌ها و سیالات دایلاتنت^۲ قرار دارند که گروه اول موضوع این تحقیق خواهد بود [۱۲، ۱۶].

جهت مدل سازی ریاضی سیالات شبه پلاستیک مدل‌های قانون توانی، مدل کاروا، مدل کراس، مدل البیس و برخی دیگر مدل‌ها استفاده می‌شود که هر کدام دارای نقاط ضعف و قوت خود می‌باشند. در این تحقیق به علت محدود بودن لزجت سیالات واقعی و مطابقت آن با این مدل و همچنین استفاده از پارامترهای کمتر و در نتیجه تحلیل عددی مناسب‌تر از مدل کراس استفاده شده است، که رابطه آن به شکل زیر می‌باشد [۱۶]

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + k(\dot{\gamma}_{yx})^n} \quad (9)$$

در رابطه فوق η لزجت سیال، و η_0 ، η_∞ ، k ، n پارامترهای مدل هستند. همچنین برای به کار بردن نرخ برش و استقلال آن از دستگاه مختصات از رابطه زیر استفاده شده است [۱۷]

$$\dot{\gamma} = \sqrt{-4II_D} = \sqrt{2D_{ij}D_{ij}} \quad (10)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

عبارت D_{ij} در رابطه بالا تانسور نرخ تغییر شکل و II_D ناوردای دوم آن می‌باشد.

۴- روش عددی

برای حل معادلات جریان غیرماندگار که در قسمت‌های قبل بدست آورده شد، از روش‌های معمول و با دقت مناسب تفاضل محدود استفاده شده است، بدین صورت که جهت گسسته‌سازی عبارت‌های شامل تفاضل زمان و یا به عبارت دیگر برای انتگرال گیری زمانی از روش رانج کوتای مرتبه چهارم^۳ استفاده شده است. همچنین جهت گسسته‌سازی ترم‌های مکانی (مشتق‌های مکانی) از فرم تفاضل محدود مرکزی مرتبه دوم استفاده شده است.

⁴ second order dissipative term

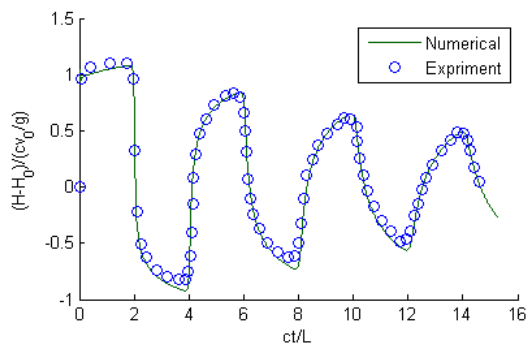
⁵ Total Variation Diminishing (TVD)

² Shear thickening or dilatant

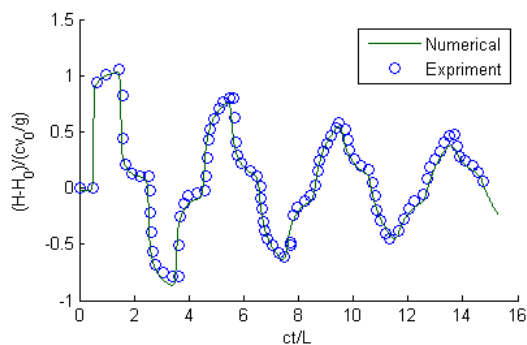
³ fourth-order Runge-Kutta scheme

نتایج آزمایشگاهی از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند، که نشان دهنده صحت و درستی روش عددی می‌باشد.

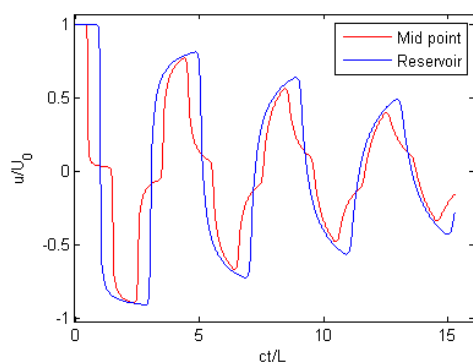
در نمودار شکل ۳ تغییرات سرعت متوسط جریان سیال در دو نقطه از لوله مشاهده می‌شود. نقطه اول نقطه میانی لوله و دوم تغییرات سرعت در مقطع مخزن می‌باشد، قابل ذکر است که سرعت در محل شیر صفر خواهد بود.



شکل ۱ تاریخچه فشار در محل شیر



شکل ۲ تاریخچه فشار در نقطه میانی



شکل ۳ تاریخچه سرعت میانگین در دو نقطه از لوله

همچنین برای بدست آوردن سرعت میانگین در لوله از رابطه زیر استفاده می‌شود. که برای محاسبه آن، روش انتگرال گیری عددی سیمسون به کار گرفته شده است

$$V = \frac{\int_0^R 2\pi r v_z dr}{\pi R^2} \quad (15)$$

در ادامه بر اساس روابط و روش‌های فوق ابتدا روش عددی و الگوریتم حل را با مقایسه نتایج عددی و یک مثال آزمایشگاهی صحت سنجی کرده، سپس به بررسی و تحلیل نتایج عددی مدل غیرنیوتنی پرداخته خواهد شد.

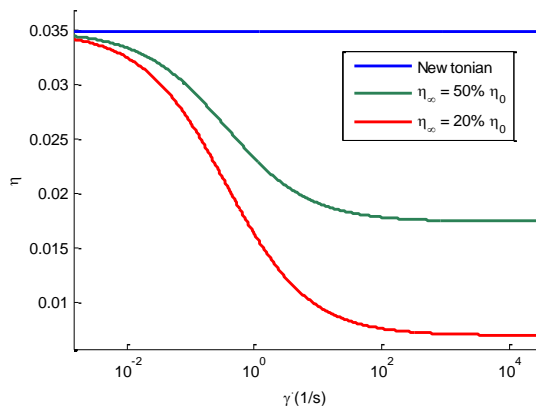
۵- راست آزمایی مدل عددی

جهت اطمینان از کارکرد صحیح مدل عددی و الگوریتم‌های حل، مقایسه‌ای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی انجام شده است. این آزمایش که توسط هلمبو و رتلو انجام شده است [۲۰]، یک سیستم شیر - لوله - مخزن بوده که مشخصات آن به شرح زیر است.

لوله دارای طول ۳۶/۰۹ متر و قطر ۰/۰۲۵ متر می‌باشد، سیال به کارگرفته شده از جنس روغن با چگالی ۸۷۸/۴ کیلو گرم بر مترمکعب و لزجت دینامیکی ۰/۰۳۴۸۳ پاسکال ثانیه می‌باشد. سرعت اولیه سیال ۰/۰۱۳ متر بر ثانیه بوده و سرعت موج اندازه گیری شده و رینولدز جریان به ترتیب برابر با ۱۳۲۴ متر بر ثانیه و ۸۲ بدست آمده است.

روش آزمایش بدین گونه است که بستن سریع شیر سبب قطع جریان سیال در محل شیر شده و سبب ایجاد نوسان در مقادیر فشار و سرعت سیال در طول لوله می‌گردد. نتایج آزمایشگاهی دربرگیرنده مقادیر فشار در زمان‌های مختلف پس از بستن شیر در دو نقطه از لوله (محل شیر و نقطه میانی لوله) می‌باشد. در دو نمودار شکل ۱ و ۲ نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی برای فشار سیال درون لوله در نقطه انتهایی (شیر) و نقطه میانی لوله با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در این نمودارها محور افقی، محور زمان بوده که به صورت بی بعد شده (با استفاده از سرعت موج و طول لوله) نمایش داده شده است و محور عمودی مقادیر فشار هستند، که به نسبت فشار ژوکوفسکی بی بعد شده‌اند. همان طور که در نمودارهای بالا مشاهده می‌شود نتایج عددی در مقایسه با

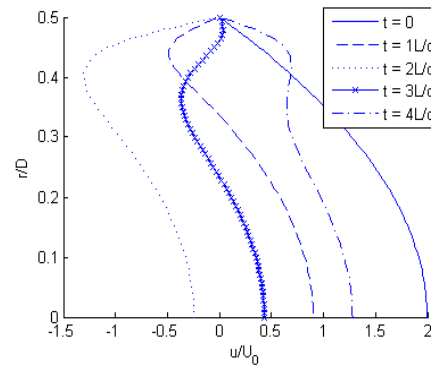


شکل ۵ نمودار تغییرات لزجت بر حسب گرادیان سرعت

در این مدل‌سازی برای یکسان بودن مقدار اولیه فشار جاکفسکی ($\Delta H = cV_0/g$) سرعت حالت ماندگار جریان یکسان فرض شده است. برای این منظور مقادیر افت در واحد طول در سه حالت فوق به ترتیب برابر با ۲/۶۹۳، ۱/۴۱۰ و ۰/۶۴۰۶ سانتی متر خواهد بود. همچنین فرض شده در سرعت موج تغییری ایجاد نمی‌شود. با شرایط مذکور با استفاده از روش عددی برای فشار در نقطه انتهایی (محل شیر) و نقطه میانی لوله نتایج زیر بدست آمده‌اند.

همان طور که در نمودارهای شکل ۶ و شکل ۷ مشاهده می‌شود در دوره‌های متناوب جریان غیرماندگار، مطابق انتظار مقادیر حداکثر فشار با کاهش لزجت سیال، کاسته می‌گردد. به عبارت دیگر با کاهش لزجت سیال مقادیر افت در طول مسیر لوله کم خواهد شد که این موضوع در نمودارهای فوق به وضوح دیده می‌شود. چنانچه در دوره اول تناوب مشاهده می‌شود با کاهش لزجت سیال میزان افزایش فشار (اثر لاین پکینگ^۶) در طی آن دوره کاهش می‌یابد که این امر ناشی از کاهش لزجت متوسط و در نتیجه کاهش افت در طول لوله می‌باشد که در نهایت سبب کاهش نرخ افزایش فشار خواهد شد.

همچنین در نمودار شکل ۴ پروفیل سرعت نشان داده شده است. این پروفیل در مقطع لوله در نقطه میانی لوله در زمان‌های مختلف که ضریبی از L/c می‌باشند، ترسیم شده‌اند.



شکل ۴ پروفیل سرعت در عرض مقطع در نقطه میانی لوله

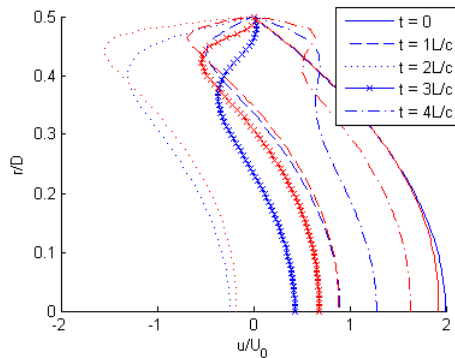
۶- بررسی رفتار سیال غیرنیوتنی در جریان گذرا

در این بخش با ارائه چند مثال عددی به بررسی اثرات وجود یک سیال غیرنیوتنی یا به عبارت دیگر اثرات ناشی از تغییرات لزجت سیال، پرداخته می‌شود. این اثرات که ناشی از وابستگی غیر خطی لزجت سیال با گرادیان سرعت (نرخ برش) می‌باشد، در تغییرات فشار، پروفیل سرعت جریان و تنش برشی جداره، قابل مشاهده می‌باشد که در ادامه مطلب به بررسی و تحلیل آن پرداخته خواهد شد.

در این نمونه فرض شده است در سیستم یک سیال شبه پلاستیک وجود داشته باشد، که بیشترین فراوانی را در دسته بندی سیالات غیرنیوتنی دارا می‌باشند. برای مقایسه بهتر و تطبیق آن با نتایج قبل رفتار غیرنیوتنی به گونه‌ای انتخاب شده که بتوان آن را با مثال پیشین مقایسه نمود.

بدین منظور ویژگی‌های زیر را برای سیال غیرنیوتنی در روش عددی در نظر می‌گیریم. سیال از نوع شبه پلاستیک با لزجت اولیه معادل لزجت سیال موجود در مثال قبل بوده و لزجت نهایی آن معادل ۲۰ و ۵۰ درصد مقدار لزجت اولیه در نظر گرفته می‌شود. جهت مدل‌سازی عددی از مدل کراس بهره گرفته شده است. این مدل یک مدل چهار ثابت بوده که دو پارامتر آن پیشتر مشخص گردید و پارامتر n را برابر مقدار معمول آن (۲/۳) و مقدار k نیز ۲ در نظر گرفته شده است. با توجه به پارامترهای فرض شده، در نمودار شکل ۵ مقادیر لزجت بر حسب گرادیان‌های مختلف سرعت نشان داده است.

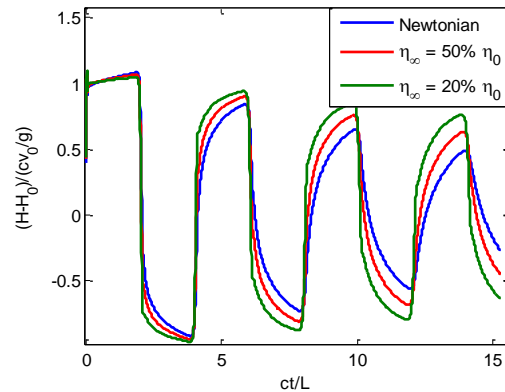
⁶ line packing effects



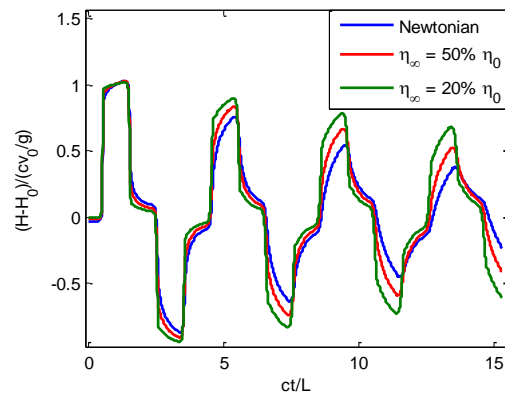
شکل ۹ پروفیل سرعت در نقطه میانی به ازای $\eta_\infty = 20\% \eta_0$ در زمان‌های مختلف (خطوط آبی سیال نیوتنی و خطوط قرمز سیال غیرنیوتنی)

با توجه به دو نمودار قبلی (شکل ۸ و ۹) که توزیع سرعت را مقطع لوله در نقطه میانی نمایش می‌دهند، مشاهده می‌شود که با اعمال رابطه غیرنیوتنی به سیال در جریان غیرماندگار پروفیل سرعت نیز دچار تغییر شده است، به گونه‌ای که با کاهش لزجت سیال تغییرات پروفیل توزیع سرعت شدیدتر شده و یا به عبارت دیگر دامنه تغییرات سرعت در یک مقطع بیشتر گردیده است. افزایش گرادیان سرعت در مجاورت جداره لوله سبب کاهش مقدار لزجت شده که خود سبب تغییر مقادیر سرعت و تنش برشی در نزدیکی جداره خواهد شد. همچنین کاهش لزجت سبب شده که بیشینه سرعت نسبی در مقطع به جداره لوله نزدیک‌تر شود. نیمه میانی لوله حرکتی جامد گونه دارد، که تحت اثر تنش برشی جداره و میزان لزجت سیال می‌باشد، بدین صورت که با افزایش لزجت سیال میزان نفوذ اثر تنش برشی جداره در مقطع لوله بیشتر می‌گردد، که این موضوع در نمودارهای بعدی نیز قابل مشاهده خواهد بود. در ادامه به بررسی توزیع لزجت و تنش برشی در مقطع لوله پرداخته شده است.

چنانچه در پروفیل‌های تنش برشی و لزجت مشاهده می‌شود (اشکال ۱۰-۱۴) مقادیر آن‌ها در نیمه میانی لوله تقریباً بدون تغییر می‌ماند، در حقیقت نمودار تنش برشی، لزجت و پروفیل سرعت همگی حاکی از حرکت جامد گونه (بدون حرکت نسبی) نیمه مرکزی لوله دارد.

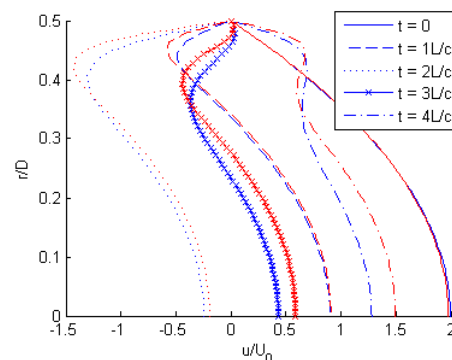


شکل ۶ تاریخچه فشار در محل شیر

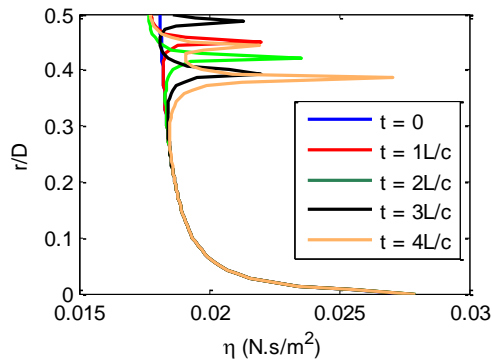


شکل ۷ تاریخچه فشار در نقطه میانی

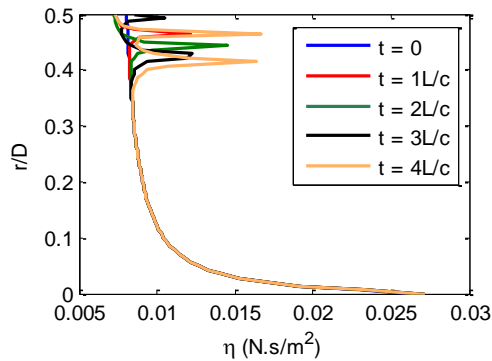
در ادامه تحلیل اثرات سیال غیرنیوتنی بر جریان غیرماندگار به بررسی اثرات تغییر لزجت در پروفیل سرعت پرداخته می‌شود. در نمودارهای شکل ۸ و شکل ۹ پروفیل سرعت در مقطع میانی بین سیال نیوتنی و دو حالت سیال غیرنیوتنی مقایسه شده است.



شکل ۸ پروفیل سرعت در نقطه میانی به ازای $\eta_\infty = 50\% \eta_0$ در زمان‌های مختلف (خطوط آبی سیال نیوتنی و خطوط قرمز سیال غیرنیوتنی)



شکل ۱۳ توزیع لزجت ظاهری در مقطع میانی با $\eta_{\infty} = 50\% \eta_0$

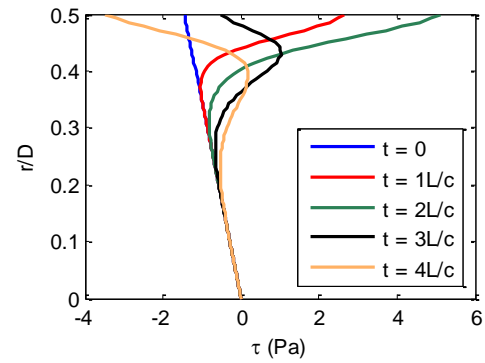


شکل ۱۴ توزیع لزجت ظاهری در مقطع میانی با $\eta_{\infty} = 20\% \eta_0$

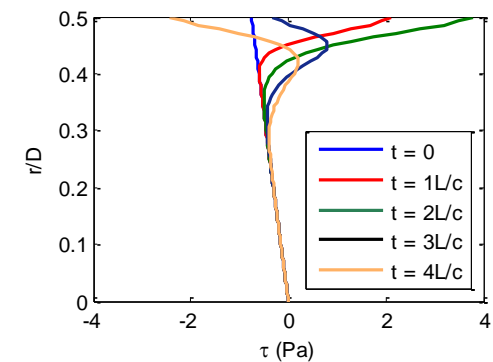
۷- نتیجه گیری

در این تحقیق اثرات سیال غیرنیوتنی در جریان غیرماندگار مورد بررسی قرار گرفت. پس از بدست آوردن معادلات اولیه برای جریان غیرماندگار غیرنیوتنی، روش عددی رانج کوتای مرتبه چهارم جهت تقریب عبارات زمانی و تفاضل مرکزی مرتبه دوم جهت گسسته‌سازی عبارات مکانی مورد استفاده قرار گرفت، همچنین از ترم‌های مستهلک کننده مرتبه دوم برای حذف نوسانات عددی بهره گرفته شد. در ادامه جهت راست آزمایی روش عددی و الگوریتم مورد استفاده، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید که حاکی از صحت نتایج عددی بوده است.

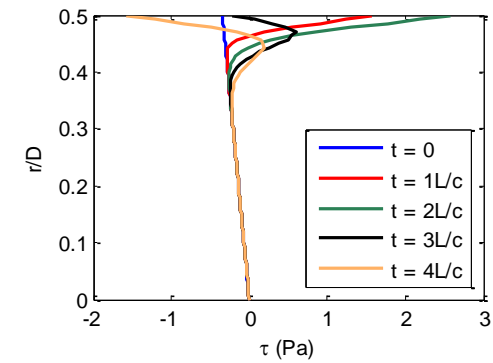
پس از اطمینان از روش عددی از مدل غیرنیوتنی کراس استفاده کرده و حالت‌های مختلف سیال غیرنیوتنی مدل‌سازی گردید و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شده است. از مهمترین نتایج حاصل می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.



شکل ۱۰ توزیع تنش برشی در مقطع میانی با سیال نیوتنی



شکل ۱۱ توزیع تنش برشی در مقطع میانی با $\eta_{\infty} = 50\% \eta_0$



شکل ۱۲ توزیع تنش برشی در مقطع میانی با $\eta_{\infty} = 20\% \eta_0$

نتایج بدست آمده از پروفیل تنش برشی نشان دهنده آن است که با افزایش حالت غیرنیوتنی سیال و کاهش میانگین لزجت سیال در نواحی نزدیک به جداره لوله، تغییراتی که از جداره لوله آغاز می‌گردند، کمتر به سمت مرکز لوله منتشر می‌شوند، به عبارت دیگر رفتار حالت‌های مختلف در مرکز لوله مشابه یکدیگر می‌باشد.

- [7] Vardy, A.E. and J.M.B. Brown, (2011) Laminar pipe flow with time-dependent viscosity. *J HYDROINFORM*, 13(4): p. 729-740.
- [8] Riiasi, A., A. Nourbakhsh, and M. Raisee, (2009) Unsteady Velocity Profiles in Laminar and Turbulent Water Hammer Flows. *J. Fluids Eng.*, 131(12): p. 121202-121202.
- [9] Toms, B.A. (1948) Some Observation on the Flow of Linear Polymer Solutions Through Straight Tubes at Large {R}eynolds Numbers. in *Proc. 1st Intl. Congr. on Rheology*. 1948.
- [10] Oliveira, G.M., C.O.R. Negrão, and A.T. Franco, (2012) Pressure transmission in Bingham fluids compressed within a closed pipe. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 169-170(0): p. 121-125.
- [11] Lai, W.M., et al., (2010) Introduction to continuum mechanics. 4th ed Amsterdam ; Boston: Butterworth-Heinemann/Elsevier.
- [12] Bird, R.B., R.C. Armstrong, and O. Hassager, (1987) Dynamics of polymeric liquids. 2 ed. Vol. 1.
- [13] Tijsseling, A.S., (1993) *Fluid - structure interaction in case of waterhammer with cavitation in Civil Engineering Department* 1993, Delft University of Technology: Netherlands.
- [14] Ghidaoui, M.S., et al., (2005) A Review of Water Hammer Theory and Practice. *Appl. Mech. Rev.*, 58(1): p. 49-76.
- [15] Wylie, E.B., V.L.A. STREETER, and L. Suo, (1993) *Fluid Transients in Systems*: Prentice Hall PTR.
- [16] Chhabra, R.P. and J.F. Richardson, (2011) *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications*. 2nd ed: Elsevier Science.
- [17] Oliveira, P.J. and F.T. Pinho, (1998) A qualitative assessment of the role of a viscosity depending on the third invariant of the rate-of-deformation tensor upon turbulent non-Newtonian flow. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 78(1): p. 1-25.
- [18] (1981) Numerical solution of the Euler equations by finite volume methods using Runge Kutta time stepping schemes. in *AIAA, Fluid and Plasma Dynamics Conference*, 14th, Palo Alto, CA, June 23-25, 1981. 15 p. 1981.
- [19] Wahba, E.M., (2006) Runge-Kutta time-stepping schemes with TVD central differencing for the water hammer equations. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 52(5): p. 571-590.
- [20] Holmboe, E.L. and W.T. Rouleau, (1967) The Effect of Viscous Shear on Transients in Liquid Lines. *J BASIC ENG.*, 89(1): p. 174-180.
- افزایش اثر غیرنیوتنی سیال شبه پلاستیک (سیال به کار رفته در این مطالعه) و در نتیجه کاهش نسبی مقدار لزجت، سبب کاهش میزان افت در لوله شده و در پی آن میزان فشار ایجاد شده در محل شیر افزایش پیدا کرده است. همچنین به علت کاهش مقدار لزجت ظاهری در جداره سبب کاهش میزان افت لوله شده که به سبب آن اثر لاین پکینگ کمتر شده است.
- در پی تغییرات رفتار سیال مشاهده می‌شود که با افزایش اثرات غیرنیوتنی دامنه تغییرات به سمت جداره لوله متمایل شده است، و به دنبال آن بیشینه نسبی سرعت در مقطع لوله نیز به جداره نزدیک‌تر می‌شود، همچنین تغییرات شدیدتری در پروفیل سرعت مشاهده می‌گردد. در میانه لوله نیز حرکتی کلی (شبه صلب) و با تغییرات نسبی ناچیز مشاهده می‌گردد، که به خوبی در سه نمودار لزجت، تنش برشی و پروفیل سرعت مقطع به خوبی قابل مشاهده است. تغییرات ایجاد شده در مجاورت جداره لوله را نیز می‌توان ناشی از اعمال شرط عدم لغزش در مرز سیال با جداره لوله دانست که اثرات آن از جداره لوله به سمت مرکز لوله پراکنده می‌گردد.

مراجع

- [1] Pinho, F.T., (2003) A GNF framework for turbulent flow models of drag reducing fluids and proposal for a $k-\epsilon$ type closure. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 114(2-3): p. 149-184.
- [2] Cruz, D.O.A. and F.T. Pinho, (2003) Turbulent pipe flow predictions with a low Reynolds number $k-\epsilon$ model for drag reducing fluids. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 114(2-3): p. 109-148.
- [3] Pinho, F.T. and J.H. Whitelaw, (1990) Flow of non-newtonian fluids in a pipe. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 34(2): p. 129-144.
- [4] Moyers-Gonzalez, M.A. and R.G. Owens, (2008) A non-homogeneous constitutive model for human blood: Part II. Asymptotic solution for large Péclet numbers. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 155(3): p. 146-160.
- [5] Moyers-Gonzalez, M.A., R.G. Owens, and J. Fang, (2008) A non-homogeneous constitutive model for human blood: Part III. Oscillatory flow. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 155(3): p. 161-173.
- [6] Moyers-Gonzalez, M.A., R.G. Owens, and J. Fang, (2009) On the high frequency oscillatory tube flow of healthy human blood. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 163(1-3): p. 45-61.