

# بررسی تجربی تاثیر همزمان میکرو و نانو پلیمرها بر روی خواص هیدرودینامیکی جریان مغشوش درون یک لوله افقی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران  
دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران  
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

مسعود طالعزده  
کوروش گودرزى\*  
امین موسایی

## چکیده

در این مقاله به بررسی تجربی تاثیر همزمان میکرو و نانو پلیمر بر روی خواص هیدرودینامیکی شامل افت فشار و ضریب اصطکاک پوسته‌ای جریان مغشوش درون یک لوله افقی در اعداد رینولدز مختلف پرداخته شده است. در این کار از ماده افزودنی پلیمر پلی‌آکریل‌آمید نیمه هیدرولیز شده در مقیاس میکرو و نانو بنام superfloc A110 استفاده شده است. به منظور داشتن تحلیل جامعی از شرایط گوناگون آزمایشی، آزمایشات با غلظت‌های مختلف ماده پلیمری در مقیاس میکرو و نانو انجام شده است و تاثیر شرایط گوناگون بر روی افت فشار و ضریب اصطکاک بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن پلیمر در اندازه میکرو تا غلظت بهینه (۰/۰۶۲۵ درصد حجمی) سبب کاهش ضریب اصطکاک می‌شود. همچنین با اضافه کردن ذرات پلیمری در اندازه نانو به محلول حاوی ذرات پلیمری در اندازه میکرو بطور همزمان، ضریب اصطکاک تا حدود ۵۸ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش دمای محلول تا حدود ۳۰ درجه سلسیوس گراد نیز کارایی عامل کاهنده پسا بالاتر می‌رود.

واژه‌های کلیدی: جریان مغشوش- افت فشار - پلیمر- میکرو و نانو.

## An Experimental Investigation of the Simultaneous Effect of Micro and Nano Polymers on the Hydrodynamic and Thermal Properties of Turbulent Flow in a Horizontal Pipe

M. Talezadeh Department of Mechanical Engineering, yasuj University, yasuj, Iran.  
K. Goudarzi Department of Mechanical Engineering, yasuj University, yasuj, Iran  
A. Moosaie Department of Mechanical Engineering, yasuj University, yasuj, Iran

### Abstract

In this paper, the simultaneous effect of micro and nano-sized polymers on the hydrodynamic properties of turbulent flow (including pressure lose and friction coefficient) in a horizontal pipe at different Reynolds numbers studied experimentally. In this article, partially hydrolyzed polyacrylamide polymer is used as superfloc A110. In order to perform the comprehensive analysis, experiments were investigated with different concentrations of micro and nano-sized polymers and impact of various conditions on the pressure lose and friction coefficient. The results show that the addition of micro-sized polymers particles up optimum concentration (0625/0% by volume) reduced the friction coefficient. Also adding the nano-sized polymer particles to the solution containing the micro-sized polymer particles at the same time, the friction coefficient is reduced by about 58%. With increasing the temperature of solution up to 30 ° C drag reduction improved.

**Keywords:** Turbulent Flow, Pressure Drop, Polymer, Micro and Nano.

میله‌ای مانند تقسیم می‌شوند. پلیمرهای انعطاف‌پذیر در برابر پلیمرهای صلب (فیبرها) پسا را در سطح بالاتری کاهش می‌دهند، اما به دلیل ناپایداری و خاصیت ارتجاعی در یکدیگر فرو رفته و خواص اولیه خود را از دست می‌دهند. استفاده هم زمان از پلیمرهای صلب و انعطاف‌پذیر نیز در زمینه‌ی کاهش پسا کاربرد دارد، که از استفاده کردن هرکدام به صورت مجزا مؤثرتر واقع می‌گردد. بر همین اساس بررسی تاثیر پلیمرها بر خواص جریان درون لوله از جمله مسائل مهمی بوده است که از چندین دهه‌ی قبل مورد بررسی قرار گرفته است. این موضوع در انتقال سیالات به ویژه سیالات سنگین مانند نفت و فراورده‌های مایع آن اهمیت فراوانی دارد و همواره در این راستا به ویژه در زمینه‌ی صنعت انتقال نفت تحقیقات فراوانی صورت گرفته است [۷-۱]. در زمینه‌ی افت فشار برای اولین بار بلاتچ [۸] به کاهش افت فشار در حضور برخی مواد اشاره کرد. اما تا سال‌های زیادی به جز در چند مورد که در زمینه‌ی سوسپانسیون فیبر ساقه چوب به داخل آب بررسی‌هایی انجام شد، کسی به این مفهوم توجه نکرد. تامس [۹] برای اولین بار با افزودن مقدار کمی

### ۱- مقدمه

وجود افت فشار بین نقاط مختلف خطوط لوله باعث بالا رفتن میزان انرژی مصرفی پمپ‌ها می‌شود از این رو کاهش دادن آن امری بسیار حیاتی است. بخش بزرگی از افت فشار در طول خطوط لوله بخاطر وجود تلفات اصطکاک بین سیال و دیواره لوله است. از طرف دیگر آشفتگی جریان باعث افزایش قابل ملاحظه پسا اصطکاک می‌شود. برای غلبه بر اثرات ناشی از تلفات در طول لوله راه‌های مختلفی وجود دارد. یکی از روشهایی که معیارهای بهتری نسبت به بقیه دارد افزودن موادی موسوم به مواد روان‌کننده یا عوامل کاهنده پسا به جریان خط لوله است. در واقع با تزریق چند P P M از این مواد به خطوط لوله و کاهش اصطکاک ذاتی جریان، مقدار مصرف انرژی توسط پمپ پایین می‌آید و به بیان دیگر مقدار بیشتری سیال قابل پمپ شدن است. در نتیجه بدون تغییر در لوله می‌توان ظرفیت خط لوله را افزایش داد. یکی از این مواد افزودنی، مواد پلیمری است. پلیمرها به دو دسته انعطاف‌پذیر و صلب

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: [kgoudarzi@yu.ac.ir](mailto:kgoudarzi@yu.ac.ir)

از یک پلیمر با وزن مولکولی بالا متوجه شد که در الگوی جریان درون لوله تغییرات قابل ملاحظه‌ای ایجاد شده است که این امر باعث کاهش نیروی درگ بر روی سطح جامد می‌شد. میسلز [۱۰] با انجام آزمایشات به اثر افزودن مواد پلیمری به جریان و کاهش افت فشار پی برد. در ادامه یکی از اولین آزمایشات برای کاهش درگ توسط هون و اولیور [۱۱] بر روی مخلوط گاز و مایع انجام شد. آنها از ۱/۳٪ پلی اتیلن اکساید (PEO) به عنوان پلیمر استفاده کردند و توانستند اثر کاهش درگ را بر روی مخلوط نشان دهند. گریسکوپیچ و شریر [۱۲] تاثیر پلیمرها بر خواص هیدرودینامیکی مخلوط آب و هوا در لوله را مورد بررسی و آزمایش قرار دادند و متوجه شدند که پسی اصطکاکی در این مخلوط با افزودن یک ماده‌ی پلیمری تا حدود ۴۰٪ کاهش می‌یابد. در میان تحقیقات موجود در زمینه‌ی کاهش افت فشار، در نتیجه تزریق پلیمر، می‌توان از تحقیقات ساوین [۱۳]، متزنر و همکاران [۱۴]، پترسون و همکاران [۱۵]، وبرک و همکاران [۱۶]، لیستر [۱۷]، زاکن [۱۸]، یون و قاجار [۱۹] و مولا و همکاران [۲۰] نام برد. سیلستر و بریل [۲۱] یک سری مطالعات را بر روی جریان دو فازی آب و هوا با استفاده از پلی اتیلن اکساید انجام دادند. هایت [۲۲] متوجه شد که اضافه کردن مواد پلیمری به جریان درون لوله باعث افزایش دبی جریان و کاهش انتقال گرما می‌شود. مولا و همکاران [۲۳] اثرات محلول پلیمری را بر روی جریان آب و هوا مورد بررسی قرار دادند. پتانسیسکی و همکاران [۲۴] یک جریان آشفته‌ی کاملاً توسعه یافته درون لوله را مورد آزمایش قرار دادند. از یک درشت مولکول پلیمری به نام پلی آکریل آمید به عنوان عامل کاهنده‌ی پسا به جریان استفاده کردند. آنها میزان کاهش درگ را در غلظت‌های متفاوت بدست آوردند و با نتایج بدست آمده از آب خالص مقایسه کردند. صادقی و همکاران [۲۵] کارایی روکش‌های پلیمری در کاهش ضریب پسی جسم<sup>۱</sup> uuv (اجسامی همچون اژدر و زیر دریایی) خاصی با هندسه معین را با استفاده از روش‌های تجربی مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور از پلیمر قابل حل در آب (پلی آکریل آمید) و پلیمر غیر قابل حل در آب (پلی‌دی‌متیل سیلوگزان) و برای اندازه‌گیری نیروی درگ از دستگاهی به نام برج آب استفاده کردند. اندازه‌گیری نیروی درگ در دستگاه مزبور بر روی مدل کوچکی از جسم انجام شد. اندازه‌گیری ضریب پسا مدل در ابتدا بدون استفاده از هر گونه روکش پلیمری صورت پذیرفت تا ضریب درگ پایه بدست آید. در مرحله بعد، سطح مدل با پوشش‌های پلیمری پوشانده شد و آزمایشات مجدداً تکرار گردید. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که پوشش‌های پلیمری، پسا را به طور قابل ملاحظه‌ای بین ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهند. مولا و نادری [۲۶]، اثرات یک محلول پلیمری در جریان دو فازی نفت و هوا در لوله‌ی افقی را مورد بررسی و آزمایش قرار دادند. در این آزمایش از یک پلی آلفالین به نام پلی ایزو بوتیلین برای کاهش پسا و کاهش افت فشار استفاده کردند. سوپارو و همکاران [۲۷] تاثیر افزودن مواد پلیمری کاهنده‌ی پسا را بر جریان درون یک منبع ذخیره‌ی آب که یک لوله‌ی تخلیه در کف این منبع قرار دارد و جریان آب تحت تاثیر نیروی گرانش از این لوله تخلیه می‌شود را مورد بررسی و آزمایش قرار دادند و میزان کاهش زمان مورد نیاز برای تخلیه منبع تحت اثر افزودن مواد پلیمری را بدست آوردند. جهانمیری و همکاران [۲۸] به بررسی روش‌های نوین

کاهش پسا در اجسام غوطه ور در سیال پرداختند. ابتدا، انواع نیروی وارد بر اجسام شناور را برشمردند و با توجه به سهم بالای مقاومت اصطکاکی، روش‌های کاهش این مقاومت را بیان کردند. همچنین معایب و مزایای هر کدام از روش‌های کاهش پسا را به اختصار شرح دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که رنگهای آب گریز به عنوان مطلوب‌ترین گزینه کاهش درگ در شناورهای تجاری می‌باشد. کروچاک و هولم [۲۹] تاثیر میکرو فیبرهای سلولزی را بر جریان آشفته‌ی درون لوله مستقیم مورد بررسی و آزمایش قرار دادند و متوجه شدند که میکرو فیبرهای سلولزی همانند مواد کاهنده‌ی پسا باعث کاهش ضریب پسا می‌شوند. کاستیک و همکاران [۳۰] تاثیر نانو ذرات بر مشخصات اصطکاکی و حرارتی جریان درون لوله را مورد بررسی و آزمایش قرار دادند. در این پژوهش آنها با اضافه کردن نانو لوله‌ی کربنی و نانو فیبرها در غلظت‌های مختلف و اندازه‌گیری میزان کاهش پسا و تغییرات ایجاد شده در ضریب انتقال گرما در اعداد رینولدز مختلف، توانستند به نتایج جدید و مفیدی دست پیدا کنند.

در جریان‌های مغشوش که بیشترین سهم را در ایجاد نیروی پسا دارند، گردابه‌ها نقش اصلی را ایفا می‌کنند. بنابراین هدف از روشهای کاهش پسا کم کردن نقش این گردابه‌ها و در واقع شکستن آنها و تبدیل آنها به گردابه‌های کوچکتر است. از طرف دیگر طیف اندازه گردابه‌ها در یک جریان مغشوش وسیع و برای خنثی کردن نقش هر کدام از گردابه‌ها لازم است که از مواد افزودنی با اندازه‌های مختلف بهره برد. در مطالعات قبلی از مواد افزودنی با اندازه میکرو و بالاتر استفاده شده است، ولی با توجه به مکانیزم فیزیکی مواد افزودنی در جهت کاهش اثر گردابه‌ها و در نتیجه کم کردن نیروی پسا به نظر می‌رسد که وجود ذرات پلیمری در اندازه نانو در کنار حجم زیادی از ذرات پلیمری با اندازه میکرو بتواند تاثیر بیشتری بر روی گردابه‌ها و کاهش پسا داشته باشد. بر همین اساس در این مقاله برای اولین بار به بررسی تاثیر همزمان ذرات میکرو و نانو پلیمر بر روی خواص هیدرودینامیکی جریان مغشوش درون لوله افقی پرداخته می‌شود.

## ۲- روش آزمایش

دستگاه آزمایش از یک چرخه بسته تشکیل شده است. قسمت اصلی دستگاه شامل یک لوله مستقیم صاف به طول ۳ متر و قطر داخلی ۲ اینچ (۵۰/۸ میلی‌متر) است. این لوله دارای مقطع دایره‌ای و از جنس پلی اتیلن می‌باشد. جریان آب از درون منبع بوسیله یک الکترو پمپ سانتریفیوژی نوع CS200/2 به درون چرخه هدایت می‌شود. این پمپ با توان ۱٫۵ کیلو وات، دبی حجمی در بازه ۹۰ تا ۱۰۰ لیتر در دقیقه را پمپاژ می‌کند. این پمپ از نوع جریان مستقیم می‌باشد و برای تنظیم دبی جریان از یک شیر، قبل از پمپ استفاده شده است. در این سیستم بعد از پمپ برای تنظیم دبی جریان، یک دی‌سنج مدل غوطه‌وری مخصوص آب قرار گرفته که دبی جریان عبوری از پمپ را اندازه‌گیری می‌کند. این دی‌سنج استوانه‌ای از جنس پلاستیک فشرده است که دبی بین ۶۰ تا ۱۲ متر مکعب در ساعت را اندازه‌گیری می‌کند. حجم محلول پلیمری مورد نیاز برای پر کردن سیکل بسته، از طریق منبع سرپوشیده به حجم ۴۰ لیتر و یک پمپ از نوع PM16/A که دبی بین ۱۰ تا ۳۷ لیتر در دقیقه را انتقال می‌دهد به درون چرخه تزریق می‌شود.

<sup>۱</sup> Unmanned Underwater Vehicle

برای تهیه این ماده پلیمری ابتدا محلول مونومری آکریل آمید-آکریل اسید (AMD\_AA) را با نسبت جرمی ۹ به ۱ آماده کرده و بعد ۴۰ درصد از این محلول به همراه ۸ درصد سدیم کلراید در ۱۰۰۰ میلی لیتر آب حل می‌شود. pH بهینه محلول مونومری در هر یک از حالات پلیمریزاسیون پرتو الکترون، در بازه ۶-۶/۵ می‌باشد. رفته رفته با مشاهده این pH، سدیم هیدروکسید را به محلول مونومری اضافه کرده و محلول مونومری را در سلولهای کوارتز توزیع کرده و در انتها با اضافه کردن مقادیر متفاوت پتاسیم پرسولفات و سدیم فرماید در هر سلول کوارتز، این سلولها در دمای اتاق (۲۵ درجه سلسیوس) و شرایط اتمسفریک تحت تابش پرتوهای الکترون قرار می‌گیرند. بعد از تهیه پودر میکرو و نانو ذره superfloc A110، این پودر در غلظت های مختلف در مقیاس میکرو و ترکیبی از میکرو و نانو در آب حل شده است. پودر میکرو در چهار غلظت ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۶۲۵ و ۰/۰۷۵ درصد جرمی معادل ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ گرم در ۴۰ لیتر آب و غلظت ترکیبی ۱۰ گرم میکرو با ۵ گرم نانو، ۱۰ گرم میکرو با ۱۰ گرم نانو، ۱۰ گرم میکرو با ۲۰ گرم نانو، ۲۰ گرم میکرو با ۵ گرم نانو، ۲۰ گرم میکرو با ۱۰ گرم نانو و ۲۲، ۲۰، ۱۶، ۱۲ و ۲۷ (مکعب متر)/ساعت مورد آزمایش قرار گرفتند. در این مقاله یک جریان آشفته‌ی کاملا توسعه‌یافته درون یک لوله‌ی مستقیم با قطر d وجود دارد. افت فشار،  $\Delta p$  در نرخ جریانهای ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۲ و ۲۷ متر مکعب ساعت اندازه‌گیری می‌شود. در هر شرایط جریانی، ۵ مرتبه افت فشار اندازه‌گیری می‌شود و بین این اندازه‌گیری‌ها مقدار متوسط با استفاده از میانگین‌گیری بدست می‌آید. با استفاده از این داده‌ها، تنش برشی، ضریب اصطکاک فانیگ و کاهش پسای آشفته محاسبه می‌شوند. برای سیالات نیوتونی و غیرنیوتونی و برای همه‌ی رژیم‌های جریان، تنش برشی دیوار،  $\tau_w$  و نرخ کشش،  $\dot{\gamma}_w$  بر اساس اندازه‌گیری‌های افت فشار در طول لوله توسط روابط زیر می‌شوند:

$$\tau_w = \frac{d\Delta p}{4L_p} \quad (1)$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{8V}{d} \quad (2)$$

که در این معادلات  $V$ ، سرعت میانگین درون لوله می‌باشد که از رابطه  $V = \frac{4Q}{\pi d^2}$  بدست می‌آید و طول لوله،  $l_p = 2.82$  می‌باشد. تنش برشی دیوار در جملاتی از ضریب اصطکاک فانیگ،  $f$ ، به صورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (3)$$

زمانی که از ضریب اصطکاک فانیگ استفاده می‌شود، نمودار آن باید بر اساس عدد رینولدز رسم شود که عدد رینولدز به صورت زیر بیان می‌شود:

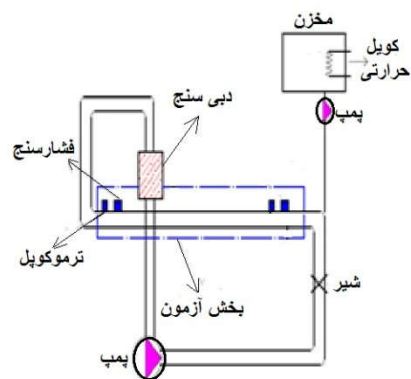
$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (4)$$

که در اینجا  $\rho$  و  $\mu$  به ترتیب چگالی و لزجت دینامیکی میکرو یا نانو سیال می‌باشند که از طریق روابط (۵) و (۶) بدست می‌آیند [۳۰].

$$\rho_{nf} = \phi \rho_{np} + \rho_{bf}(1 - \phi) \quad (5)$$

$$\mu_{nf} = \phi \mu_{np} + \mu_{bf}(1 - \phi) \quad (6)$$

درون منبع از یک گرمکن حرارتی برای افزایش دمای محلول استفاده شده که تاثیر افزایش دما بر عملکرد محلول پلیمری مورد بررسی قرار گیرد. البته باید در نظر داشت که مطالعات گذشته نشان داده‌اند که افزایش بیش از حد دما باعث تخریب زنجیره پلیمری و کاهش کارایی پلیمرها می‌شود به همین دلیل دمای محلول باید در حدی نگه داشته شود و به گونه‌ای کنترل شود که از تخریب پلیمرها جلوگیری شود. برای اندازه‌گیری دمای جریان سیال درون لوله، حسگرهای حرارتی در محل‌های موردنظر قرار گرفتند. این محل‌ها ورودی و خروجی بخش آزمایش می‌باشند. این حسگرها از ترموکوپل نوع J با دقت  $\pm 0.1$  می‌باشند. برای نشان دادن دما، این ترموکوپل‌ها توسط دو عدد سیم به دو نمایشگر مخصوص ترموکوپل نوع J متصل شده‌اند. در ابتدا و انتهای بخش آزمایش دو عدد فشارسنج برای اندازه‌گیری میزان افت فشار قرار گرفته است. این فشارسنج‌ها بازه بین ۰ تا ۱۰ بار را اندازه‌گیری می‌کنند. این فشارسنج‌ها، اختلاف فشار بین دو نقطه از بخش آزمایش که به فاصله ۲/۸۲ از هم می‌باشند را نشان می‌دهند. شماتیکی از دستگاه مورد استفاده جهت بررسی کاهش درگ در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱ - طرحواره دستگاه آزمایش

در این کار تحقیقاتی پلیمر پلی‌آکریل آمید نیمه هیدرولیز شده در مقیاس میکرو و نانو بنام superfloc A110 استفاده شده است. وزن مولکولی این پلیمر که شامل  $10^5$  مونومر (واحدهای کوچک تکرار شونده در ساختار یک پلیمر) است، در حدود  $16 - 18 \times 10^6$   $\frac{g}{mol}$  می‌باشد. مشخصات شیمیایی این ماده در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱ - خواص شیمیایی ماده پلیمری مورد استفاده

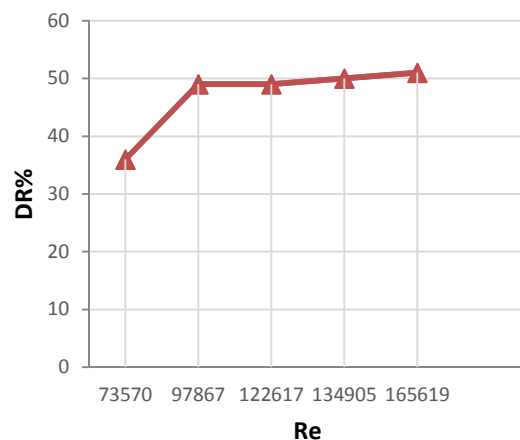
خواص	اندازه
شکل ظاهری	پودر گرانولی سفید
لزجت محلولی با غلظت ۰/۱ و ۰/۳ (درصد)	۱۵۰ و ۶۰۰ (cp)
محتوای نامحلول	$< 0.1\%$
وزن مولکولی (*10 <sup>6</sup> g/mol)	۱۶-۱۸
میزان آنیون (%)	۱۰-۱۵
زمان حل شدن در آب ۲۵ درجه	$\leq 60$ دقیقه
چگالی g/cm <sup>3</sup>	۰/۶۲
pH محلول ۰/۱	۶-۷

در روابط بالا  $\rho_{nf}$  و  $\mu_{nf}$  چگالی و لزجت نانو یا میکرو سیال،  $\rho_{np}$  و  $\mu_{np}$  چگالی و لزجت نانو یا میکرو ذره و  $\rho_{bf}$  و  $\mu_{bf}$  چگالی و ویسکوزیته سیال پایه می‌باشند. مقدار کاهش پسا بر اساس درصد افت فشار در طول اضافه کردن میکرو پلیمر و نانو پلیمر، نسبت به حالت آب خالص از طریق معادله زیر بیان می‌شود [۳۰]:

$$DR\% = \frac{\Delta P_{\text{آب}} - \Delta P_{\text{پلیمری}}}{\Delta P_{\text{آب}}} \times 100\% \quad (7)$$

### ۳- نتایج

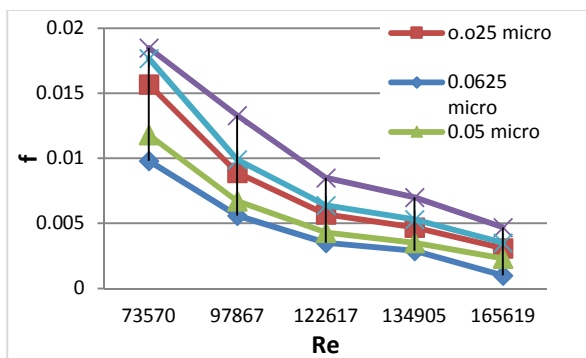
در این تحقیق ابتدا جریان آب خالص بدون مواد افزودنی، در سرعت‌های مختلف وارد چرخه می‌شود و افت فشار جریان اندازه‌گیری می‌شود تا کاهش افت فشار بررسی شود. با بدست آوردن افت فشار با استفاده از روابط موجود ضریب اصطکاک در سرعت‌های مختلف بدست می‌آید. تاثیر افزایش دبی سیال در یک غلظت خاص بر میزان کاهش ضریب اصطکاک در شکل ۲ نشان داده شده است. با افزایش سرعت سیال میزان آشفتگی جریان بالا می‌رود و در نتیجه زنجیره‌های عامل پلیمری کاهنده درگ بهتر باز شده و کارایی مولکول‌های منبسط شده در غلبه بر اصطکاک جریان در دیواره بالاتر می‌رود. برای انجام این آزمایشات آب خالص و محلول پلیمری با پنج سرعت مختلف وارد لوله شده است تا بتوان با توجه به قطر لوله و تعریف عدد رینولدز، شرایط جریان مغشوش را ایجاد کرد.



شکل ۲ - درصد کاهش پسا در رینولدزهای مختلف

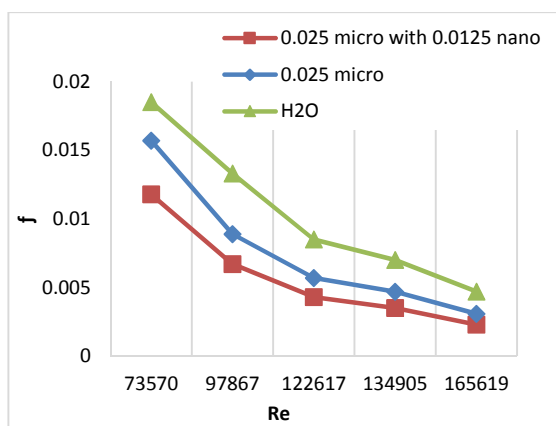
در مرحله بعد، مراحل انجام آزمایش با محلول پلیمری مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمایش‌ها مطابق آنچه که قبلاً گفته شد در غلظت‌های مختلف میکرو پلیمر و غلظت‌های ترکیبی میکرو و نانو پلیمر انجام گرفته است. برای بررسی اثر غلظت بر تغییرات رفتار سیستم، از چهار غلظت مختلف ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۶۲۵ و ۰/۰۷۵ در حالت میکرو پلیمر استفاده شده است. آزمایش‌های انجام شده حاکی از آن است که با افزایش غلظت عامل کاهنده پسا در جریان، به شرطی که خواص سیال عوض نشود، میزان کاهش پسا بالاتر رفته و در نتیجه ضریب اصطکاک پایین‌تر می‌آید. دلیل این امر به خاطر این است که مقادیر بیشتر عامل کاهنده پسا ضمن درگیر شدن با گردابه‌ها باعث نابودی آنها شده و کاهش پسا بیشتر می‌شود. این روند در تمامی دبی‌های مورد آزمایش، درون لوله افقی و در

دماهای مختلف مشاهده شد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل ضریب اصطکاک در رینولدزهای مختلف برای غلظت‌های مختلف محلول میکرو پلیمر نشان داده شده و با ضریب اصطکاک آب خالص مقایسه شده است. چنانچه در شکل مشاهده می‌گردد غلظت ذرات پلیمری افزوده شده به سیال باید حد بهینه‌ای داشته باشد چرا که در غلظت‌های خیلی زیاد، ماده کاهنده درگ نقش عکس داشته و با افزایش لزجت سبب افزایش افت فشار می‌شود. با توجه به شکل شماره ۳ مشخص است که با افزایش غلظت میکرو پلیمر از ۰/۰۶۲۵ به ۰/۰۷۵ ضریب اصطکاک افزایش پیدا کرده است که این بیان کننده این موضوع است که برای حالت میکرو پلیمر، غلظت بهینه، ۰/۰۶۲۵ درصد حجمی می‌باشد که در این غلظت، حدود ۵۸ درصد کاهش پسا مشاهده شده است.

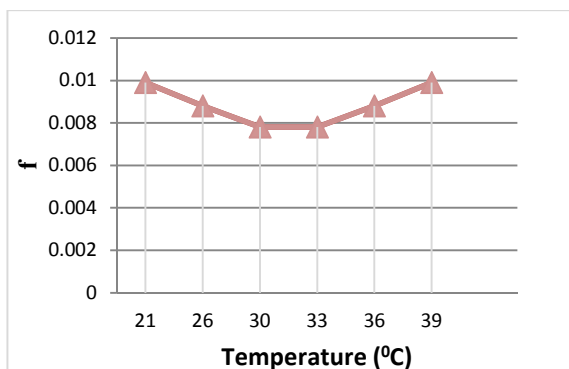


شکل ۳- تغییرات ضریب اصطکاک آب خالص، محلول پلیمری با غلظت ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۶۲۵ و ۰/۰۷۵ میکرو در رینولدزهای مختلف

شکل ۴ نتایج تاثیر اضافه کردن نانو ذرات به محلول میکرو پلیمر را برای غلظت ۰/۰۲۵ میکرو با ۰/۰۱۲۵ نانو نشان می‌دهد. با مشاهده نمودار و مقایسه منحنی‌های محلول ۰/۰۲۵ میکرو و آب خالص با محلول ترکیبی ۰/۰۱۲۵ نانو، مشخص می‌شود که کاهش افت فشار و به تبع آن کاهش پسا بیشتری نسبت به محلول ۰/۰۲۵ میکرو پلیمر ایجاد شده است. کاهش پسا در این حالت حدود ۵۰ درصد است که در محلول با غلظت ۰/۰۲۵ میکرو، حدود ۳۳ درصد است.



شکل ۴- تغییرات ضریب اصطکاک آب خالص، محلول پلیمری با غلظت ۰/۰۲۵ میکرو و ۰/۰۲۵ میکرو با ۰/۰۱۲۵ نانو در رینولدزهای مختلف



شکل ۶ - بررسی عملکرد ماده پلیمری با افزایش دما

در نهایت آنالیز خطا بر اساس محاسبه خطاهای اندازه گیری انجام شده است. عدم قطعیت برای ضریب اصطکاک از خطاهای اندازه گیری دبی سنج، قطر هیدرولیکی و فشارسنج ها بدست می آید. بر اساس آنالیز خطای شرح داده شده توسط مفت<sup>۲</sup> [۳۱] حداکثر خطای اندازه گیری برای ضریب اصطکاک حدود ۲۱ درصد می باشد.

#### ۴ - نتیجه گیری

از نتایج این تحقیق که منطبق بر نتایج آزمایشگاهی متعددی در شرایط مختلف نظیر دبی جریان، غلظت‌های مختلف از ماده کاهنده پسا در مقیاس میکرو و نانو می‌باشد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- افزودن ذرات میکرو پلیمر به جریان باعث کاهش افت فشار و کاهش ضریب اصطکاک پوسته‌ای جریان مغشوش می‌شود.
- ۲- با افزایش غلظت میکرو پلیمر تا غلظت بهینه، میزان کاهش ضریب اصطکاک، افزایش پیدا می‌کند.

۳- اضافه کردن ذرات نانو پلیمر به محلول میکرو، باعث کاهش بیشتر افت فشار و کاهش بیشتر ضریب اصطکاک، نسبت به حالت محلول میکرو پلیمر می‌گردد.

۴- در شرایط آزمایشی با افزایش دما (تا حدود ۳۰ درجه سلسیوس) کارایی عامل کاهنده پسا بالاتر می‌رود. از نقطه نظر بررسی تاثیر دما بر پدیده کاهش درگ، مهمترین مساله نحوه حلالت ماده کاهنده درگ در سیال است که در دماهای بالاتر باز شدن زنجیره پلیمری تسریع شده، اصطکاک بین سیال و لوله را بیشتر کاهش داده و این اجازه به سیستم داده می‌شود که با همان میزان مصرف انرژی سیال بیشتری پمپ شود.

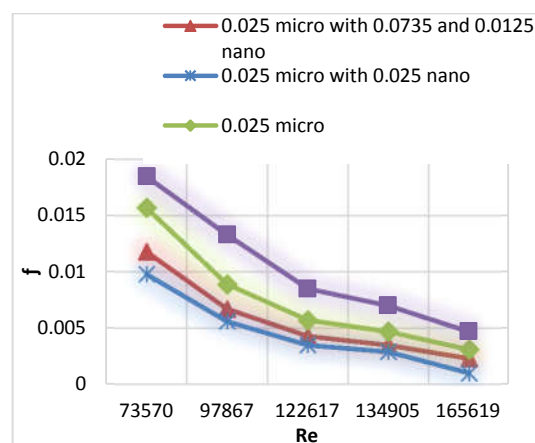
#### ۵ - مراجع

- [1] Choi H., Moin p. and Kim J., Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets. *Journal of Fluid Mech.*, Vol. 255, pp. 503-539, (1993).
- [2] Paschkewitz J. S., Dubief Y., Dimitropoulos C. D., Shaqfeh E. S. G. and Moin P., Numerical simulation of turbulent drag reduction using rigid fibres, *Journal of Fluid Mechanics.*, Vol. 518, pp. 281-317, 2004.
- [3] Josef D., Jung Y., Drag reduction by polymer additives in a turbulent channel flow, *Journal of Fluid Mechanics.* vol. 486, pp. 213-238, 2003.

<sup>2</sup> Moffat

در شکل ۵ ضریب اصطکاک محلول پلیمری ۰/۰۲۵ میکرو با آب خالص و محلول‌های ترکیبی پلیمری با غلظت ۰/۰۲۵ میکرو با ۰/۰۱۲۵ نانو، ۰/۰۲۵ میکرو با ۰/۰۲۵ نانو و ۰/۰۲۵ میکرو با ۰/۰۳۷۵ نانو با یکدیگر مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار نانو ذرات از غلظت ۰/۰۱۲۵ به ۰/۰۲۵، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد و با افزایش غلظت ذرات نانو از ۰/۰۲۵ به ۰/۰۳۷۵ ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد که این نشان‌دهنده نتیجه عکس می‌باشد. با توجه به این نتایج، غلظت بهینه در این حالت، محلول ۰/۰۲۵ میکرو با ۰/۰۲۵ نانو می‌باشد که کاهش پسا ۵۸ درصدی نسبت به آب خالص ایجاد می‌کند. علت این اثر که با افزودن ذرات نانو با غلظت کمتر به محلول، کاهش پسا بیشتر نسبت به حالت میکرو ایجاد می‌شود را می‌توان اینطور توصیف کرد که کاهش اندازه ذرات یک جامد که توأم با افزایش تعداد آنها در واحد جرم می‌باشد، منجر به افزایش سطح مخصوص می‌گردد. به طوری که سطح مخصوص ذراتی با اندازه نانومتری در حدود ۱۰۰۰ برابر سطح مخصوص ذراتی با ابعاد میکرومتر می‌باشد. با کاهش ذرات به حدود نانومتر، درصد بیشتری از اتم‌های آن در نزدیکی سطح قرار می‌گیرند و باعث کاهش پسا بیشتری می‌شوند.

شکل ۶ تاثیر افزایش دما بر عملکرد ماده پلیمری را نشان می‌دهد. برای بررسی این موضوع، میزان افت فشار در پنج دمای مختلف اندازه‌گیری شد و تغییرات ضریب اصطکاک مورد ارزیابی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است با افزایش دما تا دمای ۳۳ درجه سلسیوس عملکرد پلیمرها بهبود و افت فشار و ضریب اصطکاک کمتر می‌شود ولی از دمای ۳۳ درجه سلسیوس به بالا این اثر نتیجه عکس می‌دهد و افت فشار افزایش پیدا می‌کند که این بخاطر تخریب زنجیره پلیمرها در اثر افزایش بیش از حد از دمای بهینه می‌باشد.



شکل ۵ - تغییرات ضریب اصطکاک آب خالص، محلول پلیمری با غلظت ۰/۰۲۵ میکرو، ۰/۰۲۵ میکرو با ۰/۰۱۲۵ نانو، ۰/۰۲۵ میکرو با ۰/۰۲۵ نانو و

۰/۰۲۵ میکرو با ۰/۰۳۷۵ نانو در رینولدزهای مختلف

- [۲۶] نادری ع.، مولا د.، اثر پلیمرها بر کاهش افت فشار در جریان‌های دو فازی در لوله‌های افقی، ص ۳۱-۳۰، اولین همایش ملی تخصصی گاز ایران، دانشگاه شیراز، ۱۳۸۵.
- [27] Subbarao Ch.V., King P., BhaskaraSarma C., Prasad V. S. R. K., Drag reduction by Polymer additives in gravity driven flow, International Journal Of Applied Engineering Research, Dindigul., Vol.1, No. 3, pp. 452-468, 2010.
- [28] Jhanmyry M., Bahrain A., New techniques for drag reduction objects immersed in a fluid, Mechanical Engineering .Vol. 4, pp. 14-27, 2011.
- [29] Krochak p., Holm R., Drag Reduction Characteristics of Micro-Fibrillated Cellulose Suspensions, Innventia AB, Drotting Kristinas Vag 61, Box 5604, SE-11486 Stockholm,Sweden, 2011.
- [30] Kostic M., Friction and Heat Transfer Characteristics of Silica and CNT Nano fluids in a Tube Flow, Proceeding of the 8<sup>th</sup> International Conference on Energy & Environment (EE13), Rhodes Island, Greece July 16-19. ISBN: PP. 960-978, 312-474, 2013.
- [31] Moffat R.J., Describing the uncertainties in experimental results, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 1, pp. 3-17, 1988.
- [4] Hoyt J.w., Drag reduction by polymers and surfactants, SanDiego State University, SanDiego, California, pp. 413-432, 1990.
- [5] White Ch., Mungal G.Mechanics and Prediction of Turbulent Drag Reduction whit Polymer Additives, Journal of Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 40, pp. 235-256, 2008.
- [6] Dentoonder J.M.J., Hulsen M.A., Kuiken G.D.C., Nieuwstandt F.T.M., Drag reduction By polymer additives in a turbulent pipe flow: numerical and laboratory experiments, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 337, pp. 193-231,1997.
- [7] Lumley J. L., Drag Reduction by Additives, Annual Review of Fluid Mechanics., Vol. 1, pp. 367-384,1969.
- [8] Blatch N. S., Water Filtration at Washington.” Journal of Engineering Mechanics, Trans. ASCE. Vol. 57, pp. 400-408, 1906.
- [9] Toms B.A., Some observation on the flow of linear polymer solution through straight tube at large Reynolds numbers, Proceedings of the First International Congress on Rheology, North Holland, Amsterdam, Vol. 2, pp. 135-141, 1948.
- [10] Mysles K., Flow of Thickened Fluids, US patent 2492173, 1949.
- [11] Oliver D.R., Young Hoon A., Two-phase non-Newtonian flow” Journal of Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Vol.46, pp.106-115, 1968.
- [12] Greskovich, E.J., Shrier, A.L., Pressure drop and hold up horizontal slug flow, Journal of American Institute of Chemical Engineers, Vol.17, pp. 1214-1219, 1971.
- [13] Savins J. G., A Stress-Controlled Drag-Reduction Phenomenon, Journal of Rheological Acta, Vol. 6, Issue 4, pp. 323- 330, 1967.
- [14] Metzner A. B., Reed J. C., Flow of Non-Newtonian Fluids-Correlation of the Laminar, Transition and Turbulent- Flow Regions, Journal of American Institute of Chemical Engineers, Vol. 1, pp. 434-440,1955.
- [15] Patterson G. K., Zakin J. L. and Rodriguez J. M., Drag Reduction: Polymer Solutions, Soap Solutions and Particle Suspensions in Pipe Flow.” Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 61, pp. 22, 1969.
- [16] Virk P. S., Merrill E. W., Mickley H. S., Smith K. A. & Mollo-Christensen E. L., The Toms phenomenon-turbulent pipe flow of dilute polymer solutions, Journal of Fluid Mechanics, Vol.30, pp. 305-328, 1967.
- [17] Lester C.B., The basics of drag reduction, Journal of Oil and Gas, pp. 51- 56, Feb 4, 1985.
- [18] Zakin J. L. and Chang J. L., Non-Ionic Surfactants as Drag Reducing Additives, Journal of Nature Physics Science, Vol. 239, pp. 26-28, 1972.
- [19] Yoon H.K. and Ghajar A. J., A method for correlating the diameter and concentration effect on friction and heat transfer in drag reducing flow, AIAA thermophysics, plasma dynamics& lasers Conference, June 27-29, San Antonio, Texas,1988.
- [20] Mowla D., Hatamipour M.S., Moshfeghian M., A Simple Model for Prediction of Pressure Drop Horizontal Two-Phase Flow, Iranian Journal of Science and Technology. Vol. 15, pp. 177-185, 1991.
- [21] Sylvester N.D. and Brill J.P, Drag-reduction in two-phase annular mist flow of air and water, Journal of American Institute of Chemical Engineers. Vol. 22, pp. 615-617, 1976.
- [22] White A., Heat Transfer Characteristics of Dilute Polymer Solutions in Fully Rough Pipe Flow, Journal of Nature, Vol. 227, pp.486-487, 1970.
- [23] Mowla D., Hatamipour M.S., Moshfeghian M., The Effect of Dilute Polymer Solution on Drag Reduction in Horizontal Two Phase Flow, International Journal for Engineering Analysis and design, Vol. 2(4), pp. 97-105, 1995.
- [24] Ptasnski p.k., Nieuwstadt F.T.M., Experiments in Turbulent Pipe Flow with Polymer Additives at Maximum Drag Reduction, J.M. Burgers Centre for Fluid Dynamics Flow, Turbulence And Combustion., Vol. 66, pp.159-182, 2001.
- [۲۵] صادقی ک.، غلامزاده ن.، کاهش ضریب درگ اجرام با استفاده از پوششهای پلیمری، ص ۷۴۴-۷۳۳، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۹، شماره ۶، دانشگاه تهران، ۱۳۸۴.