

A Review on the Application of Polymers in Drag Reduction in Horizontal Pipelines

Nadia Esfandiari^{1,2*} and Reza Zareinezhad²

1. Department of Chemical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Postal Code 73711-13119, Marvdasht, Iran
2. Young Researchers and Elite Club, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Postal Code 73711-13119, Marvdasht, Iran

Received: 31 August 2019, Accepted: 7 December 2019

Abstract

In recent years, due to the importance of fluid transfer, much attention has been paid to the amount of energy consumption in this field. Much research has been done over the years on controlling energy consumption and optimizing transmission pipelines. By controlling the pressure drop, which is mainly due to the increase of friction and drag coefficient, the energy consumption of the fluid transfer pumps can be reduced and the capacity of the transmission pipelines can be increased. Using drag-reducing agents is one of the most important and simplest ways to overcome some of the energy losses during fluid transfer. Drag-reducing agents include surfactants, polymers, microbubbles, and so on. Polymers are widely used as drag-reducing material, and their usage is a fast and cost-effective solution for making changes in transmission pipelines. At very low concentrations, these materials can significantly reduce the frictional forces in pipelines. The use of drag-reducing polymers is a good alternative to increase the capacity of pipelines. Injection of drag-reducing polymers into the lines, in addition to reduce frictional pressure, increases the operational safety of pipelines, especially in worn-out pipes, and reduces energy consumption in pumps. Due to the remarkable properties of drag-reducing polymers in horizontal pipelines, their application in pipelines has been investigated in this study. Also, the parameters affecting the reduction of friction forces using drag-reducing polymers have been reviewed.

Key Words

polymer,
drag reduction,
pipelines,
turbulent flow,
polymer concentration

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: esfandiari_n@miau.ac.ir

مروری بر کاربرد پلیمرها در کاهش پسار در خطوط لوله افقی

نادیا اسفندیاری^{۱*}، رضا زارعی نژاد^۲

۱- گروه مهندسی شیمی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، کد پستی ۱۳۱۱۹-۷۳۷۱۱، مرودشت، ایران
۲- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، کد پستی ۱۳۱۱۹-۷۳۷۱۱، مرودشت، ایران

دریافت: ۱۳۹۸/۶/۹، پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۱۶

در سال‌های اخیر، با توجه به اهمیت انتقال سیالات توجه زیادی به مقدار مصرف انرژی در این زمینه شده است. بخش عمده‌ای از پژوهش‌ها در این سال‌ها درباره کنترل مصرف انرژی و نیز بهینه‌سازی خطوط لوله انتقال انجام گرفته است. با کنترل کاهش فشار که عمدتاً ناشی از افزایش اصطکاک و ضریب پسار است، می‌توان مصرف انرژی پمپ‌های انتقال‌دهنده سیالات را کاهش داده و ظرفیت خطوط لوله انتقال را افزایش داد. استفاده از مواد کاهنده پسار از جمله مهم‌ترین و ساده‌ترین روش‌ها برای غلبه بر بخشی از تلفات انرژی به هنگام انتقال سیالات است. مواد کاهنده پسار شامل سطح‌فعال‌ها، پلیمرها، میکروحباب‌ها و غیره هستند. پلیمرها به‌عنوان مواد کاهنده پسار کاربرد فراوانی دارند و استفاده از آن‌ها راه‌حل سریع و مقرون به صرفه‌ای برای ایجاد تغییرات در خطوط لوله انتقال است. این مواد با غلظت‌های بسیار کم می‌توانند نیروهای اصطکاک را به مقدار درخور توجهی در خطوط لوله کاهش دهند. استفاده از پلیمرهای کاهنده پسار جایگزین مناسبی برای افزایش ظرفیت خطوط لوله است. تزریق پلیمرهای کاهنده پسار در خطوط، افزون بر کاهش فشار اصطکاکی سبب افزایش امنیت عملیاتی خطوط لوله، به‌ویژه در لوله‌های فرسوده شده و به کاهش مصرف انرژی در پمپ‌ها منجر می‌شود. با توجه به ویژگی‌های درخور توجه پلیمرهای کاهنده پسار در خطوط لوله افقی، در این مطالعه کاربرد آن‌ها در خطوط لوله بررسی شده است. همچنین، پارامترهای موثر بر کاهش نیروهای اصطکاک با استفاده از پلیمرهای کاهنده پسار مرور شده است.

بسیار ش
فصلنامه علمی
سال دهم، شماره ۲
صفحه ۱۲-۳، ۱۳۹۹
ISSN: 2252-0449

چکیده



نادیا اسفندیاری



رضا زارعی نژاد

واژگان کلیدی

پلیمر،
کاهش پسار،
خطوط لوله،
جریان متلاطم،
غلظت پلیمر

با افزایش تقاضای جهانی برای انرژی، انتقال منابع انرژی از منطقه تولید به محل‌های مصرف، بسیار ضروری است. نفت خام و مشتقات آن که هنوز منبع اصلی انرژی هستند، در بسیاری از موارد در فاصله‌های طولانی و با لوله‌هایی در اندازه‌های مختلف حمل می‌شوند [۱]. نیروی مقاوم در برابر جریان یافتن سیال یا نیروی پَسار (drag force) همواره در بحث حرکت سیال حائز اهمیت است. وجود پَسار اصطکاکی انرژی زیادی به فرایند انتقال سیال تحمیل می‌کند. به‌طور کلی، کاهش فشار در طول خطوط لوله ناشی از دو عامل اتلاف اصطکاکی میان سیال و دیواره لوله و ایجاد گردابه‌های بزرگ در جریان متلاطم سیال است. از این‌رو، پژوهشگران برای بهبود سامانه طراحی و کاهش انرژی مورد نیاز روش‌های مختلفی از جمله کاهش گرانشی، استفاده از مواد کاهنده پَسار و غیره را پیشنهاد کرده‌اند [۲]. با افزودن مقداری عامل کاهنده پَسار (DRP)، اصطکاک میان جریان عبوری از خط لوله و جداره کاهش یافته و سرعت جریان افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، مواد افزودنی کاهنده پَسار، شامل پلیمرها، سطح‌فعال‌ها، نانوذرات و میکروحباب‌ها هستند [۳]. از آنجا که برخی از پلیمرها دارای قابلیت اثرگذاری بر کاهش فشار و احتمالاً الگوهای جریانی هستند، مطالعه پلیمرهای کاهنده پَسار در جریان سیال عبوری از خط لوله، نه تنها در طراحی تجهیزات فرایند، بلکه به درک قابلیت پلیمرها در کاهش فشار طی حمل و نقل سیال در مسافت‌های طولانی در صنایع نفت و گاز کمک می‌کند [۴]. پلیمرها وقتی به مقدار اندک به سیال اضافه شوند، با اثرگذاری بر رئولوژی سیال و تغییر الگوی جریان، می‌توانند از کاهش فشار سیال در طول خط لوله بکاهند [۵]. کاهش پَسار (DR) از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$DR = \frac{\Delta P - \Delta P_{DRP}}{\Delta P} \quad (1)$$

که در آن، ΔP کاهش فشار در نبود پلیمر کاهنده پَسار و ΔP_{DRP} کاهش فشار در مجاورت آن است.

در پژوهش‌های متعددی به بررسی مقدار کاهش پَسار در خطوط لوله افقی با استفاده از افزودنی‌های پلیمری پرداخته شده است. اندیشه افزودن برخی ترکیبات به منظور جبران کاهش فشار سیال عبوری از یک خط لوله، نخستین بار توسط Blatch [۶] مطرح شد. پس از وی تا مدت‌ها این موضوع مورد توجه پژوهشگران قرار نگرفت تا اینکه Toms [۷] نخستین بار با افزودن مقدار کمی از پلیمری با وزن مولکولی زیاد متوجه شد، در الگوی جریان درون

لوله تغییرات درخور توجهی ایجاد شده که باعث کاهش نیروی پَسار بر سطح جامد شده است. در ادامه Sokhal و همکاران [۸] به بررسی کاهش پَسار در جریان دوفازی آب و نفت با استفاده از زیست‌پلیمر صمغ گیاه گوار در لوله افقی پرداختند. نتایج، اثر مثبت این نوع زیست‌پلیمر بر مقدار کاهش پَسار را نشان داد. عشرتی و همکاران [۹] به بررسی تجربی مخلوط‌های مختلف پلیمرها در لوله افقی دارای جریان دوفازی آب و نفت پرداختند. همه پلیمرهای استفاده‌شده، آنیونی و محلول در آب بودند. نتایج نشان داد، با افزایش وزن مولکولی پلیمرها مقدار DR افزایش می‌یابد. خادوم و همکاران [۱۰] اثر پلی‌آکریل آمید را به‌عنوان عامل کاهنده پَسار در خطوط لوله حاوی نفت خام بررسی کردند. در این پژوهش، غلظت عامل کاهنده پَسار، قطر لوله و سرعت جریان به‌عنوان متغیرهای اثرگذار بر مقدار کاهش پَسار مطالعه شدند. مشاهده شد، سرعت جریان و غلظت پلیمر بر فرایند اثر مستقیم و قطر لوله اثر معکوس دارد. اسفندیاری و همکاران [۱۱] در پژوهشی به بررسی و بهینه‌سازی کاهش پَسار در جریان متلاطم سیال نیوتونی عبوری از خطوط لوله افقی با استفاده از نانوذرات نورکاتالیزگر مغناطیسی عامل‌دار شده و لسیترین پرداختند. این پژوهش بر مبنای روش پاسخ سطحی طرح‌ریزی شده و با بهینه‌سازی هم‌زمان تمام عوامل موثر بر مقدار کاهش پَسار (غلظت نانوذره، غلظت پلیمر، عدد رینولدز و pH) مقدار کاهش پَسار در خور توجیه ۹۹٪ حاصل شد. سامانه انتقال نفت آلاسکا [۸] یکی از مثال‌های به‌کارگیری مواد کاهنده پَسار به‌طور تجاری است. در سال ۱۹۷۹ به‌دلیل افزایش ناگهانی سرمایه‌های هوا، خطوط انتقال این منطقه با کاهش فشار زیادی مواجه شد. به‌دلیل تاخیر در نصب دو ایستگاه تقویت فشار، به‌طور موقت از برخی پلیمرهای کاهنده پَسار به‌منظور جبران کاهش فشار استفاده شد. کاربرد این مواد به حدی موفقیت‌آمیز بود که نصب ایستگاه‌های تقویت فشار به‌کلی متوقف شد. برخی محلول‌های پلیمری استفاده‌شده در فرایند کاهش پَسار در جدول ۱ آورده شده است.

سرعت جریان عبوری، قطر و زبری نسبی خط لوله، پایداری الکترواستاتیکی و ترمودینامیکی سیال و غلظت افزودنی‌های پلیمری از جمله عوامل موثر بر فرایند کاهش پَسار در خطوط لوله افقی شناخته می‌شوند [۱۳]. همچنین پلیمرهایی که به‌عنوان کاهنده پَسار استفاده می‌شوند باید دارای ویژگی‌هایی نظیر وزن مولکولی زیاد، ساختار بلندزنجیر انعطاف‌پذیری زیاد و امتزاج‌پذیری با سایر ترکیبات پلیمری باشند [۱۴]. در ادامه به بررسی عوامل موثر بر فرایند کاهش پَسار و خواص پلیمرهای استفاده‌شده پرداخته می‌شود.

جدول ۱- برخی محلول‌های پلیمری کاهنده پَسار [۱۲].

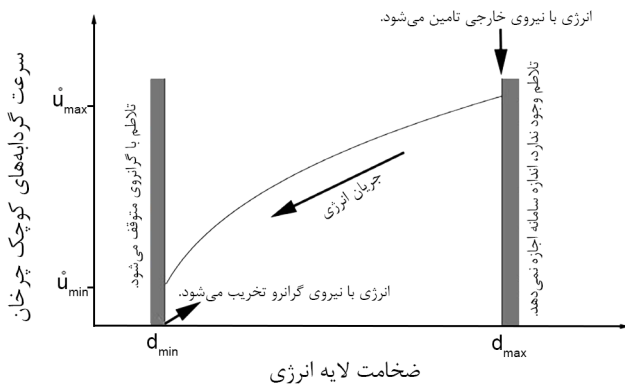
پلیمرهای حل‌شونده در	
حلال	آب
پلی‌ایزوبوتیلن	پلی‌اتیلن اکسید
پلی‌استیرن	پلی‌آکریل آمید
پلی‌متیل متاکریلات	صمغ گوار
پلی‌دی‌متیل سیلوکسان	صمغ زانتان
پلی‌سیس‌ایزوپرن	کربوکسی‌متیل سلولوز

اثر سرعت جریان

با افزایش سرعت‌های جریان و سیال، به دلیل افزایش اغتشاش و تلاطم جریان بستری مناسب برای باز شدن زنجیرهای پلیمرهای کاهنده پَسار فراهم می‌شود، در نتیجه DR افزایش می‌یابد. البته این یک قاعده کلی نیست و بسته به نوع الگوی جریان و ماده کاهنده پَسار، رفتار می‌تواند متفاوت باشد. علت افزایش پَسار با جریان متلاطم را می‌توان به سرعت و تحرک بیشتر گردابه‌ها و شانس بیشتر پلیمرها در برخورد با آن‌ها در جریان با سرعت بیشتر نسبت داد. زیرا، وقتی پلیمرهای کاهنده پَسار شانس بیشتری در برخورد با گردابه‌ها داشته باشند، راحت‌تر می‌توانند آن‌ها را تخریب کنند که کاهش اصطکاک و در نتیجه کاهش پَسار را به دنبال دارد [۱۰]. در شکل ۱ نمودار تغییرات مقدار کاهش پَسار با تغییرات سرعت جریان در غلظت‌های مختلف پلی‌آکریل آمید نشان داده شده است.

اثر قطر لوله با پلیمرهای کاهنده پَسار

مطابق قانون Kolmogorov نسبت طول به حداقل ضخامت لایه انرژتی با توان ۰/۷۵ رینولدز متناسب است:



شکل ۲- نیم‌رخ لایه انرژی در جریان متلاطم [۱۵].

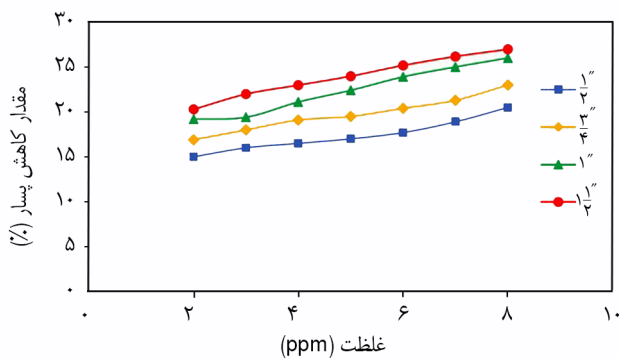
$$\frac{L}{d_{\min}} = Re^{\frac{3}{4}} \quad (2)$$

بنابراین، ضخامت لایه انرژی تابعی از الگوی جریان و طول خط لوله است. حال در شرایط ثابت، هرچه قطر خط لوله افزایش یابد، گردابه‌های بیشتر و بزرگ‌تری در بالای لایه انرژی تشکیل می‌شود که انرژی جریان اصلی را تخریب می‌کند. در حالی که در لوله‌های با قطر کمتر، گردابه‌های کمتر و کوچک‌تری تشکیل می‌شود که مقدار تخریب انرژی کمتری دارند (شکل ۲) [۱۵].

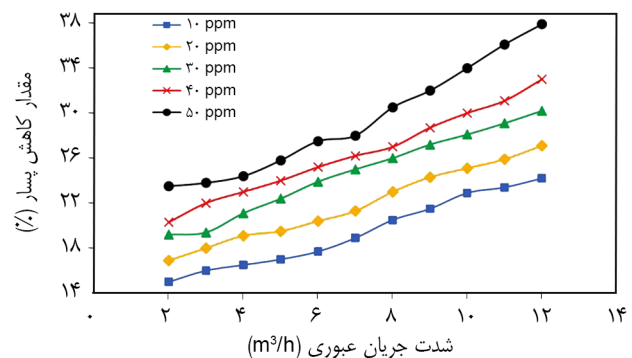
به‌طور کلی می‌توان گفت، مقدار کاهش پَسار در لوله‌هایی با قطر کوچک‌تر نسبت به لوله‌های با قطر بزرگ‌تر بیشتر است (شکل ۳) که دلیل آن را می‌توان اندازه گردابه‌هایی عنوان کرد که انرژی کافی برای غلبه بر مقاومت گرانیوی دریافت نمی‌کنند [۱۶].

اثر تغییرات الگوی جریان

شکل ۴ نشان می‌دهد، کاهش پَسار با افزایش عدد رینولدز (و



شکل ۳- اثر قطر لوله بر مقدار کاهش پَسار در غلظت‌های مختلف نانوسیال متشکل از نانوسیلیکا و سدیم دودسیل سولفات [۱۶].



شکل ۱- اثر سرعت جریان حجمی بر کاهش پَسار در غلظت‌های مختلف پلی‌آکریل آمید در لوله‌ای با قطر داخلی $m \times 10^{-2} 2/54$ [۱۰].

نشان داد، کاهش پسا در حالت شیب صفر، بیش از حالت شیب دار است. به همین ترتیب، السرخ و همکاران [۱۸] آزمایش جریان هوا-آب را برای تعیین اثر تنش لوله و عملکرد پلیمرهای کاهنده پسا انجام دادند. نتایج نشان داد، در شیب زاویه $1/28^\circ$ و غلظت پلیمر 100 ppm ، حداکثر مقدار کاهش پسا 71% بود، در حالی که برای شیب زاویه بیش از $2/4^\circ$ کمترین کاهش پسا، به دست آمد. آن‌ها نتیجه گرفتند، به طور کلی، در شیب بیشتر، DR کم می‌شود. جدا از اثر شیب لوله بر مقدار کاهش پسا، الگوهای جریان سیال نیز تحت تاثیر آن قرار می‌گیرند [۱۹].

اثر دما و pH

اثر دما و pH بر کاهش پسا توسط Shi و همکاران [۲۰] بررسی شده است. مقدار 30 ppm از دو پلیمر پلی اتیلن اکسید و پلی آکریل آمید نیمه آبکافتی در یک جریان متلاطم لوله با قطر داخلی 14 mm و عدد رینولدز 10^5 استفاده شد. این مطالعه نشان داد، با افزایش دما در بازه 5°C تا 35°C ، DR به وسیله پلی اتیلن اکسید از 70% تا 50% تغییر می‌کند. آن‌ها این کاهش را به کم شدن حل پذیری مولکول‌های پلیمری در نتیجه افزایش دما نسبت دادند. در همین حال، کاهش پسا به شدت به pH محلول بستگی دارد. محلول‌های پلیمری قلیایی باعث کاهش پسا بیشتر نسبت به محلول‌های پلیمری اسیدی می‌شوند. این پژوهشگران، علت آن را ترکیب پیچه (coil) پلیمر در محلول بیان کردند. در مطالعه دیگری، محلول دارای نمک سالیسیلیک سدیم به عنوان محلول پایه برای آزمایش در نظر گرفته شد. برای اثر دمای استفاده از پلی ایزوبوتیلن $1/25$ در محدوده دمای 30°C تا 50°C مشاهده شد، کاهش پسا با ازدیاد دما تا 45°C افزایش می‌یابد که حداکثر 33% کاهش حاصل می‌شود. با وجود این نمی‌توان مطمئن شد، آیا روند مشابه دما و pH برای همه پژوهش‌ها درست است، چرا که آثار منتشر شده درباره این پارامترها بسیار محدود است. در غلظت پلیمر ثابت 60 ppm ، با افزودن دما از 25°C تا 45°C ، مقدار کاهش پسا، کاهش یافت. در دمای بحرانی 35°C مقدار کاهش پسا به بیش از 50% رسید [۲۱].

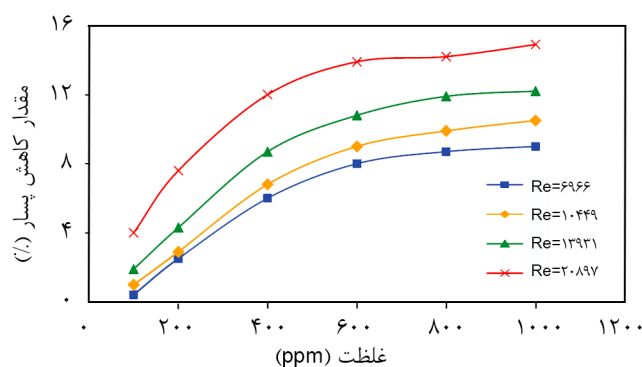
اثر غلظت پلیمرها

در پژوهشی که ابوبکر و همکاران [۲۲] انجام دادند، اثر غلظت کوپلیمر آنیونی پلی آکریل آمید و ۲-آکریل آمید-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید بر مقدار کاهش پسا مطالعه شد. نتایج نشان داد، با افزایش غلظت پلیمرهای کاهنده پسا، DR تا حد معینی افزایش

در نتیجه افزایش تلاطم جریان) افزایش می‌یابد. البته این موضوع یک قاعده کلی نیست و متاثر از نوع سیال و ماده کاهنده پسا می‌تواند رفتار متفاوتی را نشان دهد [۱۶]. جریان متلاطم در دیواره لوله به سه لایه ناحیه لگاریتمی، لایه بافر و زیرلایه گرانو تقسیم‌بندی می‌شود. نزدیک‌ترین لایه به دیواره، زیرلایه گرانو است که ضخامت آن با افزایش عدد رینولدز، کاهش می‌یابد. در این ناحیه اثر غالب، اثر گرانروی مولکولی است. با افزایش عدد رینولدز ساختارهای گردابه‌ای جریان متلاطم به درون این لایه نفوذ کرده و حرکت غیردائمی، ولی منظم، ایجاد می‌کنند. این جریان منظم عبارت از نوارهای سرعت زیاد و کم است که رگه (streak) نام دارند و در امتداد جهت اصلی جریان، یک در میان قرار گرفته‌اند. در بین این نوارها گردابه‌هایی ایجاد می‌شوند که هم‌محور با جهت اصلی جریان هستند. هرچه این گردابه‌ها از دیواره دور شوند، محور آن‌ها در راستای مرکز لوله جهت‌گیری می‌کنند. اغلب گردابه‌ها با جهت جریان زاویه 45° می‌سازند. از آنجا که ساختارهای رگه‌ای نقش اساسی در فرایند استخراج انرژی جنبشی از میدان متوسط و تزریق آن به میدان متلاطم و در نتیجه ایجاد تلاطم دارند، بنابراین وجود آن‌ها برای استمرار تلاطم در لایه مرزی ضروری است. از این رو می‌توان استنباط کرد، ازدیاد تلاطم جریان، اغلب به افزایش ساختارهای رگه‌ای و انرژی جنبشی و در نتیجه کاهش پسا منجر می‌شود [۱۱].

اثر شیب لوله

شیب زاویه لوله می‌تواند DR قابل دست‌یابی جریان عبوری را تحت تاثیر قرار دهد. به عنوان مثال، نتایج پژوهش Zhong و همکاران [۱۷] در مطالعه تجربی جریان گاز-مایع در یک لوله با قطر 10 cm و شیب 2° به طور افقی با استفاده از پلیمر کاهنده پسا



شکل ۴- اثر تغییرات الگوی جریان بر مقدار کاهش پسا در غلظت‌های مختلف [۱۶].

افزودن پلیمر در غلظت زیاد باعث تغییر رفتار فاز آبی به شکل غیرنیوتنی می‌شود. نتایج آزمایش‌ها در سامانه دوفازی آب-نفت نشان داد، غلظت ۲۰ ppm پلیمر در کاهش پسمان بسیار موثرتر از غلظت ۵۰ ppm آن است. پلیمر با غلظت ۲۰ ppm کاهش بیشتری در کشش سطحی میان نفت، آب و دیواره ایجاد می‌کند [۲۵]. در سامانه آب-نفت با کسرهای حجمی متفاوت ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ از نفت مقدار کاهش پسمان در غلظت‌های متفاوت از زیست‌پلیمر گوار از ۱۰ ppm تا ۵۰ ppm اندازه‌گیری شد. در تمام آزمایش‌ها با افزایش غلظت پلیمر، کاهش پسمان مشاهده شد. در کسر حجمی ۰/۷ از نفت، روند متغیر می‌شود. بیشترین کاهش پسمان در غلظت ۳۰ ppm پلیمر مشاهده شد. هنگامی که درصد حجمی نفت از ۰/۱ به ۰/۳ افزایش یافت، حداکثر مقدار کاهش پسمان از ۵۰٪ به ۴۸/۷٪ در غلظت ۵۰ ppm پلیمر مشاهده شد. با توجه به اینکه زیست‌پلیمر به کاررفته در این مطالعه، حل‌پذیر در آب است و اثر بیشتری بر فاز آب دارد، زمانی که کسر حجمی نفت کمتر از ۰/۵ است، با افزایش غلظت پلیمر، مقدار DR افزایش می‌یابد. بنابراین، هنگامی که کسر حجمی نفت افزایش می‌یابد، اثر پلیمر کاهش پیدا می‌کند [۸].

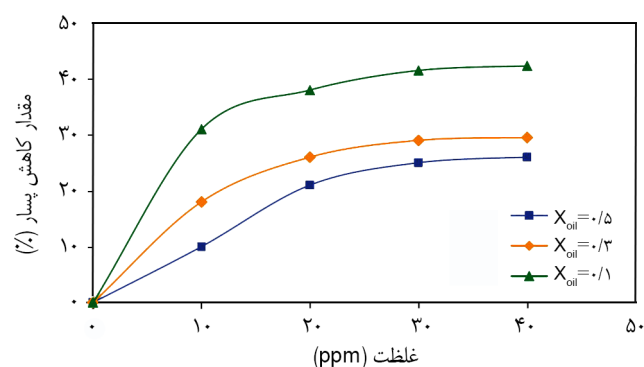
اثر وزن مولکولی پلیمر

پژوهش‌های بسیاری درباره اثر وزن مولکولی پلیمرهای کاهنده پسمان بر مقدار کاهش پسمان انجام شده است. اغلب این پژوهش‌ها بر این موضوع توافق دارند، مقدار کاهش پسمان با ازدیاد وزن مولکولی پلیمرها، افزایش می‌یابد. Martin و همکاران [۲۶] اثر وزن مولکولی پلی‌ایزوبوتیلن محلول در نفت را بر مقدار کاهش پسمان جریان متلاطم در یک لوله افقی شیشه‌ای به قطر داخلی ۳/۰۲ mm بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند، اثرگذاری پلی‌ایزوبوتیلن با ازدیاد وزن مولکولی افزایش می‌یابد. بیشترین وزن مولکولی پلیمر مدنظر، نیروی پسمان را تا ۷۰٪ کاهش می‌دهد. در پژوهشی دیگر که توسط ابوبکر و همکاران [۱۳] انجام شد، اثر پارامترهای مختلف از جمله وزن مولکولی بر مقدار کاهش پسمان در جریان تک‌فازی دارای آب بررسی شد. در این پژوهش، آن‌ها از پلیمرهای غیریونی پلی‌آکریل آمید و پلی‌آکریل آمیدهای آنیونی و کاتیونی با وزن‌های مولکولی و چگالی بارهای مختلف استفاده کردند. جدول ۲ خواص پلیمرهای استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

آزمایش‌ها نشان دادند، با افزایش وزن مولکولی پلیمرها، مقدار کاهش پسمان افزایش می‌یابد (شکل ۶). دلیل آن این‌گونه بیان شد، افزایش وزن مولکولی در این پژوهش از راه طولانی کردن زنجیر پلیمرها و خطی کردن آن‌ها انجام شده است. کاهش پسمان بستگی به

می‌یابد (شکل ۵). زیرا با افزایش غلظت عامل کاهنده پسمان، مقدار پلیمرها در محلول افزایش می‌یابد. این موضوع باعث درگیر شدن پلیمرها با گردابه‌ها و از بین رفتن بیشتر آن‌ها در جریان سیال می‌شود که در نتیجه DR افزایش می‌یابد. از سویی، اگر غلظت پلیمر از مقدار معینی بیشتر باشد، پلیمرهای کاهنده پسمان نقش عکس دارند و افزایش گرانیروی باعث ازدیاد نیروهای مقاوم می‌شوند. اثر افزودن پلی‌آکریل آمید و پلی‌اتیلن اکسید به عنوان پلیمرهای محلول در آب و پلی‌ایزوبوتیلن به عنوان پلیمر محلول در نفت در کاهش پسمان در امولسیون آب-نفت بررسی شده است. نتایج نشان داد، افزودن غلظت پلیمر، باعث بیشتر شدن مقدار کاهش پسمان می‌شود [۲۳]. عشرتی و همکاران [۹] سه پلیمر آنیونی AN 125، AN 125-VLM و SH را مطالعه کردند. در هر سه پلیمر با افزایش غلظت پلیمر، افزایش کاهش پسمان مشاهده شد. در غلظت ثابتی از پلیمرها، AN 125-SH کاهش پسمان بیشتری را نسبت به AN 125 و AN 125-VLM نشان داد. حداکثر کاهش پسمان در غلظت ۳۰ ppm از این پلیمرها مشاهده شد.

Yang و همکاران [۲۴] اثر سه پلیمر پلی‌اتیلن اکسید، پلی‌آکریل آمید و صمغ زانتان را بر کاهش پسمان مطالعه کردند. آن‌ها مشاهده کردند، در هر سه پلیمر با افزایش دوبرابری غلظت (از ۲۵ ppm به ۵۰ ppm) کاهش پسمان بیشتر می‌شود. بیشترین کاهش پسمان را پلی‌آکریل آمید، پس از آن پلی‌اتیلن اکسید و در نهایت صمغ زانتان نشان داد. خادوم و همکاران [۱۰] اثر پلی‌آکریل آمید را به عنوان عامل کاهنده پسمان در خطوط لوله نفت خام بررسی کردند. غلظت DRP، قطر لوله و سرعت جریان به عنوان متغیرهای اثرگذار بر مقدار کاهش پسمان مطالعه شدند. بیشترین مقدار کاهش پسمان (۴۶/۶۴٪) در لوله‌ای با قطر داخلی ۰/۰۵۰۸ m و غلظت ۵۰ ppm از پلیمر پلی‌آکریل آمید مشاهده شد.



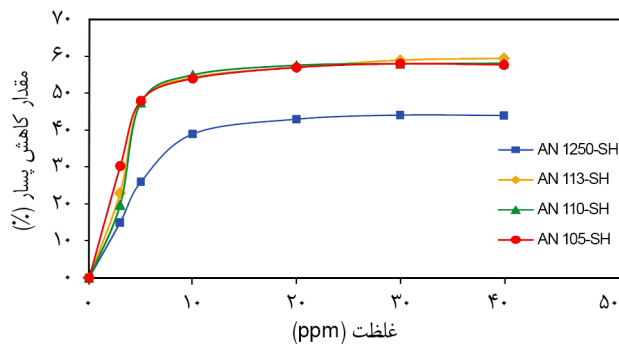
شکل ۵- اثر تغییرات غلظت بر مقدار کاهش پسمان در درصد‌های حجمی نفت بین ۰/۱ تا ۰/۵ [۲۲].

جدول ۲- خواص برخی پلیمرهای کاهنده پسمان [۱۳].

خاصیت		نوع پلیمر	
وزن مولکولی (kg.kmol ⁻¹)	چگالی بار (%)		
۹/۹۶۳-۱۳/۲۸۴×۱۰ ^{-۲۷}	۵	AN 105	پلیمرهای آنیونی
۱۹/۹۲۶×۱۰ ^{-۲۷}	۵	AN 105-SH	
۹/۹۶۳-۱۳/۲۸۴×۱۰ ^{-۲۷}	۱۰	AN 110	
۹/۹۶۳-۱۳/۲۸۴×۱۰ ^{-۲۷}	۱۳	AN 113	
۱۹/۹۲۶×۱۰ ^{-۲۷}	۱۳	AN 113-SH	
۳/۳۲۱×۱۰ ^{-۲۷}	۲۵	AN 125-VLM	
۹/۹۶۳-۱۳/۲۸۴×۱۰ ^{-۲۷}	۲۵	AN 125	
۱۹/۹۲۶×۱۰ ^{-۲۷}	۲۵	AN 125-SH	
۹/۹۶۳-۱۳/۲۸۴×۱۰ ^{-۲۷}	۱۰	FO 4190	پلیمرهای کاتیونی
۹/۹۶۳-۱۳/۲۸۴×۱۰ ^{-۲۷}	۱۰	FO 4190-SH	
۸/۳۰۳-۱۱/۶۲۴×۱۰ ^{-۲۷}	۴۵	FO 4550-SH	
۹/۹۶۳-۱۳/۲۸۴×۱۰ ^{-۲۷}	۰	P 100	پلیمر غیر یونی

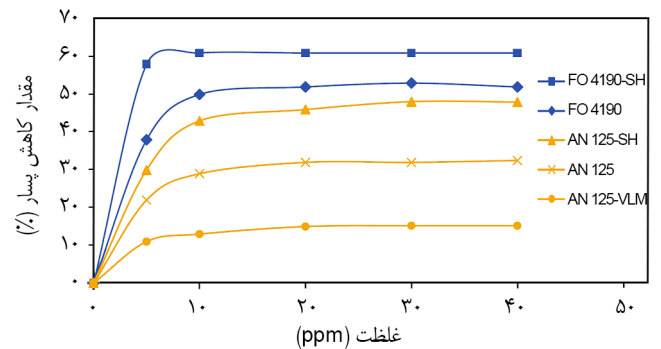
اثر چگالی بار پلیمرها

از پارامترهای موثر بر کاهش پسمان، چگالی بار پلیمر است. اثر افزایش چگالی بار (۵٪ تا ۲۵٪) پلیمرهای آنیونی با وزن مولکولی $9/963-13/284 \times 10^{-27}$ kg/kmol نشان داد، کاهش پسمان با افزایش چگالی بار تا حدود ۱۳٪ تغییر چندانی نمی‌کند، اما با افزایش چگالی بار مقدار کاهش پسمان کم می‌شود. به طوری که در ناحیه‌هایی از نمودار که شیب صفر است، در پلیمر آنیونی (AN 125) با چگالی بار ۲۵٪، نسبت به پلیمرهایی با چگالی بار زیر ۱۳٪ (AN 105) و (AN 113)، کاهش پسمان حدود ۲۰٪ کمتر است (شکل ۷) [۱۳].



شکل ۷- اثر افزایش چگالی بار پلیمرهای آنیونی بر مقدار کاهش پسمان در غلظت‌های مختلف [۱۳].

برهم‌کنش‌های شیمیایی زنجیرهای پلیمرها و جریان متلاطم دارد. زیرا زنجیرهای پلیمری سبب از بین رفتن گردابه‌های بزرگ در جریان متلاطم می‌شود. از این رو، مقدار نیروهای مقاوم به مقدار درخور توجهی کاهش می‌یابد. در این میان پلیمرهای با زنجیر بلند، شانس بیشتری برای برخورد با گردابه‌ها و تخریب آن‌ها در جریان متلاطم دارند. در نتیجه با افزایش وزن مولکولی، که سبب افزایش زنجیرهای پلیمری می‌شود، می‌توان مقدار کاهش پسمان را افزایش داد. افزون بر این، پلیمرهایی با زنجیر کوتاه یا وزن مولکولی کم دچار تخریب مکانیکی می‌شوند که بدین دلیل نمی‌توانند نیروهای پسمان را کاهش دهند [۱۳].



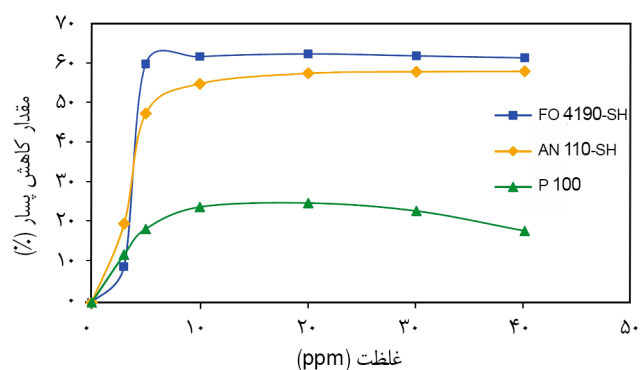
شکل ۸- اثر وزن مولکولی پلیمرها بر مقدار کاهش پسمان [۱۳].

آن‌ها در محلول، در مقایسه با پلیمرهای طبیعی نسبت دادند که با گرانروی ذاتی مشخص می‌شود.

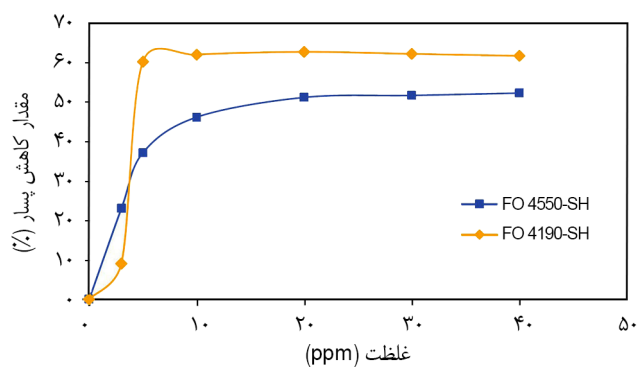
اثر انعطاف‌پذیری زنجیرهای پلیمری

پلیمرها به دو دسته صلب و انعطاف‌پذیر تقسیم می‌شوند. پلیمرهای انعطاف‌پذیر پسار را در سطح بالاتری نسبت به پلیمرهای صلب کاهش می‌دهند. اما به دلیل ناپایداری و خاصیت کشسانی در یکدیگر فرو می‌روند و خواص اولیه را از دست می‌دهند. استفاده هم‌زمان از پلیمرهای صلب و انعطاف‌پذیر نیز در زمینه کاهش پسار کاربرد دارد. البته استفاده از هر یک به‌طور جداگانه موثرتر است [۷].

قابلیت پلیمرهای سخت و انعطاف‌پذیر میله‌مانند، برای کاهش پسار توسط تعدادی از پژوهشگران مطالعه شده است. Sifferman و همکاران [۲۸] آزمایش‌های خود را با تزریق سه پلیمر مختلف (پلی اتیلن اکسید، سدیم کربوکسی متیل سلولوز و صمغ گوار) با غلظت‌های مختلف از ۰/۰۱٪ تا ۰/۳٪ وزنی در یک لوله گالوانیزه با قطر داخلی ۲۷ mm انجام دادند. از سه پلیمر استفاده شده، پلی اتیلن اکسید و صمغ گوار در غلظت ۰/۳٪ زمانی که عدد رینولدز بیش از ۱۰^۵ بود، کاهش پسار تقریباً به ۸۰٪ رسید. برای سدیم کربوکسی متیل سلولوز در همین غلظت و عدد رینولدز کاهش پسار حدود ۶۰٪ بود. این موضوع نشان می‌دهد، سدیم کربوکسی متیل سلولوز به‌خوبی دو پلیمر دیگر نتوانسته نیروهای مقاوم را کاهش دهد. تفاوت اثربخشی این پلیمرها بر مقدار کاهش پسار را می‌توان به انعطاف‌پذیری آن‌ها نسبت داد. به‌خوبی مشخص شده است، پلی اتیلن انعطاف‌پذیرتر از دو پلیمر دیگر است. از این رو انتظار می‌رود، در کاهش پسار موثرتر باشد. در واقع، دو پلیمر کربوکسی متیل سلولوز و صمغ گوار متعلق به گروه نیمه‌انعطاف‌پذیر از پلیمرها هستند. با این حال،



شکل ۹- مقایسه پلیمرهای آنیونی، کاتیونی و غیریونی در غلظت‌های مختلف با چگالی بار یکسان [۱۳].



شکل ۸- اثر افزایش چگالی بار پلیمرهای کاتیونی بر مقدار کاهش پسار در غلظت‌های مختلف [۱۳].

اثر افزایش چگالی بار بر مقدار کاهش پسار در پلیمرهای کاتیونی نیز بررسی شده است. نتایج نشان داد، با افزایش چگالی بار مقدار DR کاهش می‌یابد (شکل ۸). پژوهشگران علت اثر منفی چگالی بار پلیمرها (پلیمرهای آنیونی و کاتیونی) را بر مقدار کاهش پسار این‌گونه بیان کردند که افزایش چگالی بار پلیمرهای یونی تا پیش از رسیدن به مقدار بحرانی می‌تواند اثر مثبتی بر مقدار کاهش پسار داشته باشد. پس از مقدار بحرانی، این افزایش اثر منفی بر عملکرد کاهش پسار می‌گذارد، چرا که تا پیش از رسیدن چگالی بار به مقدار بحرانی، پلیمرها انعطاف‌پذیری و برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی را حفظ می‌کنند. با توجه به اینکه هرچه پلیمرها انعطاف‌پذیرتر باشند، می‌توانند DR را به مقدار بیشتری افزایش دهند، بنابراین مقدار کاهش پسار تا پیش از رسیدن چگالی بار به مقدار بحرانی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، چگالی بار بسیار زیاد سبب می‌شود که پلیمرها انعطاف‌پذیری را از دست دهند و زنجیرهای پلیمرها سخت‌تر شوند. در نتیجه، عملکرد عوامل کاهش پسار، کاهش می‌یابد [۱۳].

اثر ساختار پلیمرها

ابوبکر و همکاران [۱۳] پلیمرهای آنیونی و کاتیونی پلی‌آکریل آمید با پلیمر غیریونی پلی‌آکریل آمید با چگالی بارهای یکسان را با هم مقایسه کردند. نتایج این بررسی، عملکرد ضعیف پلی‌آکریل آمید غیریونی را نسبت به پلیمرهای کاتیونی و آنیونی نشان داد (شکل ۹). از سوی دیگر، افزودن ۱۰٪ گروه‌های باردار شده به شاخه اصلی پلی‌آکریل آمید کاهش پسار را بهبود بخشید. عملکرد بهتر پلیمرهای باردار شده نسبت به پلیمرهای طبیعی توسط McCormick و همکاران [۲۷] مشاهده شد. آن‌ها این برتری پلیمرهای باردار شده را به اندازه هیدرودینامیکی بزرگ‌تر

شد. مخلوط‌های مختلف پلیمرهای آنیونی بررسی شدند. نتایج بررسی‌ها نشان داد، کاهش پسار در مخلوط پلیمرهای با وزن مولکولی زیاد و کم بیش از کاهش پسار در مخلوط پلیمرهای با وزن مولکولی زیاد و متوسط است [۹]. Reis و همکاران [۲۹] نشان دادند، مخلوط پلیمرهای پلی‌آکریل آمید و پروپیل اکسید کارایی بیش از پلی‌آکریل آمید به حالت خالص دارند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی کاربردها و پارامترهای موثر بر مقدار کاهش پسار با استفاده از پلیمرهای کاهنده پسار پرداخته شد. مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر DR به وسیله DRP شامل غلظت، وزن مولکولی، ساختار و انعطاف‌پذیری پلیمر، سرعت جریان، شیب و قطر لوله، دما و pH است. مقدار کاهش پسار با افزایش وزن مولکولی، افزایش زنجیرها، مقدار انعطاف‌پذیری و غلظت پلیمر افزایش می‌یابد. با افزایش قطر و شیب لوله و دما نیز مقدار DR کاهش می‌یابد.

مراجع

1. Sun B., Zhang Z., and Yang D., Improved Heat Transfer and Flow Resistance Achieved with Drag Reducing Cu Nanofluids in the Horizontal Tube and Built-in Twisted Belt Tubes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **95**, 69-82, 2016.
2. Stewart M., *Surface Production Operations*, Gulf Professional, Boston, 639-730, 2016.
3. Zhang W. and Li A., Resistance Reduction via Guide Vane in Dividing Manifold Systems with Parallel Pipe Arrays (DMS-PPA) Based on Analysis of Energy Dissipation, *Build. Environ.*, **139**, 189-198, 2018.
4. Hong C.H., Choi H.J., Zhang K., Renou F., and Grisel M., Effect of Salt on Turbulent Drag Reduction of Xanthan Gum, *Carbohydr. Polym.*, **121**, 342-347, 2015.
5. Tang L., Zeng Z., Wang G., Liu E., Li L., and Xue Q., Investigation on Superhydrophilic Surface with Porous Structure: Drag Reduction or Drag Increasing, *Surf. Coat. Technol.*, **317**, 54-63, 2017.
6. Blatch N.S., Water Filtration at Washington, *J. Eng. Mech.*,

انعطاف‌پذیری پلیمرهای طبیعی سدیم کربوکسیل سلولوز و صمغ گوار با داشتن ساختارهای مشابه، بیشتر شبیه یکدیگر هستند. در حالی که انعطاف‌پذیری پلی‌اتیلن کمی بیش از این ترکیب است. افزون بر این، اثر این دو پلی‌ساکارید ممکن است بر مقدار کاهش پسار افزایش یابد، به ویژه صمغ گوار با پیوند پلی‌آکریل آمید انعطاف‌پذیر به پیکره سخت آن به اندازه پلی‌اتیلن می‌تواند مقدار نیروی‌های پسار را کاهش دهد [۱۹]. در پژوهش انجام‌شده دیگری توسط Yang و همکاران [۲۴]، با مقایسه سه پلیمر مشاهده شد، بیشترین کاهش پسار را در شرایط یکسان پلی‌آکریل آمید و پس از آن پلی‌اتیلن اکسید و در آخر صمغ زانتان دارند. در دسته‌بندی پلیمرها، دو پلیمر اول را انعطاف‌پذیر و صمغ زانتان را انعطاف‌ناپذیر می‌گویند. پس می‌توان گفت، انعطاف‌پذیری پلیمر بر کاهش پسار موثر است.

اثر ترکیب پلیمرها

با مخلوط‌کردن پلیمرهای آنیونی با وزن مولکولی زیاد AN 125-SH و پلیمر آنیونی با وزن مولکولی کم AN 125-VLM کاهش پسار بیشتری نسبت به زمانی که هر یک به تنهایی استفاده شدند، مشاهده

57, 400-408, 1906.

7. Toms B., Some Observation on the Flow of Linear Polymer Solution through Straight Tube at Large Reynolds Numbers, *Proceedings of the First International Congress on Rheology*, Amsterdam, **2**, 135-141, 1948.
8. Sokhal K.S., Gangacharyulu D., and Bulasara V.K., An Experimental Investigation of Heterogeneous Injection of Biopolymer (Guar Gum) on the Flow Patterns and Drag Reduction Percentage for Two Phase (Water-Oil Mixture) Flow, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **102**, 342-350, 2019.
9. Eshrati M., Al-Wahabi T., Al-Hashemi A.R., Al-Wahabi Y., Al-Ajmi A., and Abubakar A., Experimental Study of Drag Reduction of Polymer-Polymer Mixtures in Horizontal Dispersed Oil-Water Flow, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **83**, 169-176, 2017.
10. Khadom A.A. and Abdul-Hadi A.A., Performance of Polyacrylamide as Drag Reduction Polymer of Crude Petroleum Flow, *Ain Shams Eng. J.*, **5**, 861-865, 2014.

11. Esfandiari N., Zareinezhad R., and Habibi Z., The Investigation and Optimization of Drag Reduction in Turbulent Flow of Newtonian Fluid Passing through Horizontal Pipelines Using Functionalized Magnetic Nanophotocatalysts and Lecithin, *Chin J. Chem. Eng.*, 2019. doi:10.1016/j.cjche.2019.04.015
12. Wang X., Yao X., Hu G., and Chen P., Drag Reduction Performance of an Axial Oscillating Tool with Different Kinds of Waveform using a Multiscale Friction Model, *J. Petrol. Sci. Eng.*, **177**, 135-153, 2019.
13. Abubakar A., Al-Hashemi A.R., Al-Wahabi T., Al-Wahabi Y., Al-Ajmi A., and Eshrati M., Parameters of Drag Reducing Polymers and Drag Reduction Performance in Single-Phase Water Flow, *Adv. Mech. Eng.*, **66**, 1-8, 2014.
14. Zhang X., Duan X., and Muzychka Y., Degradation of Flow Drag Reduction with Polymer Additives-A New Molecular View, *J. Mol. Liq.*, **292**, 111360, 2019. doi: 10.1016/j.molliq.2019.111360
15. Ata Y., Baykal Y., and Gökçe M.C., Average Channel Capacity in Anisotropic Atmospheric Non-Kolmogorov Turbulent Medium, *Opt. Commun.*, **451**, 129-135, 2019.
16. Pouranfard A.R., Mowla D., and Esmaeilzadeh F., An Experimental Study of Drag Reduction by Nanofluids through Horizontal Pipe Turbulent Flow of a Newtonian Liquid, *J. Ind. Eng. Chem.*, **20**, 633-637, 2014.
17. Zhong K., Yan C., Chen S., Zhang T., and Lou S., Aerodisk Effects on Drag Reduction for Hypersonic Blunt Body with an Ellipsoid Nose, *Aerosp. Sci. Technol.*, **86**, 599-612, 2019.
18. Al-Sarkhi A., Effect of Mixing on Frictional Loss Reduction by Drag Reducing Polymer in Annular Horizontal Two-Phase Flows, *Int. J. Multiphase Flow*, **39**, 186-192, 2012.
19. Abubakar A., Al-Wahabi T., Al-Wahabi Y., Al-Hashemi A.R., and Al-Ajmi A., Roles of Drag Reducing Polymers in Single- and Multi-Phase Flows, *Chem. Eng. Res. Des.*, **92**, 2153-2181, 2014.
20. Shi H., Ge W., Wang Y., Fang B., Huggins J.T., Russell T.A., Talmon Y., Hart D.J., and Zakin J.L., A Drag Reducing Surfactant Threadlike Micelle System with Unusual Rheological Responses to pH, *J. Colloid Interface Sci.*, **418**, 95-102, 2014.
21. Gong W., Di Q.F., Wang X.L., Hua S., Zhang R.L., and Ye F., Seepage Model and Experiments of Drag Reduction by Nanoparticle Adsorption, *J. Hydrodyn. Ser. B*, **25**, 871-876, 2013.
22. Abubakar A., Al-Wahabi T., Al-Hashemi A.R., Al-Wahabi Y., Al-Ajmi A., and Eshrati M., Influence of Drag-Reducing Polymer on Flow Patterns, Drag Reduction and Slip Velocity Ratio of Oil-Water Flow in Horizontal Pipe, *Int. J. Multiphase Flow*, **73**, 1-10, 2015.
23. Al-Yaari M., Al-Sarkhi A., Hussein I.A., and Sharkh B.A., Effect of Drag Reducing Polymers on Surfactant-Stabilized Water-Oil Emulsions Flow, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **51**, 319-331, 2013.
24. Yang S.Q. and Ding D., Drag Reduction Induced by Polymer in Turbulent Pipe Flows, *Chem. Eng. Sci.*, **102**, 200-208, 2013.
25. Shams R. and Shad S., Experimental Study of Two-Phase Oil-Polymer Flow in Horizontal Flow Path, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **100**, 62-75, 2019.
26. Martin J.R. and Shapella B.D., The Effect of Solvent Solubility Parameter on Turbulent Flow Drag Reduction in Polyisobutylene Solutions, *Exp. Fluids*, **34**, 535-539, 2003.
27. McCormick C.L., Hester R.D., Morgan S.E., and Safieddine A.M., Water-Soluble Copolymers. 31. Effects of Molecular Parameters, Solvation, and Polymer Associations on Drag Reduction Performance, *Macromolecules*, **23**, 2132-2139, 1990.
28. Sifferman T.R. and Greenkorn R.A., Drag Reduction in Three Distinctly Different Fluid Systems, *Soc. Pet. Eng. J.*, **21**, 663-669, 1981.
29. Reis L.G., Oliveira I.P., Pires R.V., and Lucas E.F., Influence of Structure and Composition of Poly(acrylamide-g-propylene oxide) Copolymers on Drag Reduction of Aqueous Dispersions, *Colloids Surf. A*, **502**, 121-129, 2016.