

بررسی آزمایشگاهی بهسازی جریان درهم آب در لوله‌ها با استفاده از محلول‌های پلیمری

حمیدرضا کرمی¹، مسعود رحیمی^{2*} و سعید اویسی³

- 1- دکترای مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی نفت و پتروشیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه
- 2- استاد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی نفت و پتروشیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه
- 3- استادیار مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی نفت و پتروشیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

* m.rahimi@razi.ac.ir

(دریافت مقاله: 97/4/3؛ پذیرش مقاله: 97/7/22)

چکیده - استفاده از غلظت‌های کم عوامل کاهنده‌ی درگ، نقش مهمی در کاهش تلفات انرژی در خطوط لوله جریان درهم دارد. این مواد با اثرگذاری بر ساختار جریان درهم و بهسازی پروفایل‌های سرعت موجب کاهش اصطکاک فشاری جریان درهم می‌شوند. در این تحقیق اثر افزودن غلظت‌های مختلف دو کوپلیمر تجاری از پلی آکریل آمید با جرم‌های مولکولی مختلف بر کاهش افت فشار جریان درهم آب در خط لوله بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از این کوپلیمرها به شکل قابل توجهی باعث کاهش افت فشار جریان درهم در طول دو ساعت انجام آزمایش می‌شود. افزودن 30ppm از پلیمر سنگین‌تر به جریان درهم 54% کاهش افت فشار بدون تخریب زنجیره‌ی پلیمر را به همراه دارد. همچنین در این پژوهش تأثیر این عوامل بر پروفایل‌های سرعت جریان درهم با سرعت سنج داپلری لیزری بررسی شده است. بر اساس نتایج این پژوهش، در اثر افزودن عامل کاهنده‌ی دراگ پروفایل سرعت از حالت تخت به حالت سهمی‌گون تمایل پیدا می‌کند، همچنین منحنی‌های تنش رینولدز به شکل قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. در همه‌ی موارد اثر پلیمر با جرم مولکولی بالاتر بر روی پروفایل سرعت جریان درهم مطلوب‌تر از پلیمر دیگر ارزیابی می‌شود.

کلیدواژگان: افت فشار، جریان درهم، پلیمر، سرعت سنجی داپلری لیزری، پروفایل سرعت.

1- مقدمه

سیال ثابت شده است که یکی از مهم‌ترین روش‌ها افزودن مقادیر بسیار کم عوامل کاهنده‌ی درگ¹ به جریان است. مطالعه بر روی کاهش درگ جریان درهم در خطوط لوله انتقال سیال که به طور مستقیم به کاهش افت فشار در طول خط لوله مرتبط می‌شود، کاربرد ویژه‌ای در شبکه‌های انتقال آب در بخش‌های شهری، صنعتی و

مدیریت تلفات فشاری و افزایش ظرفیت انتقال سیال در خط لوله به عنوان چالشی مهم پیش روی صنایع کاربردی و مهم از جمله صنایع نفت، آب و پساب مطرح شده است (Karami et al., 2018a). امروزه در کنار راه‌های معمول غلبه بر تلفات انرژی ناشی از اصطکاک پوسته‌ای جریان

¹ Drag reducing agent (DRA)

سیستم‌های تیلور-کوئت¹ انجام شده است (Bizotto and Sabadini, 2008; Hong et al., 2015; Karami et al., 2018a; Pereira and Soares, 2012; Sohn et al., 2001). نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان می‌دهد بریدگی زنجیره‌ی پلیمری مهمترین عامل بازدارنده در کارایی این افزودنی‌ها است. بر اساس نتایج به دست آمده از پژوهش‌های کاربردی، مقاومت زنجیره‌ی پلیمر در مقابل تخریب مکانیکی متأثر از عواملی همچون جرم مولکولی پلیمر و انعطاف پذیری زنجیره‌ی آن است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند هر چه جرم مولکولی پلیمر بالاتر باشد درصد کاهش درگ بالاتر است (C A Kim et al., 2000; Sohn et al., 2001). تحلیل‌های انجام شده حاکی از آن است پلیمرهای طبیعی به واسطه‌ی زنجیره‌ی صلب خود نسبت به پلیمرهای مصنوعی با زنجیره‌ی انعطاف پذیر مقاومت بالاتری در مقابل تخریب دارند. حال آنکه درصد کاهش درگ به واسطه‌ی استفاده از پلیمرهای مصنوعی بسیار چشمگیرتر از پلی ساکاریدها است (Karami et al., 2018a; Pereira et al., 2013).

با وجود کارهای پژوهشی گسترده‌ی انجام شده در زمینه‌ی کاهش درگ به وسیله‌ی پلیمرها و دیگر افزودنی‌ها، سازکار دقیق کاهش درگ همچنان مبهم باقی مانده است. بیشتر پژوهش‌ها اثر متقابل پلیمر و ساختار درهم جریان را عامل این پدیده می‌دانند، به شکلی که تبادل انرژی بین زنجیره‌ی کوئل مانند پلیمر و گردانه‌های جریان درهم با دراز شدن ملوکول‌های پلیمر و در نتیجه تضعیف گردانه‌ها همراه است. پژوهشگران ویژگی الاستیک که به واسطه‌ی حضور مقادیر اندک پلیمر ویسکوالاستیک به سیال القا می‌شود را عامل کاهش انرژی گردانه‌های جریان می‌دانند. در نتیجه این تبادل انرژی، پلیمر باعث افزایش ضخامت لایه‌ی میانگیر جریان درهم و در نتیجه کاهش اصطکاک جریان می‌شود (De Gennes, 1986; Lumley, 1969; Virk, 1975). یکی از کاربردی‌ترین پژوهش‌ها در زمینه‌ی کاهش درگ جریان درهم آب توسط (Virk, 1975) انجام شده است. او با بررسی عملکرد محلول‌های پلیمری مختلف به صورت آزمایشی و

کشاورزی و همچنین پساب دارد. اهمیت پدیده‌ی کاهش درگ آنجاست که با کنترل تلفات اصطکاک پوسته‌ای در جریان درهم می‌توان میزان مصرف انرژی پمپ را کاهش داد. به بیان دیگر در میزان افت فشار ثابت، می‌توان با مصرف همان میزان انرژی ظرفیت خط لوله را افزایش داد و به این ترتیب موجبات انتقال بیشتر سیال را فراهم کرد (Karami et al., 2018a).

عوامل کاهنده‌ی درگ از میان مواد مختلفی انتخاب می‌شوند. از جمله مهمترین این مواد می‌توان به پلیمرها، فیبرها، صابون‌ها و عوامل فعال سطحی اشاره کرد (Karami and Mowla, 2012). پژوهش‌های بسیاری بر کارایی بالای پلیمرهای با جرم مولکولی بالا به عنوان موادی با کارایی قابل قبول تأکید دارند (Choi et al., 2000; Eshrati et al., 2015; Karami and Mowla, 2013; Karami et al., 2016; Karami et al., 2018a; Sandoval and Soares, 2016). علاوه بر جرم مولکولی بالا (بالاتر از 10^6 Da)، حلالیت مناسب در محیط، مقاومت مکانیکی، شیمیایی و زیستی قابل قبول از جمله ویژگی‌هایی است که باید عوامل کاهنده درگ برخوردار باشند. شایان ذکر است که غلظت این افزودنی در اندازه‌ی جدی نیست که خواص سیال عامل را دستخوش تغییرات جدی کند.

نخستین پژوهش‌های کاربردی در زمینه‌ی کاهش درگ جریان‌های درهم آب اوایل قرن بیستم انجام شد (Blatch, 1906)، سپس در پژوهش‌های (Toms (1949) مورد توجه عموم قرار گرفت. پس از معرفی عملی مفهوم کاهش درگ توسط پژوهشگران پیشگام، دانشمندان بسیاری به گسترش این مفهوم به لحاظ آزمایشی و عملی (Boutoudj et al., 2008; Edomwonyi-Otu et al., 2015; Manzhai et al., 2014; Rahimi et al., 2015; Reis et al., 2016; Li et al., 2011) و نیز از نظر تئوری (Wyatt et al., 2006; Pinho et al., 2008; Christopher M. White and M. Godfrey Mungal, 2008) پرداختند.

یکی از مهمترین مشکل‌ها در استفاده از پلیمرها امکان تخریب زنجیره در اثر تنش‌های مکانیکی است. تخریب مکانیکی سبب کاهش کارایی پلیمر می‌شود. پژوهش‌های بسیاری برای شناخت بهتر پلیمرها و بررسی مقاومت مکانیکی آن‌ها در جریان درهم داخل خط لوله و همچنین

¹ Taylor-Couette

افت فشار در لوله‌ای به قطر 2/54cm و ما بین دو نقطه با فاصله‌ی 1m اندازه‌گیری شده است. نوآوری این پژوهش در به کارگیری روش سرعت سنجی داپلری لیزری جهت بررسی اثر جرم مولکولی پلیمر بر روی تغییرات پروفایل سرعت جریان درهم، نوسانات محوری و شعاعی سرعت و تنش‌های رینولدز است. در همین راستا، اندازه‌گیری‌هایی در غلظت‌های بهینه‌ی این عوامل پلیمری انجام شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش استفاده از عامل پلیمری کاهنده‌ی درگ اثرات قابل توجهی بر پروفایل سرعت جریان درهم بر جای می‌گذارد.

2- مواد و روش‌ها

در این مطالعه اثر افزودن دو عامل پلیمری فوق سنگین با ساختار زنجیره‌ی خطی و انعطاف پذیری به جریان درهم بررسی شده است. دو عامل پلیمری به کار گرفته شده در این پژوهش به ترتیب عبارتند از پلیمری تجاری تحت عنوان SuperFloc A-150HMW که محصول کمپانی Kemira است. جرم مولکولی این پلیمر بالاتر از 8000kDa است و در این پژوهش به اختصار به صورت SF150 نشان داده می‌شود. پلیمر به کار گرفته شده‌ی دیگر SuperFloc A-110 با جرم مولکولی 5000kDa است. این پلیمر هم محصول کمپانی Kemira است و به اختصار با SF110 نشان داده می‌شود. شایان ذکر است که ساختار دو پلیمر یکسان است و تفاوت در جرم مولکولی و بار آنیونی پلیمرها است. بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط شرکت سازنده، بار آنیونی SF150 و SF110 به ترتیب بالا و متوسط ارزیابی شده است.

غلظت‌های مورد نظر محلول‌های پلیمری جهت افزودن به جریان درهم آب در سیستم آزمایشی، با انجام چند پیش آزمایش و همچنین تجربیات پیشین پژوهشگران به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بالاترین کارایی را به عنوان عامل کاهنده‌ی درگ از خود نشان دهند. شکل 1 گرانروی اندازه‌گیری شده‌ی محلول‌های پلیمری را بر حسب تنش برشی نشان می‌دهد که انحراف از رفتار سیال نیوتونی به خوبی در آن مشاهده می‌شود.

مطالعه‌ی پروفایل‌های سرعت متوجه شد که در نهایت برای غلظت‌های خاصی از عوامل پلیمری یک تمایل به سمت مجانب کاهش درگ ماکزیمم¹ وجود دارد. در مجموع می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که افزودن مواد پلیمری کاهنده‌ی درگ به جریان درهم به شکل مؤثری سبب بهینه کردن پروفایل جریان می‌گردد. امروزه در سایه‌ی گسترش کاربرد ابزارهای سرعت سنجی، درک بهتری از پدیده‌ی کاهش درگ به وجود آمده است.

در سالیان اخیر پژوهشگران روش‌های گوناگونی برای تحلیل پدیده‌های جریانی سیالات به کار گرفته‌اند که از جمله این روش‌ها می‌توان به سرعت سنجی تصویری ذرات² و سرعت سنجی داپلری لیزری³ اشاره کرد. در زمینه‌ی تأثیر عوامل کاهنده‌ی درگ بر روی جریان درهم کارهای ارزشمندی انجام شده است، که می‌توان به کاربرد سرعت سنجی تصویری ذرات (Guan et al., 2013; Kähler et al., 2012; Tian et al., 2015 Japper-Jaafar et al., 2009; Ptasinski et al., 2001; Werther et al., 1996) اشاره کرد. درک پدیده کاهش درگ به کمک روش سرعت سنجی داپلری لیزری (LDV) به تدریج کاربرد خود را برای بررسی پروفایل‌های سرعت جریان از جمله سرعت متوسط، تنش‌های رینولدز و نوسانات درهم پیدا کرد (Karami et al., 2018b; Kim et al., 2004; Xueming et al., 2002).

با توجه به اهمیت کاهش تلفات فشاری جریان درهم آب به کمک محلول‌های پلیمری با جرم مولکولی بالا و بررسی اثر استفاده از آن بر روی پروفایل‌های سرعت جریان، در این مقاله اثر افزودن غلظت‌های مختلف دو محلول رقیق پلیمری بر جریان درهم آب در خطوط لوله به صورت آزمایشی بررسی شده است. هدف مقایسه‌ی کارایی دو پلیمر فوق سنگین با ساختار زنجیره‌ی یکسان اما جرم مولکولی متفاوت به عنوان عامل کاهنده‌ی درگ در جریان درهم است. معیار به کار گرفته شده، تغییرات افت فشار در طول دو ساعت بازگردانی پیوسته‌ی سیال در یک سیستم آزمایشی مجهز به خط لوله به طول 3m است.

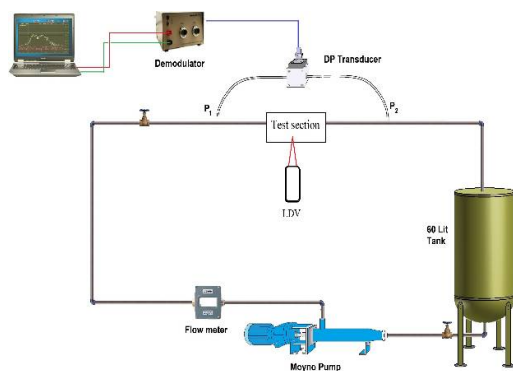
¹ Maximum Drag Reduction Asymptote

² Particle Image Velocimetry, PIV

³ Laser Doppler Velocimetry, LDV

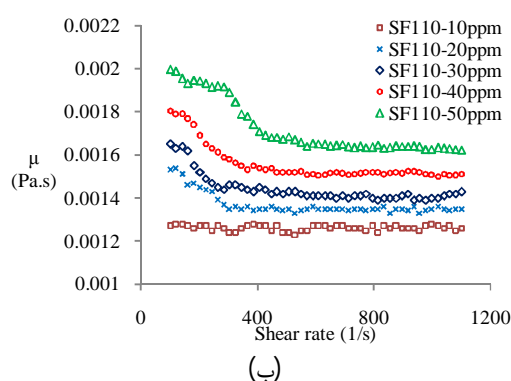
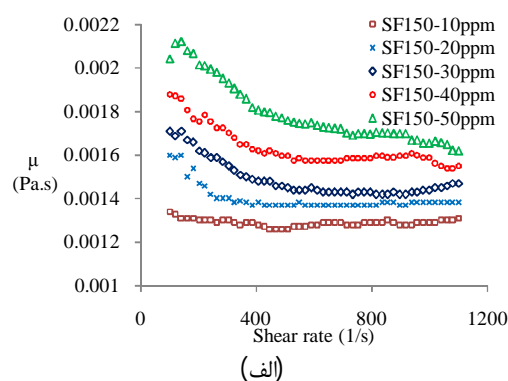
برای نگهداری، تأمین و اختلاط سیال به کار گرفته می‌شود که سیال را با کمک یک موینو پمپ در سیستم خط لوله بازگردانی می‌کند. این پمپ کمترین میزان تخریب را بر روی زنجیره‌ی پلیمر اعمال می‌کند. دبی جریان به کمک یک دبی سنچ دیجیتال که با فاصله‌ی ایمن پس از پمپ نصب شده است اندازه‌گیری می‌شود. در این پژوهش دبی همه‌ی آزمایش‌ها به کمک یک درایو فرکانس متغیر¹ در مقدار ثابت $1/32\text{m}^3/\text{h}$ تنظیم شده است. این دبی رینولدز 18280 را برای جریان آب تأمین می‌کند که متضمن جریان کاملاً درهم و برای بررسی کاهش درگ مطلوب است.

سیال در سیستمی متشکل از لوله‌ای به قطر $2/54\text{cm}$ با جنس پلکسی گلاس شفاف جریان می‌یابد. جنس لوله این امکان را می‌دهد تا بتوان از اثرات زبری لوله چشم پوشی کرد. برای اطمینان از جریان کاملاً توسعه یافته، کل طول لوله 3m در نظر گرفته شده است. همچنین کل مسیر حرکت سیال با احتساب لوله‌ها و اتصالات حدود 8m است. در این سیستم، افت فشار به عنوان معیار کاهش درگ در و ما بین دو نقطه با فاصله‌ی 1m اندازه‌گیری شده است.



شکل 2 سیستم آزمایشی استفاده شده برای بررسی پدیده‌ی کاهش درگ به کمک محلول‌های پلیمری

در بررسی کاهش درگ جریان درهم، لازم است شرایط برای جریان درهم سیال عامل و محلول پلیمری یکسان باشد. بنابراین نخست افت فشار برای جریان درهم آب بین دو نقطه‌ی مذکور از لوله انجام می‌شود، سپس در همین



شکل 1 گرانروی غلظت‌های مختلف محلول‌های رقیق پلیمری بر حسب تنش برشی، الف) SF150، ب) SF110

در این پژوهش برای اندازه‌گیری گرانروی از ویسکومتر چرخشی (RheolabQC, Anton-Paar, Graz, Austria) استفاده شده است. رفتار رئولوژی دو محلول پلیمری در محدوده‌ی یکسانی قرار دارد و اختلاف فاحشی میان آن‌ها مشاهده نمی‌شود. همچنین محدوده‌ی غلظت یکسانی برای هر دو پلیمر در نظر گرفته شد تا بتوان بررسی بهتری روی عملکرد آن‌ها ارائه داد. محلول‌های پلیمری ابتدا با حل کردن میزان جرمی مورد نظر پلیمر در آب و انحلال آرام به کمک همزن مغناطیسی به مدت 2h تهیه شده‌اند. سپس محلول تهیه شده برای اطمینان از خروج کامل حباب‌های هوا و نیز تشکیل محلول همگن، به مدت 24h در دمای محیط نگه داشته شد.

دستگاه آزمایشی استفاده شده در این پژوهش به منظور بررسی پدیده‌ی کاهش افت فشار جریان درهم آب با کمک محلول‌های رقیق پلیمری به صورت الگووار در شکل 2 نشان داده شده است. در این دستگاه یک مخزن 60L

¹ Variable-frequency drive; VFD

روی شکست نور لیزر، بخش کوچکی از لوله که در معرض تابش اشعه لیزر است با محفظه کوچک چهارگوشی از تفنون پوشانده شده است. ضریب شکست این پوشش 1/35 است که کاملاً در محدوده‌ی ضریب شکست جریان آب که برابر 1/33 است قرار دارد، بنابراین خطای فاحش و قابل توجهی در اندازه‌گیری‌ها بر جای نخواهد گذاشت.

3- تحلیل نتایج

افزودن غلظت‌های مختلف عوامل پلیمری کاهنده درگ دو اثر متضاد بر جریان درهم دارد.

محلول رقیق ویسکوالاستیک دو عملکرد متضاد از خود نشان می‌دهد. از یک سو به واسطه‌ی خصوصیات الاستیک خود می‌تواند باعث کاهش انرژی ساختارهای درهمی گردد و در نتیجه به کاهش درگ منجر شود. از سوی دیگر به دلیل افزایش گرانروی سیال عملکرد منفی در جهت کاهش درگ از خود نشان دهد. در واقع به عنوان یک اثر نامطلوب، با افزایش گرانروی جریان به عنوان یک نیروی مقاوم عمل می‌کند. در مقابل ویژگی کشسانی مولکول‌های پلیمر می‌تواند به شکل بهینه با گرفتن انرژی گردانه‌های² جریان درهم مصرف انرژی در سیستم را کاهش دهد. با توجه به محدوده‌ی غلظت پلیمر یکی از این دو نیرو می‌تواند قوی‌تر عمل کند. برآیند عمل پلیمرها به صورتی است که با اثر گذاری بر ساختار جریان درهم، پروفایل‌های سرعت به گونه‌ای دستخوش تغییر می‌شوند که در نهایت اصطکاک پوسته‌ای جریان کاهش یابد. در غلظت بهینه که بالاترین درصد کاهش درگ مشاهده می‌شود اثر کاهش درگ بر اثر گرانروی به صورت کامل غلبه می‌کند.

در بیشتر منابع دراز شدگی زنجیر پلیمر را در اثر تبادل انرژی با گردانه‌ها و ساختارهای درهمی جریان سیال به عنوان عامل کاهش درگ معرفی کرده‌اند (De Gennes, 1969; Lumley, 1986). هر چند باید به این نکته هم اشاره داشت که تبادل بی اندازه‌ی انرژی زنجیره‌ی پلیمر را مستعد شکست می‌کند و سرانجام با گذر چند باره از پمپ

شرایط (دبی ثابت و تجهیزات آزمایشی) افت فشار محلول‌های رقیق پلیمری ما بین همان دو نقطه اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری در نقاط با فاصله‌ی متفاوت تفاوت معناداری در مقایسه‌ی نتایج نخواهد داشت. این دو نقطه در جایی از لوله در نظر گرفته شده اند که اثرات ابتدایی و انتهایی سیال درون لوله مهم نباشند و جریان کاملاً توسعه یافته تضمین شود. افت فشار به کمک یک سنسور تفاضلی¹ اندازه‌گیری می‌شود. در این پژوهش، معیار اثر بخشی پلیمر در شدت جریان ثابت توسط درصد کاهش درگ محلول با کمک رابطه‌ی (1) محاسبه شده است:

$$DR\% = (1 - \Delta P_{DRA} / \Delta P_{No-DRA}) \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه ΔP_{No-DRA} افت فشار سیال عامل (آب) و ΔP_{DRA} افت فشار پس از افزودن عامل کاهنده‌ی درگ به سیال عامل است. بدیهی است که درصد بالاتر کاهش درگ نشانگر عملکرد مطلوب‌تر DRA خواهد بود. شایان ذکر است که برای پیشگیری از اثرات نامطلوب دمایی، تمامی آزمایش‌ها در دمای ثابت 20°C انجام شده است.

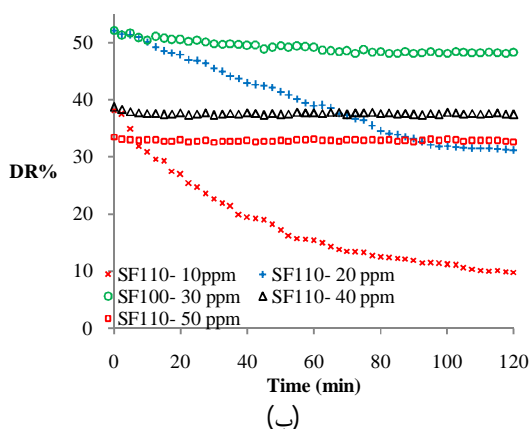
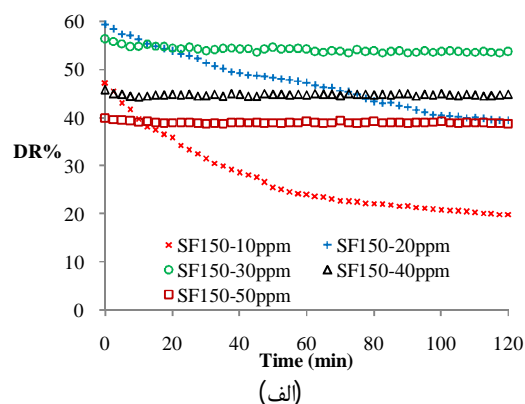
پس از مقایسه‌ی عملکرد محلول‌های پلیمری بر روی کاهش افت فشار در طول خط لوله و انتخاب غلظت خاصی از پلیمر با کارایی مطلوب، پروفایل‌های سرعت جریان درهم به کمک سیستم سرعت سنجی داپلری لیزری تعبیه شده بر روی دستگاه آزمایشی اندازه‌گیری شده‌اند. هدف از این کار بررسی بهتر مکانیسم کاهش درگ است. سیستم به کار گرفته شده برای سرعت سنجی شامل تابش لیزر یون آرگون (300mW) است. نرخ سیگنال LDV در این مجموعه آزمایش 30Hz و برای ایجاد پراکندگی بهتر تابش لیزر، سیال با ذرات بسیار ریز نایلون (با قطر متوسط 4µm) تغلیظ شده است. بدیهی است افزودن این ذرات هیچ‌گونه اثری بر روی عملکرد سیال عامل و DRA ندارد. با توجه به محدوده‌ی غلظت به کار رفته‌ی محلول پلیمری، اندازه‌گیری پروفایل سرعت در هر موقعیت شعاعی در بازه‌ی 60-120s بوده است. برای کاهش اثر نامطلوب دیواره‌های منحنی وار لوله بر

² Eddies

¹ Differential pressure transducer

نمودارها پس از حدود سه دقیقه از شروع افزودن پلیمر به جریان گزارش شده‌اند. این زمان در مقابل زمان دو ساعت بازگردانی سیال در سیستم ناچیز و قابل چشم پوشی است. دنبال کردن این رویکرد تکرارپذیری کاملاً مطلوب داده‌های آزمایشی را به همراه خواهد داشت.

بر اساس شکل 3-الف، SF150 عملکرد قابل قبولی به عنوان عامل کاهنده‌ی درگ از خود نشان می‌دهد. هر چند در غلظت‌های پایین پلیمر به صورت آرام تخریب می‌شود و درصد کاهش درگ با بازگردانی سیال در سیستم رفته رفته کاهش پیدا می‌کند اما در غلظت 30ppm و بالاتر تخریب زنجیره‌ی پلیمری صورت نمی‌گیرد و تغییرات کاهش درگ ثابت می‌ماند.



شکل 3 تغییرات درصد کاهش درگ محلول‌های پلیمری بر حسب زمان، الف) SF150، ب) SF110

غلظت 30ppm از SF150 به عنوان غلظت بهینه‌ی این ماده در حدود 54% کاهش درگ نشان می‌دهد که

امکان تخریب موکول‌های پلیمر فراهم می‌شود و رفته رفته عملکرد DRA کاهش یابد.

در بخش‌های پیش رو نخست عملکرد غلظت‌های مختلف عوامل پلیمری در کاهش درگ بررسی و با هم مقایسه می‌شود. سپس با انتخاب غلظت بهینه‌ی پلیمر، تغییرات پروفایل‌های سرعت جریان درهم بررسی می‌شود تا بتوان تحلیل مناسبی برای پدیده‌ی کاهش درگ ارائه داد.

3-1- تغییرات درگ

آزمایش‌ها در دبی ثابت $1/32 \text{m}^3/\text{h}$ انجام شده است، به صورتی که جریان درهم را با عدد رینولدز 18280 را برای جریان آب دیونیزه تأمین می‌کند. در واقع معیار در بررسی کاهش درگ عدد رینولدز است. این میزان عدد رینولدز به خوبی جریان درهم را در شرایط آزمایشی مورد نظر ایجاد می‌کند. با توجه به کاهش ضخامت زیرلایه ویسکوز در رینولدزهای بالا، اندازه‌گیری پروفایل سرعت در دبی‌های بالاتر با خطا مواجه می‌شود. در مجموع با انجام چند آزمایش این دبی به عنوان دبی مناسب جهت بررسی تغییرات پروفایل سرعت جریان درهم انتخاب شد.

نخست اندازه‌گیری‌ها برای جریان درهم آب انجام شد و در طول 2 ساعت انجام آزمایش افت فشار آن در دبی مذکور به صورت میانگین برابر 0/034psi به دست آمد. در مرحله‌ی بعد برای مقایسه‌ی عملکرد دو عامل پلیمری استفاده شده در این پژوهش، یعنی SF110 و SF150، غلظت‌های مختلف این مواد بر اساس دستورالعمل یکسان، تهیه و به جریان آب افزوده شد و عملکرد پلیمرها به عنوان کاهنده‌ی درگ با دو ساعت بازگردانی سیال در سیستم آزمایشی بررسی شد. درصد کاهش درگ با کمک رابطه‌ی 1 به دست آمده است. شکل 3 تغییرات درصد کاهش درگ عوامل پلیمری کاهنده‌ی درگ را نشان می‌دهد. در این نمودارها ممکن است کاهش درگ به دست آمده در زمان‌های اولیه‌ی آزمایش با تخریب پلیمر رفته رفته از میزان آن کاسته شود و یا اینکه با مقاومت زنجیره‌ی پلیمر در مقابل تخریب مقدار آن دستخوش تغییر جدی نشود.

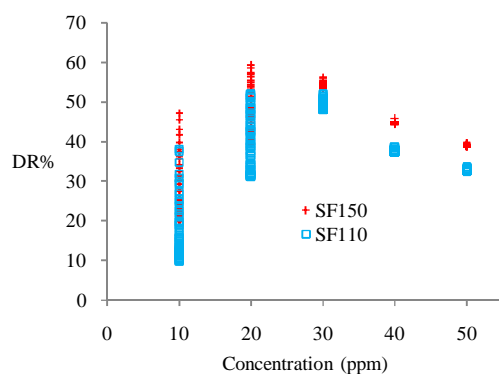
برای حصول اطمینان از انحلال کامل و مؤثر پلیمر در آب و تشکیل محلولی همگن، داده‌های نشان داده شده در این

تخریب زنجیره‌ی این پلیمر به واسطه‌ی جرم مولکولی بالاتر آن، روند آهسته‌تری را نسبت به پلیمر دیگر به دنبال دارد.

با کمک شکل 4 می‌توان تفسیر بهتری از اثر غلظت پلیمر بر روی درصد کاهش درگ و تخریب زنجیره‌ی پلیمری ارائه داد. بر این اساس، در غلظت‌های پایین میزان تخریب نسبتاً بالایی مشاهده می‌شود و بدیهی است با افزایش غلظت DR% افزایش می‌یابد و در غلظت 30ppm به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در این غلظت بازه‌ی تغییرات DR% به اندازه‌ای نیست که تخریب زنجیره پلیمری اهمیت پیدا کند.

در غلظت‌های بالاتر درصد کاهش درگ دوباره کم می‌شود با این تفاوت که تخریب زنجیره‌ی پلیمری مشاهده نمی‌شود. دلیل کاهش DR% در غلظت‌های بالا را می‌توان به تقویت نیروهای مقاوم گرانو مرتب‌دانت که در نتیجه‌ی آن DR% پایین‌تری مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل، در همه‌ی غلظت‌ها پلیمر با جرم مولکولی بالاتر، چه از نظر تخریب کمتر و چه از نظر میزان بیشتر DR% عملکرد بهتری نشان می‌دهد. این مهم به طول بیشتر زنجیره‌ی هر مولکول پلیمر مرتبط است که به خوبی می‌تواند بر گردانه‌های جریان درهم تأثیرگذار باشد.



شکل 4 اثر غلظت بر روی DR% محلول‌های پلیمری

3-2- پروفایل‌های سرعت جریان درهم

در این بخش بعد پروفایل سرعت برای غلظت‌های بهینه‌ی SF150 و SF110 بررسی شده است تا با کمک نتایج بدست آمده از آن تحلیل جامع‌تری بر پدیده‌ی کاهش

بالاترین درصد کاهش درگ مشاهده شده برای این پلیمر است. در غلظت‌های بالاتر، با تقویت اثر نامطلوب گرانروی سیال، درصد کاهش درگ کمتری مشاهده می‌شود به ترتیب 44% و 38% برای غلظت‌های 40ppm و 50ppm. شایان توجه است در غلظت 20ppm ابتدا 59% کاهش درگ مشاهده شده است اما با تخریب زنجیره‌ی پلیمر پس از دو ساعت بازگردانی سیال، این میزان به 39% کاهش می‌یابد که از نظر پایداری نامطلوب است.

در نقطه مقابل همان‌طور که شکل 3-ب نشان می‌دهد، عملکرد کاهش درگ SF110 اندکی ضعیف‌تر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد در محدوده‌ی غلظت‌های به کار گرفته شده، میزان کاهش درگ کمتر و در عین حال تمایل به تخریب بیشتری برای پلیمر با جرم مولکولی کمتر مشاهده می‌شود. برای نمونه در غلظت 30ppm از SF110 اندکی تخریب مشاهده می‌شود و کاهش درگ از مقدار اولیه‌ی 52% تا 48% در پایان آزمایش کاهش پیدا می‌کند. هر چند این میزان تخریب در طول دو ساعت آزمایش ناچیز است و غلظت مذکور به عنوان غلظت بهینه‌ی SF110 در نظر گرفته شده است.

تفاوت عملکرد عوامل پلیمری به کار گرفته شده به اختلاف در جرم مولکولی آن‌ها باز می‌گردد. هر دو پلیمر از نوع آنیونی با زنجیره‌ی خطی هستند. این مواد بر اساس اطلاعات شرکت سازنده، کوپلیمری از پلی آکریل امید هستند که ساختارشان با اینکه خطی است اما از تفاوت آشکاری در جرم مولکولی برخوردارند. پلیمر با جرم مولکولی بالاتر (SF150) ضمن نشان دادن درصد کاهش درگ بالاتر، مقاومت بیشتری در برابر تخریب مکانیکی نشان می‌دهد. همچنین مقایسه‌ی رفتار رئولوژیکی دو پلیمر در غلظت 30ppm آنچنان که شکل 1 گرانروی تقریباً یکسانی را برای پلیمرها نشان می‌دهد. هر چند گرانروی SF150 به واسطه‌ی جرم مولکولی بالاتر آن اندکی بالاتر است.

با این تفسیر از آنجا که در غلظت بهینه‌ی یکسان و گرانروی برابر، بیشینه درصد کاهش درگ SF150 بالاتر از SF110 است، این پلیمر از ارزش قابل توجهی برای معرفی شدن به عنوان عامل کاهنده‌ی درگ برخوردار است. بی شک در بازگردانی طولانی‌تر از محدوده‌ی آزمایش شده،

در این بخش غلظت‌های بهینه‌ی کوپلیمرهای SF150 و SF110 که با انجام آزمایش کاهش درگ، در آن بیشینه کاهش درگ دیده شد، به منظور درک اثر جرم مولکولی پلیمر بر روی پروفایل سرعت متوسط جریان درهم به کمک روش سرعت سنجی داپلری لیزری بررسی شده‌اند. روش سرعت سنجی داپلری لیزری (LDV) یک روش توانمند در به دست آوردن پروفایل سرعت است. اما این روش در مقایسه با برخی روش‌ها محدودیت‌هایی دارد، از آن جمله که این روش قادر به اندازه‌گیری نوسانات درمی در سه بعد نیست و تنها نوسانات شعاعی و محوری و همچنین حاصلضرب آن‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. با این حال این محدودیت چندان دست و پاگیر نیست چرا که در تحلیل کاهش درگ بیشتر پروفایل سرعت متوسط زمانی و همچنین منحنی تنش رینولدز مهم هستند. نتایج به دست آمده در مقایسه با جریان درهم آب در شکل 5 نشان داده شده‌اند. در این شکل پروفایل سرعت بدون بعد و پروفایل سرعت متوسط زمانی بررسی شده‌اند. همان‌طور که از شکل 5- الف بر می‌آید افزودن پلیمر به جریان درهم سبب افزایش ضخامت زیرلایه میانگیر می‌شود و با افزایش مشاهده شده در شیب پروفایل سرعت انتظار کاهش تلفات اصطکاکی در طول مسیر جریان دور از دسترس نیست. این افزایش شیب به سادگی نشان می‌دهد افزودن پلیمر به جریان درهم، انتقال پروفایل جریان آرام (زیر لایه گرانرو) به جریان درهم (ناحیه لگاریتمی) را به تأخیر می‌اندازد. همچنین با بررسی نمودارها مشاهده می‌شود که غلظت 30ppm از کوپلیمر SF150 به خوبی منطبق بر منحنی ماکزیمم کاهش درگ (Virke, 1975) (رابطه‌ی 5) است. این نتیجه دور از انتظار نیست و پیشتر در شکل 3 نشان داده شد که در این غلظت بالاترین درصد کاهش درگ (54 درصد) به دست می‌آید. منحنی ماکزیمم کاهش درگ رفتار نزدیکی به پروفایل جریان آرام دارد و مؤید این مهم است که افزودن پلیمر کاهنده‌ی درگ به جریان درهم، پروفایل سرعت را به سمت جریان آرام سوق می‌دهد.

درگ ارائه شود. طبق تعریف پروفایل سرعت در جریان درهم (u) برابر با مجموع متوسط زمانی سرعت \bar{u} و نوسانات در همان جهت (u') است. لایه‌ی مرزی جریان درهم برای سیال نیوتونی به سه ناحیه اصلی تقسیم می‌شود. زیر لایه‌ی گرانرو، لایه‌ی میانگیر (بافر) و هسته‌ی درهم. زیر لایه‌ی گرانرو نزدیک‌ترین لایه به دیواره‌ی جامد است که در آن اثر گرانروی جریان غالب است و به شکل رابطه (2) تعریف می‌شود.

$$u^+ = y^+ ; y^+ < 5 \quad (2)$$

در این رابطه سرعت بدون بعد u^+ نسبت متوسط زمانی سرعت \bar{u} و سرعت اصطکاکی $u^* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ است. فاصله‌ی شعاعی بدون بعد هم برابر است با $y^+ = u^* y \rho / \mu$. در اینجا τ_w تنش برشی روی دیواره، y فاصله از دیواره، و ρ و μ به ترتیب دانسیته و گرانروی سیال هستند.

پروفایل سرعت هسته‌ی درهم یا ناحیه‌ی لگاریتمی که اثرات درمی جریان در آن بالاترین اهمیت را دارد به صورت رابطه (3) تعریف می‌شود.

$$u^+ = 2.5 \ln(y^+) + 5.5 ; y^+ > 30 \quad (3)$$

لایه‌ی میانگیر¹ که بین این دو زیر لایه قرار دارد با رابطه‌ی نیمه تجربی (4) معرفی شده است

$$u^+ = 5 \ln(y^+) - 30.5 ; 5 < y^+ < 30 \quad (4)$$

افزودن DRA به جریان درهم سیال نیوتونی (آب) می‌تواند با باز توزیع تنش‌ها در لایه‌ی مرزی به گونه‌ای پروفایل سرعت را بهینه کند که اثر مستقیم آن کاهش تلفات اصطکاکی در طول مسیر باشد (Christopher M White and M Godfrey Mungal, 2008). همان‌طور که گفته شد (Virke, 1975) در مطالعه‌ی خود به این نتیجه رسید که DRA با افزایش ضخامت لایه‌های نزدیک دیواره سبب کاهش درگ می‌شود. در حالت حدی این افزایش ضخامت می‌تواند تا مرکز لوله هم پیش روی کند. در این حالت ماکزیمم کاهش درگ رخ می‌دهد که با رابطه‌ی (5) معرفی می‌شود. یافته‌های پژوهش انجام شده توسط Virke الهام بخش بسیاری از پژوهشگران پس از او شده است.

$$u^+ = 1.7 \ln(y^+) - 17 \quad (5)$$

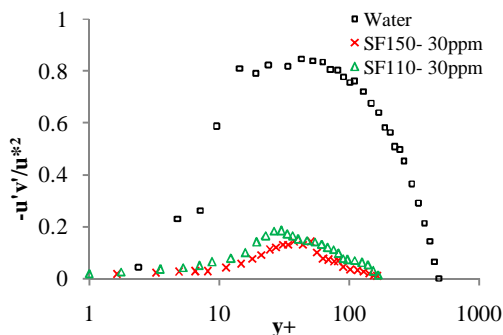
¹ Buffer layer

$$\tau = \tau_l + \tau_R + \tau_p = \mu du/dy - \rho u'v' + \tau_p \quad (6)$$

با توجه به اینکه پلیمر سبب تأخیر انتقال پروفایل جریانی آرام به جریان درهم می‌گردد، این احتمال وجود دارد که افزودن پلیمر علی‌رغم تقویت تنش ویسکوز و تنش پلیمری، به گونه‌ای تنش رینولدز را کاهش دهد که سبب کاهش تنش برشی جریان شود. تنش رینولدز به طور مستقیم با حاصل ضرب نوسانات محوری u' و شعاعی v' جریان مرتبط است که در اینجا اثر پلیمر بر روی آن با کمک روش سرعت سنجی داپلری لیزری بررسی می‌شود.

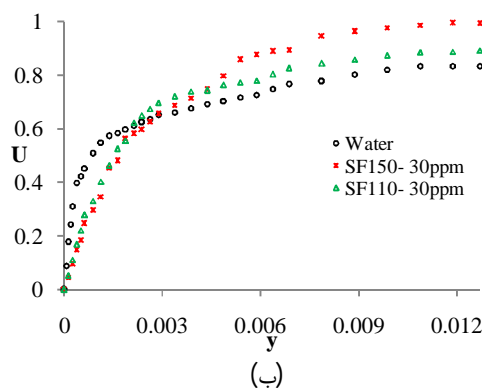
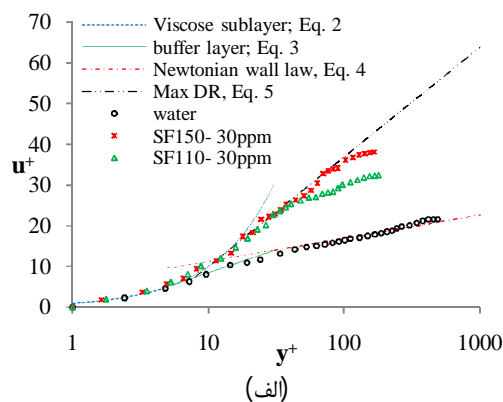
شکل 6 تغییرات تنش رینولدز بدون بعد را برای غلظت‌های بهینه‌ی عوامل کاهنده‌ی درگ نشان می‌دهد. آنچنان که از این شکل می‌توان دریافت در مقایسه با جریان درهم آب، در غلظت بهینه، 30ppm، حاصل ضرب نوسانات محوری و شعاعی به شدت کاهش پیدا می‌کند. این مهم برای SF150 کاهش محسوس تری دارد در محدوده‌ی نزدیک به صفر قرار می‌گیرد.

این شکل تمایل پلیمر برای سرکوب و تضعیف گردانه‌ها و ساختارهای جریان درهم را نشان می‌دهد که در نتیجه‌ی آن تنش برشی متوسط جریان درهم در راستای کاهش اصطکاک پوسته‌ای جریان کم می‌شود و این به معنای کاهش درگ است. برای هر دو پلیمر، در مقایسه با منحنی جریان درهم آب می‌توان دریافت که افزودن پلیمر باعث جابجایی قله‌ی منحنی تنش رینولدز به فاصله‌ی دورتر از دیواره می‌شود. این جابجایی به ویژه برای غلظت 30ppm از SF150 که منطبق بر منحنی ماکزیمم کاهش درگ است به شکل مشهودتری دیده می‌شود.



شکل 6 منحنی تنش رینولدز بدون بعد محلول‌های پلیمری

این مهم در راستای تئوری مطرح شده برای افزایش



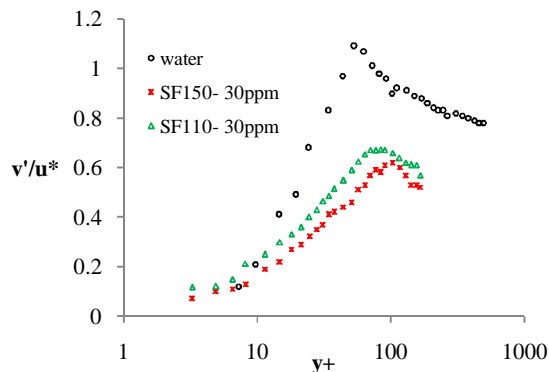
شکل 5 پروفایل سرعت جریان درهم در غلظت بهینه‌ی محلول‌های پلیمری، (الف) سرعت بی بعد، (ب) سرعت متوسط

بررسی پروفایل سرعت متوسط آنچنان که در شکل 5-ب نشان داده شده است مؤید این مطلب است که با افزودن DRA پروفایل جریان درهم از حالت تخت به حالت سهموی میل می‌کند. در ماکزیمم کاهش درگ تغییر شکل پروفایل جریان به سمت پروفایل سهموی از نمود بیشتری برخوردار است. در این حالت هم اثر جرم مولکولی بالاتر پلیمر در بهینه کردن پروفایل جریان کاملاً ملموس است، به شکلی که منحنی مربوط به SF150 از انحنای قابل توجهی نسبت به منحنی جریان درهم آب و همچنین منحنی جریان محلول رقیق SF110 برخوردار است.

در واقع DRA با اثر گذاری بر روی تنش ویسکوز (τ_l) و تنش رینولدز τ_R در جری‌سن درهم و همچنین اعمال تنش اضافی با نام تنش پلیمری τ_p ، توزیع تنش در جریان را دستخوش تغییر می‌کند. بنابراین تنش برشی متوسط در سیال به شکل رابطه (6) تعریف می‌شود:

مطابق شکل 8، رفتار پلیمرها بر روی میانگین مربعات ریشه‌ی نوسانات شعاعی به کلی متفاوت است. افزودن پلیمر به جریان درهم به شکل چشمگیری باعث کاهش نوسانات شعاعی سرعت می‌شود و قلّه‌ی منحنی را به فاصله‌ی دورتر از دیواره‌ی لوله جابجا می‌کند.

آن چنان که انتظار می‌رود، این اثر کاهشی برای پلیمر با جرم مولکولی بالاتر مشهودتر است. این مهم را می‌توان به توانایی زنجیره‌ی پلیمر در تضعیف گردانه‌های جریان درهم مرتبط دانست که به خوبی پروفایل سرعت را بهینه می‌کند. بر این اساس اثر افزودن دو عامل پلیمری به جریان درهم آب در غلظت بهینه با کمک پروفایل‌های سرعت، تنش رینولدز و میانگین مربعات ریشه برای نوسانات محوری و شعاعی بررسی شد. کارایی مناسب پلیمر با جرم مولکولی بالاتر (SF150) در غلظت بهینه سبب کاهش تلفات اصطکاکی جریان درهم می‌شود.



شکل 8 منحنی میانگین مربعات ریشه نوسانات شعاعی برای محلول‌های مختلف پلیمری

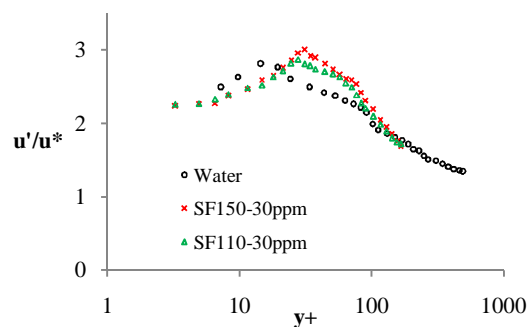
4- نتیجه‌گیری

با افزودن عوامل پلیمری کاهنده‌ی درگ به جریان درهم آب در خط لوله، به شکل مناسبی میزان تلفات اصطکاکی جریان را می‌توان کاهش داد. در این پژوهش با کمک مجموعه‌ای آزمایش‌ها، اثر افزودن دو ماده پلیمری آنیونی با ساختار زنجیره‌ی خطی انعطاف‌پذیر و با جرم مولکولی متفاوت بر روی کاهش درجریان درهم آب داخل خط لوله با عدد رینولدز 18280 بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان داد کوپلیمر با جرم مولکولی بالاتر، به خوبی

ضخامت زیر لایه‌ی میانگیر در اثر افزودن پلیمر به جریان درهم آب است که پیشتر بررسی شد (Ptasinski et al., 2001).

بررسی تغییرات نوسانات محوری و شعاعی در نتیجه‌ی افزودن غلظت‌های بهینه‌ی پلیمر به جریان درهم نیز می‌تواند به فهم بهتر کاهش درگ کمک کند. به نظر دراز شدن زنجیره‌ی پلیمر در اثر تبادل انرژی با گردانه‌های جریان درهم ضمن اثر گذاری بر نوسانات سرعت به صورت بهینه موجب کاهش مصرف انرژی در سیستم می‌شود. این اثر مطلوب به ویژه در خطوط لوله‌ی انتقال سیال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تعریف معمول در جریان درهم استفاده از میانگین مربعات ریشه¹ برای نوسانات محوری و شعاعی، به ترتیب u^{rms} و v^{rms} است. شکل 7 میانگین مربعات ریشه‌های نوسانات محوری در نقاط مختلف لوله برای محلول‌های مختلف نشان می‌دهد. محور عمودی با سرعت اصطکاکی، u^* بدون بعد شده است.

همان‌طور که از بررسی شکل 7 و مقایسه نمودار پلیمرها با آب می‌توان دریافت، در غلظت بهینه‌ی هر دو پلیمر، مقادیر میانگین مربعات ریشه‌ی نوسانات محوری اندکی افزایش می‌یابد و قلّه‌ی نمودار به سمت دور از دیواره‌ی جامد انتقال پیدا می‌کند. افزایش نسبتاً ناچیز u^{rms} برای هر دو پلیمر به صورت تقریبی در یک محدوده است، هر چند جابجایی قلّه برای پلیمر با جرم مولکولی بالاتر اندکی آشکارتر به نظر می‌رسد.



شکل 7 منحنی میانگین مربعات ریشه نوسانات محوری برای محلول‌های مختلف پلیمری

¹ Root mean square (rms)

می‌توان محدوده‌ی عدد رینولدز، نوع پلیمر، دما، غلظت، قطر دستگاه آزمایشی، روش‌های اندازه‌گیری و ... دانست. تغییر هر یک از این پارامترها می‌تواند مقدار کمی نتایج را تغییر دهد، اما از نظر کیفی تفسیر نتایج یکسان خواهد بود. برای نمونه چنانچه نوع پلیمر تغییر کند، ممکن است نتایج بهینه در غلظت‌های دیگری مشاهده شود. همچنین تغییر عدد رینولدز جریان روند تخریب پلیمر و همچنین غلظت بهینه را دچار تغییر می‌کند. هر یک از پارامترها به نحوی داده‌های آزمایشی را دچار تغییر خواهد کرد. در مورد روش‌های اندازه‌گیری، برای نمونه اندازه‌گیری افت فشار در فاصله‌های دورتر تنها مقدار افت فشار را تغییر می‌دهد و اثری بر روی DR% ندارد. اما اندازه‌گیری سرعت با کمک روش‌های سه بعدی همچون PIV می‌تواند تفسیر جامع‌تری از عملکرد پلیمر را ارائه دهد.

5- فهرست علائم

DR%	درصد کاهش درگ، بدون بعد
P_1	پورت بالا دستی فشار
P_2	پورت پایین دستی فشار
SF110	SuperFloc A-110
SF150	SuperFloc A-150HMW
u^*	سرعت اصطکاکی
\bar{u}	متوسط زمانی سرعت
u'	نوسانات محوری سرعت
v'	نوسانات شعاعی سرعت
y	فاصله از دیواره، m

علائم یونانی

ΔP	افت فشار جریان
μ	گرانروی دینامیکی
ρ	دانسیته
τ	تنش برشی

بالا نویسی‌ها

Rms	میانگین مربعات ریشه
+	علامت بدون بعد کننده

زیر نویسی‌ها

DRA	با عامل کاهنده‌ی درگ
No-DRA	بدون عامل کاهنده‌ی درگ
l	مربوط به تنش آرام

می‌تواند در شرایط آزمایشی یکسان تا 54% بدون تخریب زنجیره افت فشار خط لوله را کاهش دهد. این درصد کاهش درگ با غلظت 30ppm از این پلیمر به دست آمد. در مقابل عامل پلیمری دیگر با همان ساختار مولکولی اما با جرم مولکولی کمتر، عملکرد نسبتاً ضعیف‌تری برای کاهش افت فشار جریان درهم از خود نشان می‌دهد. این یافته در راستای پژوهش‌های پیشین است که در آن‌ها اثر جرم مولکولی بر روی عملکرد پلیمر بررسی شده است.

در ادامه این پژوهش با به کارگیری روش سرعت سنجی داپلری لیزری (LDV)، اثر افزودن غلظت‌های بهینه‌ی هر دو عامل کاهنده درگ پلیمری بر روی پروفایل‌های جریان درهم بررسی شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که هر یک از پلیمر با افزایش ضخامت زیرلایه میانگیر انتقال جریان آرام به درهم را با تأخیر روبرو می‌کند و پروفایل سرعت را از حالت تخت به سمت سهموی سوق می‌دهد. همچنین اثر افزودن پلیمر بر روی تنش‌های رینولدز جریان درهم بررسی شد که نتایج به دست آمده از این پژوهش کاهش قابل توجه تنش رینولدز را در مقایسه با جریان آب نشان می‌دهد. این مسأله نشان می‌دهد پلیمر با وجود اعمال برخی تنش‌های مقاوم، به خوبی می‌تواند سبب کاهش تلفات اصطکاکی جریان درهم شود. نتایج استفاده از غلظت‌های مطلوب پلیمر کاهنده‌ی درگ بر روی نوسانات محوری و شعاعی سرعت هم بررسی شده است. آن چنان که مشخص است، پلیمر به طور قابل ملاحظه‌ای بر این نوسانات اثر می‌گذارد. اثر مذکور به ویژه بر روی نوسانات شعاعی مشهود است. تمامی این موارد بر اساس مکانیسم‌های پیشنهادی کاهش درگ پژوهشگران پیشین قابل انتظار بود.

به عنوان یک نوآوری در این پژوهش، اثر جرم مولکولی پلیمرها بر روی تغییرات سرعت جریان بررسی شده است. این کار پیشتر توسط سایر پژوهشگران بررسی نشده است. در همه‌ی موارد، پلیمر با جرم مولکولی بالاتر به واسطه‌ی طول زنجیره‌ی بلندتر برای هر مولکول که پلیمر را در تضعیف گردانه‌های جریان درهم مستعدتر می‌کند، عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد.

با همه‌ی این تفاسیر پارامترهای اثرگذار بر روی نتایج را

Karami, H. R. Mowla, D. (2012). "Investigation of the effects of various parameters on pressure drop reduction in crude oil pipelines by drag reducing agents", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 177-178, pp. 37-45.

Karami, H. R. Mowla, D. (2013). "A general model for predicting drag reduction in crude oil pipelines", *J. Pet. Sci. Eng.*, 111, pp. 78-86.

Karami, H. R. Keyhani, M. Mowla, D. (2016). "Experimental analysis of drag reduction in the pipelines with response surface methodology", *J. Pet. Sci. Eng.*, 138, pp. 104-112.

Karami, H. R. Rahimi, M. Ovaysi, S. (2018a). "Degradation of drag reducing polymers in aqueous solutions", *Korean J. Chem. Eng.*, pp. 1-10.

Karami, H. R. Rahimi, M. Ovaysi, S. (2018b). "Modification of Turbulent Flow Velocity Profiles Using Small Concentrations of Diluted Polymeric Solution", *The 10th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (ICChE 2018) Isfahan, Iran*, pp.

Kim, C. A. Kim, J. T. Lee, K. Choi, H. J. Jhon, M. S. (2000). "Mechanical degradation of dilute polymer solutions under turbulent flow", *Polymer*, 41(21), pp. 7611-7615.

Kim, K. Islam, M. Shen, X. Sirviente, A. Solomon, M. (2004). "Effect of macromolecular polymer structures on drag reduction in a turbulent channel flow", *Phys. Fluids*, 16(11), pp. 4150-4162.

Li, C.-F. Sureshkumar, R. Khomami, B. (2006). "Influence of rheological parameters on polymer induced turbulent drag reduction", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 140(1-3), pp. 23-40.

Lumley, J. L. (1969). "Drag reduction by additives", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1(1), pp. 367-384.

Manzhai, V. N. Nasibullina, Y. R. Kuchevskaya, A. S. Filimoshkin, A. G. (2014). "Physico-chemical concept of drag reduction nature in dilute polymer solutions (the Toms effect)", *Chem. Eng. Process.*, 80, pp. 38-42.

Pereira, A. S. Soares, E. J. (2012). "Polymer degradation of dilute solutions in turbulent drag reducing flows in a cylindrical double gap rheometer device", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 179-180, pp. 9-22.

Pereira, A. S. Andrade, R. M. Soares, E. J. (2013). "Drag reduction induced by flexible and rigid molecules in a turbulent flow into a rotating cylindrical double gap device: Comparison between Poly (ethylene oxide), Polyacrylamide, and Xanthan Gum", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*,

p مربوط به تنش پلیمری
R مربوط به تنش رینولدز
w دیواره

6- منابع

Bizotto, V. C. Sabadini, E. (2008). "Poly(ethylene oxide) × polyacrylamide. Which one is more efficient to promote drag reduction in aqueous solution and less degradable?", *J. Appl. Polym. Sci.*, 110(3), pp. 1844-1850.

Blatch, N. S. (1906). "Water Filtration at Washington", *Trans. A.S.C.E.*, 57, pp. 400-408.

Boutoudj, M. S. Ouibrahim, A. Barbeau, F. Deslouis, C. Martemianov, S. (2008). "Local shear stress measurements with microelectrodes in turbulent flow of drag reducing surfactant solutions", *Chem. Eng. Process.*, 47(5), pp. 793-798.

Choi, H. J. Kim, C. A. Sohn, J.-I. Jhon, M. S. (2000). "An exponential decay function for polymer degradation in turbulent drag reduction", *Polym. Degrad. Stab.*, 69(3), pp. 341-346.

De Gennes, P. (1986). "Towards a scaling theory of drag reduction", *Physica A*, 140(1-2), pp. 9-25.

Edomwonyi-Otu, L. Chinaud, M. Angeli, P. (2015). "Effect of drag reducing polymer on horizontal liquid-liquid flows", *Exp. Therm Fluid Sci.*, 64, pp. 164-174.

Eshrati, M. Al-Hashmi, A. Al-Wahaibi, T. Al-Wahaibi, Y. Al-Ajmi, A. Abubakar, A. (2015). "Drag reduction using high molecular weight polyacrylamides during multiphase flow of oil and water: a parametric study", *J. Pet. Sci. Eng.*, 135, pp. 403-409.

Guan, X.-L. Yao, S.-Y. Jiang, N. (2013). "A study on coherent structures and drag-reduction in the wall turbulence with polymer additives by TRPIV", *Acta Mech. Sin.*, 29(4), pp. 485-493.

Hong, C. H. Choi, H. J. Zhang, K. Renou, F. Grisel, M. (2015). "Effect of salt on turbulent drag reduction of xanthan gum", *Carbohydr. Polym.*, 121, pp. 342-347.

Japper-Jaafar, A. Escudier, M. P. Poole, R. J. (2009). "Turbulent pipe flow of a drag-reducing rigid "rod-like" polymer solution", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 161(1-3), pp. 86-93.

Kähler, C. J. Scharnowski, S. Cierpka, C. (2012). "On the uncertainty of digital PIV and PTV near walls", *Exp. Fluids*, 52(6), pp. 1641-1656.

- reduction in turbulent boundary layer over superhydrophobic surface by TRPIV", *Theor. Appl. Mech. Lett.*, 5(1), pp. 45-49.
- Toms, B. A. (1949). "Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers", *Proc. of the International Congress on Rheology*, pp. 135-141.
- Virk, P. S. (1975). "Drag reduction fundamentals", *AIChE J.*, 21(4), pp. 625-656.
- Werther, J. Hage, B. Rudnick, C. (1996). "A comparison of laser Doppler and single-fibre reflection probes for the measurement of the velocity of solids in a gas-solid circulating fluidized bed", *Chem. Eng. Process.*, 35(5), pp. 381-391.
- White, C. M. Mungal, M. G. (2008). "Mechanics and Prediction of Turbulent Drag Reduction with Polymer Additives", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 40(1), pp. 235-256.
- White, C. M. Mungal, M. G. (2008). "Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 40, pp. 235-256.
- Wyatt, N. B. Gunther, C. M. Liberatore, M. W. (2011). "Drag reduction effectiveness of dilute and entangled xanthan in turbulent pipe flow", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 166(1-2), pp. 25-31.
- Xueming, S. Jianzhong, L. Tao, W. Yulin, L. (2002). "Experimental research on drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow", *Can. J. Chem. Eng.*, 80(2), pp. 293-298.
- 202, pp. 72-87.
- Pinho, F. T. Li, C. F. Younis, B. A. Sureshkumar, R. (2008). "A low Reynolds number turbulence closure for viscoelastic fluids", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 154(2), pp. 89-108.
- Ptasinski, P. Nieuwstadt, F. Van Den Brule, B. Hulsen, M. (2001). "Experiments in turbulent pipe flow with polymer additives at maximum drag reduction", *Flow Turbul. Combust.*, 66(2), pp. 159-182.
- Rahimi, M. Akbari, M. H. Karami, H. R. (2015). "Investigation of drag reduction in microtube", paper presented at The 9th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2015)At: Shiraz, Iran.
- Reis, L. G. Oliveira, I. P. Pires, R. V. Lucas, E. F. (2016). "Influence of structure and composition of poly(acrylamide-g-propylene oxide) copolymers on drag reduction of aqueous dispersions", *Colloids Surf., A*, 502, pp. 121-129.
- Sandoval, G. A. B. Soares, E. J. (2016). "Effect of combined polymers on the loss of efficiency caused by mechanical degradation in drag reducing flows through straight tubes", *Rheol. Acta*, 55(7), pp. 559-569.
- Sohn, J. I. Kim, C. A. Choi, H. J. Jhon, M. S. (2001). "Drag-reduction effectiveness of xanthan gum in a rotating disk apparatus", *Carbohydr. Polym.*, 45(1), pp. 61-68.
- Tian, H. Zhang, J. Wang, E. Yao, Z. Jiang, N. (2015). "Experimental investigation on drag