

مقایسه دو پلیمر پلی آکریل آمید و کربوکسی متیل سلولز در کاهش نیروی درگ در خطوط لوله‌ی افقی همراه با نانوذرات اکسید منیزیم

نادیا اسفندیاری*

گروه مهندسی شیمی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده



واژه‌های کلیدی:

پلی آکریل آمید
کربوکسی متیل سلولز
اکسید منیزیم، کاهش درگ

Keywords:

Polyacrylamide,
Carboxymethyl cellulose,
Magnesium oxide,
Drag reduction

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

در این مطالعه، دو پلیمر پلی آکریل آمید و کربوکسی متیل سلولز به همراه نانوذرات اکسید منیزیم جهت کاهش درگ در خطوط لوله‌ی افقی از جنس گالوانیزه، مسی و پنج لایه مورد استفاده قرار گرفتند. در هر خط لوله، سه پارامتر موثر بر فرآیند غلظت نانوذره اکسید منیزیم (۰ تا ۱۶۰ میلی گرم بر لیتر)، غلظت پلیمر (۰ تا ۶۴ میلی گرم بر لیتر) و عدد رینولدز (۶۴۰۰ تا ۲۵۶۰۰) با استفاده از روش پاسخ نرم افزار طراحی آزمایش-۱۳ مورد بررسی قرار گرفت. سپس مقایسه‌ای بین میزان کاهش درگ دو پلیمر پلی آکریل آمید و کربوکسی متیل سلولز در هر خط لوله صورت گرفت. با استفاده از مدل به دست آمده میزان کاهش درگ پیش بینی شد. با افزایش مقدار هر سه پارامتر مورد بررسی، یعنی عدد رینولدز، غلظت پلیمر و غلظت نانوذره، میزان کاهش درگ به طور محسوسی افزایش یافت. در میان این عوامل، عدد رینولدز بیشترین تاثیر را بر کاهش درگ داشت و پس از آن به ترتیب غلظت پلیمر و غلظت نانوذره نقش مؤثری ایفا کردند. بررسی نتایج در هر سه خط لوله نشان داد که میزان کاهش درگ با استفاده از پلیمر کربوکسی متیل سلولز، کمتر از کاهش درگ با استفاده از پلیمر پلی آکریل آمید است. بنابراین پلی آکریل آمید عملکرد بهتری در کاهش درگ در سه خط لوله گالوانیزه، پنج لایه و مسی را نشان داد. نتایج نشان داد که در لوله گالوانیزه، پلی آکریل آمید حدود ۱۷٪، در لوله پنج لایه حدود ۱۶٪ و در لوله مسی حدود ۱۹٪ مؤثرتر از کربوکسی متیل سلولز در کاهش درگ بوده است.

مقدمه

و سامانه‌های حمل و نقل سیال است. در بسیاری از فرآیندهای صنعتی، مقاومت اصطکاکی ناشی از جریان آشفته در لوله‌ها باعث اتلاف انرژی

کاهش درگ^۱ در جریان‌های آشفته یکی از مباحث مهم در مهندسی مکانیک سیالات، صنایع نفت و گاز، پتروشیمی

*E-mail: n.esfandiari.2013@gmail.com & Nadia.esfandiari@iau.ac.ir

*عهدہ دار مکاتبات

رجاع: نادیا اسفندیاری، مقایسه دو پلیمر پلی آکریل آمید و کربوکسی متیل سلولز در کاهش نیروی درگ در خطوط لوله‌ی افقی همراه با نانوذرات اکسید منیزیم، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، ۴۵(۱): ۴۵ تا ۵۳، ۶۶ (۱۴۰۵).

(۱) Drag Reduction

از دیدگاه دینامیک سیالات، اختلاف نظر وجود دارد. در پژوهشی، اثرات افزودن نانوذرات سیلیکا به محلول‌های مختلف پلی‌آکریل‌امید بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات می‌تواند در نرخ‌های جریان بالا منجر به کاهش درگ شود، در حالی که در نرخ‌های جریان پایین‌تر، تأثیر کمتری مشاهده شد [۱۶]. مطالعه‌ای دیگر به بررسی تأثیر افزودن نانوذرات سیلیکا به محلول‌های پلی‌ایزوبوتیلن پرداخته است. اثر غلظت و عدد رینولدز بر عدد نوسلت و کاهش درگ با استفاده از روش آماری تحلیل واریانس مورد تحلیل قرار گرفت [۱۷]. پژوهش‌های زیادی در سال‌های اخیر در مورد مدل‌سازی کاهش درگ صورت گرفته است. از آن جمله می‌توان به مدل توسعه‌یافته با ادغام اثرات ویسکوالاستیک از طریق مدل سیال نیوتنی تعمیم‌یافته اصلاح‌شده و جایگزینی تابع میرایی با گزینه‌ای غیرنیوتنی، به شبیه‌سازی کاهش درگ در جریان‌های لوله‌ای توربولانسی اشاره کرد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در پیش‌بینی انرژی جنبشی آشفتگی، ضریب اصطکاک، سرعت محوری میانگین و تنش‌های رینولدز نسبت به مطالعات پیشین ارائه می‌دهد [۱۸]. سه سوسپانسیون آبی شامل پلی‌ایزوبوتیلن، استایرن-بوتادین و پلی‌استایرن به‌عنوان عوامل کاهش‌دهنده درگ برای جریان نفت در سیستم دیسک دوار بررسی شدند. کارایی کاهش درگ وابسته به غلظت بهینه، دما، سرعت جریان و رفتار رئولوژیکی پلیمرها بود و پلی‌ایزوبوتیلن با بیشترین وزن مولکولی بهترین عملکرد را نشان داد، در حالی که پلی‌استایرن به دلیل کوتاهی و سختی زنجیرها کمترین کارایی را داشت. کاهش درگ بیشتر با افزایش رفتار ویسکوالاستیک پلیمرها و شرایط مناسب جریان مرتبط بود، اما تخریب پلیمرها و ضعف نیروهای بین‌مولکولی در سرعت‌های بالاتر می‌توانست عملکرد را کمی کاهش دهد [۱۹]. در تحقیق دیگر کاهش افت فشار در جریان‌های توربولانسی لوله‌ای با استفاده از عوامل کاهش‌دهنده درگ بررسی شد. یک مدل $k-\omega$ جدید با در نظر گرفتن خواص رئولوژیکی سیالات ویسکوالاستیک غیرنیوتنی توسعه و در نرم‌افزار شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی^۵ گردید که نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت خوبی داشت [۲۰]. جریان توربولانسی سیالات کاهش‌دهنده درگ با استفاده از مدل‌های غیرنیوتنی RKE و RNG شبیه‌سازی و در نرم‌افزار شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی پیاده‌سازی شد. نتایج مدل با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد و نشان‌دهنده بهبود چشمگیر در پیش‌بینی پارامترهای جریان از جمله ضریب اصطکاک، سرعت محوری و تنش‌های رینولدز بود [۲۱]. سوسپانسیون آبی پلی‌استایرن با استفاده از سورفاکتانت و کو-سورفاکتانت تهیه شد و نمونه‌ای با کمترین غلظت نمک بیشترین پایداری و رفتار رئولوژیکی

قابل توجهی می‌شود. به همین دلیل، راهکارهایی برای کاهش درگ توسعه یافته‌اند که در آن‌ها افزودنی‌هایی به سیال پایه (معمولاً آب یا نفت) اضافه می‌شود تا نرخ افت فشار کاهش یابد و کارایی سیستم بهبود پیدا کند [۳-۱]. از جمله تکنیک‌های نوین و پرکاربرد برای کاهش درگ می‌توان به اضافه کردن افزودنی‌های پلیمری، تزریق نانوسیال، حباب و میکروحباب و استفاده همزمان پلیمر و نانوذرات اشاره کرد [۴، ۵]. یکی از رایج‌ترین افزودنی‌ها، پلیمرها هستند. پلیمرهایی با وزن مولکولی بالا نظیر پلی‌آکریل‌امید^۲، کربوکسی‌متیل سلولز^۳، پلی‌اتیلن‌اکسید^۳ و پلی‌وینیل‌الکل^۴ می‌توانند با مکانیزم کشیده شدن زنجیره‌ها در جریان آشفتنه، اندازه گردابه‌ها را کاهش داده و در نتیجه مقاومت اصطکاکی را کم کنند. با این حال، این پلیمرها ممکن است تحت برش‌های شدید تخریب شوند و عملکرد آن‌ها کاهش یابد. دسته دیگری از افزودنی‌ها، سورفاکتانت‌ها هستند. این مواد با تشکیل ساختارهای میسلار و ایجاد شبکه‌های دینامیک در سیال، موجب میرایی گردابه‌ها و کاهش آشفتگی می‌شوند. سورفاکتانت‌ها معمولاً نسبت به پلیمرها پایداری مکانیکی بالاتری دارند و قابلیت بازسازی ساختار بعد از تخریب را دارا هستند [۶-۱۰]. در دهه اخیر، استفاده از نانوذرات به‌عنوان عامل کاهش‌دهنده درگ توجه زیادی جلب کرده است. نانوذرات فلزی و اکسیدی مانند اکسید منیزیم، اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم به دلیل ویژگی‌های سطحی خاص، افزایش ویسکوالاستیسیتیه محلول و توانایی در تداخل با ساختار گردابه‌ها، می‌توانند به تنهایی یا در ترکیب با پلیمرها به‌طور مؤثری درگ را کاهش دهند [۱۱-۱۳]. در پژوهشی تأثیر تزریق نانوسیال حاوی نانوذرات سیلیکا بر کاهش افت فشار در جریان دو فازی هوا-آب در لوله‌های افقی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات در غلظت‌های مختلف می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در افت فشار شود [۱۴]. در مطالعه‌ای، تأثیر افزودن نانوذرات اکسید تیتانیوم و اکسید آهن به نفت خام در لوله‌های افقی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از نانوذرات می‌تواند منجر به کاهش درگ و بهبود انتقال حرارت شود [۱۵].

ترکیبات هیبریدی متشکل از پلیمر و نانوذره، رویکردی جدید و مؤثر در کاهش درگ ارائه می‌دهند. در این ترکیبات، پلیمر نقش اصلی در کاهش درگ را ایفا می‌کند و نانوذره به‌عنوان عامل پایداری و تقویت عملکرد پلیمر عمل می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب مناسب پلیمر و نانوذره می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به استفاده از هر کدام به تنهایی ارائه دهد، به شرط آنکه غلظت، اندازه ذرات و سازگاری شیمیایی به‌درستی تنظیم شود. با وجود تحقیقات گسترده در این زمینه، هنوز در مورد تأثیر افزودن نانوذرات بر بهبود عملکرد کاهش درگ پلیمرهای کاهش‌دهنده درگ و به‌ویژه مکانیسم پایه آن

(۱) Polyacrylamide
(۳) Polyethylene oxide
(۵) CFD

(۲) Carboxymethyl cellulose
(۴) Polyvinyl alcohol

مشاهده نشد. در حالی که در غلظت‌های بالاتر، افزایش چشمگیر ویسکوزیته و ته‌نشینی نانوذرات منجر به ناپایداری محلول و افت عملکرد سیستم شد. بنابراین، محدوده‌ی انتخاب‌شده به‌گونه‌ای تعیین گردید که هم پایداری محلول و هم بیشترین کارایی کاهش درگ در شرایط آزمایشی تضمین شود. خطوط لوله مورد بررسی شامل لوله‌های گالوانیزه ۰/۵ اینچ، مسی و پنج‌لایه بود. آزمایش‌ها با تغییر پارامترهای غلظت نانوذرات، غلظت پلیمر و عدد رینولدز طراحی شد و کاهش درگ برای دو پلیمر مورد مقایسه قرار گرفت. هدف اصلی این مطالعه، مقایسه عملکرد دو پلیمر پلی‌آکریل‌آمید و کربوکسی‌متیل سلولز در کاهش درگ در انواع لوله‌ها است. در پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر روی یک نوع پلیمر یا نانوذره به‌صورت جداگانه تمرکز شده است و مطالعات مقایسه‌ای در این زمینه بسیار محدود بوده‌اند. بنابراین، این تحقیق تلاش دارد این خلأ را پوشش دهد.

بخش تجربی

مواد

جهت کاهش درگ در خطوط لوله افقی از آب یون‌زدایی‌شده (با خلوص ۹۹/۸ درصد) به عنوان سیال پایه و از نانوذرات اکسید منیزیم (با خلوص ۹۹ درصد، سایز متوسط ذرات ۴۰ نانومتر، سطح ویژه ۴۵ مترمربع بر گرم، دانسیته ۳/۵۸ گرم بر سانتی متر مکعب)، کربوکسی‌متیل سلولز (میزان خلوص ۹۹ درصد، ویسکوزیته پایین و وزن مولکولی ۹۰۰۰۰ گرم بر مول) و پلیمر پلی‌آکریل‌آمید (خلوص ۹۹ درصد، وزن مولکولی پایین و وزن مولکولی ۱۵۰۰۰۰ گرم بر مول) ساخت شرکت سیگما آلدریج^۱ استفاده شده است.

تهیه نانوسیال و انجام آزمایش

دو نوع نانوسیال در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. در هر دو نانو سیال، از نانوذرات اکسید منیزیم استفاده شد. پلیمرهای پلی‌آکریل‌آمید و کربوکسی‌متیل سلولز جهت بررسی کاهش درگ به کار گرفته شد. جهت تهیه نانوسیال ابتدا نانوذرات اکسید منیزیم و پلی‌آکریل‌آمید با غلظت‌های مشخص شده در طراحی آزمایش، هم‌زمان به آب یون‌زدایی‌شده اضافه شدند. سپس به مدت ۱ ساعت با دستگاه آلتراسونیک تحت امواج فراصوت قرار گرفت تا یک محلول همگن تشکیل شود. همین روند برای تهیه نانو سیال اکسید منیزیم و پلیمر کربوکسی‌متیل سلولز تکرار شد. از این دو محلول جهت انجام آزمایش‌ها استفاده شد. تمام آزمایشات در دمای محیط ۱۷ درجه سلسیوس انجام شد.

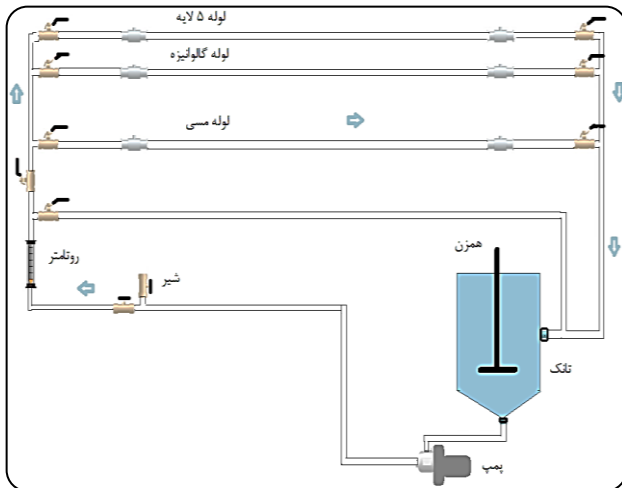
مناسب را نشان داد [۲۲]. در نمونه ای دیگر از سوسپانسیون آبی پلی‌ایزوبوتیلن با نسبت کو-سورفاکتانت ۰/۶۶ بیشترین پایداری، اندازه ذرات مناسب و رفتار رئولوژیکی مطلوب را نشان داد [۲۳]. لوله پنج‌لایه مورد استفاده در این پژوهش از نوع PEX-AL-PEX بوده است که از ترکیب پلی‌اتیلن مشبک‌شده و لایه‌ای از آلومینیوم میانی تشکیل شده است. ساختار این لوله شامل پنج لایه به ترتیب: لایه داخلی پلی‌اتیلن مشبک، چسب پلیمری، لایه آلومینیوم، چسب پلیمری و لایه بیرونی پلی‌اتیلن مشبک است. این ساختار ترکیبی موجب می‌شود لوله خواص هر دو نوع ماده پلیمری و فلزی را به‌طور هم‌زمان دارا باشد. لایه داخلی صاف پلیمری سبب کاهش زبری سطح و افت فشار کمتر در جریان سیال می‌شود، در حالی که لایه آلومینیومی نقش افزایش مقاومت مکانیکی، پایداری حرارتی و جلوگیری از نفوذ اکسیژن را ایفا می‌کند. به همین دلیل، لوله‌های پنج‌لایه در سال‌های اخیر به‌عنوان جایگزین مناسبی برای لوله‌های فلزی در سیستم‌های انتقال آب، گرمایش و سرمایش، و کاربردهای صنعتی سبک مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در این پژوهش از سه نوع لوله گالوانیزه، مسی و پنج‌لایه استفاده شد تا تأثیر جنس و زبری سطح داخلی لوله بر عملکرد کاهش درگ بررسی شود. لوله گالوانیزه دارای سطح نسبتاً زبر است و در بسیاری از شبکه‌های انتقال آب شهری و صنعتی کاربرد دارد. لوله مسی سطحی صاف‌تر از گالوانیزه دارد اما به دلیل ویژگی‌های فلزی، می‌تواند بر رفتار جریان و پخش افزودنی‌ها اثر بگذارد. در مقابل، لوله پنج‌لایه (پلیمری) دارای سطح داخلی بسیار صاف است و به عنوان نسل جدید لوله‌های انتقال سیالات در سیستم‌های ساختمانی و صنعتی استفاده می‌شود. مقایسه این سه نوع لوله امکان ارزیابی نقش زبری سطح، جنس دیواره و خواص ترشوندگی را در کاهش درگ فراهم می‌کند و به درک جامع‌تری از عملکرد افزودنی‌های پلیمری و نانو ساختار در شرایط عملی نزدیک‌تر منجر می‌شود. در مجموع، انتخاب افزودنی مناسب برای کاهش درگ به عوامل متعددی از جمله نوع سیال، دبی جریان و ملاحظات اقتصادی بستگی دارد. مطالعات اخیر به‌طور ویژه بر ترکیب پلیمر-نانوذره و بهینه‌سازی ساختار آن‌ها برای دستیابی به کاهش درگ پایدار و مؤثر متمرکز شده‌اند. در این تحقیق، از دو نوع نانوسیال استفاده شد: نوع اول شامل نانوذرات اکسید منیزیم و پلیمر پلی‌آکریل‌آمید و نوع دوم شامل نانوذرات اکسید منیزیم و پلیمر کربوکسی‌متیل سلولز بود. محدوده‌های انتخاب‌شده برای دو متغیر غلظت نانوذره اکسید منیزیم و غلظت پلیمرها (پلی‌آکریل‌آمید و کربوکسی‌متیل سلولز) بر اساس مرور مقالات معتبر پیشین و نیز مشاهدات تجربی اولیه در این پژوهش تعیین شده‌اند. در غلظت‌های پایین‌تر، اثر قابل‌توجهی بر کاهش درگ

(۱) Sigma-Aldrich

جدول ۱ - محدوده‌ی متغیرهای در نظر گرفته شده در طرح آزمایش روش پاسخ سطحی

سطوح کدشده					نماد	متغیرهای مستقل
-۱/۶	-۱	۰	۱	۱/۶		
۰	۳۰	۸۰	۱۳۰	۱۶۰	X ₁	غلظت نانوذره (میلی گرم بر لیتر)
۰	۱۲	۳۲	۵۲	۶۴	X ₂	غلظت پلیمر (میلی گرم بر لیتر)
۶۴۰۰	۱۰۰۰۰	۱۶۰۰۰	۲۲۰۰۰	۲۵۶۰۰	X ₃	عدد رینولدز



شکل ۱- شماتیک دستگاه آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری افت فشار

مقدار فاصله نقاط محوری (α) برابر ۱/۶ در نظر گرفته شد. انتخاب این مقدار آلفا با هدف ایجاد توازن بین گستره تغییرات متغیرها و محدودیت‌های عملی آزمایش بود. مقادیر این سه متغیر با توجه به این فاصله در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به این سطوح، ۲۰ آزمایش طراحی شد. آزمایش در سطح کد گذاری شده، چهار مرتبه تکرار می‌شود. در این سطح غلظت نانو ذره ۸۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت پلیمر ۳۲ میلی گرم بر لیتر و عدد رینولدز ۱۶۰۰۰ است. پاسخ سیستم درصد کاهش درگ است که در هر آزمایش اندازه‌گیری و گزارش می‌شود. بعد از این مرحله با استفاده از نرم افزار طراحی آزمایش خروجی مدل به صورت زیر (معادله ۲) به دست می‌آید.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 \quad (2)$$

که در آن Y مقدار پاسخ پیش بینی شده توسط مدل (خروجی) است. پاسخ اینجا کاهش درگ است. ترم‌های β نشان دهنده ضرایب رگرسیون است. β_0 عرض از مبدا، $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ ضرایب خطی، $\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ ضرایب اثرات درجه دوم و $\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ اثرات برهم‌کنش (متقابل) هستند. x_1, x_2 و x_3 متغیرهای کد شده مورد بررسی هستند.

ستاپ آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش

دستگاه آزمایشگاهی متشکل از ۳ خط لوله جهت انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. سه نوع لوله شامل گالوانیزه، مسی و پنج‌لایه در سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. قطر داخلی هر سه لوله برابر با ۰/۵ اینچ بود. طول هر کدام از لوله‌ها ۶ متر بوده و سیال درون آن به صورت پیوسته در مدار جریان یافته و مجدداً به مخزن بازگردانده می‌شود. به منظور حذف اثرات ورود و خروج سیال از لوله‌ها، افت فشار تنها در بخش ۴ متر میانی خط لوله اندازه‌گیری شد. در مرحله نخست، آزمایش‌ها با استفاده از آب خالص (بدون هیچ‌گونه افزودنی شامل نانوذره یا پلیمر) و در مقادیر مشخصی از عدد رینولدز تعیین شده بر اساس طراحی آزمایش انجام شد و افت فشار در دو انتهای خط لوله (ΔP) برای هر سه نوع لوله با جنس متفاوت اندازه‌گیری گردید. پس از این مرحله، نانوسیال با غلظت‌های تعیین شده به سیال پایه افزوده شد و مقادیر جدید افت فشار (ΔP_{DRA}) ثبت شد. در نهایت، میزان کاهش درگ با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد.

$$DR = [(\Delta P - \Delta P_{DRA}) / \Delta P] \times 100 \quad (1)$$

سیال موجود در مخزن توسط یک پمپ سانتریفیوژ به درون خطوط لوله افقی وارد شد. دبی جریان با استفاده از یک روماتر شیشه‌ای تنظیم گردید. همچنین، افت فشار در طول لوله‌ها به کمک یک فشارسنج دیجیتال اندازه‌گیری شد. شمای کلی تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در شکل ۱ ارائه شده است.

طراحی آزمایش

جهت بررسی تاثیر سه پارامتر غلظت نانوذره، غلظت پلیمر و رینولدز، روش پاسخ سطحی^۱ انتخاب شد. از نرم افزار طراحی آزمایش-۱۳^۲ و روش طرح مرکب مرکزی^۳ استفاده شد. در واقع روش طرح مرکب مرکزی یک روش آماری در چارچوب سطوح پاسخ برای طراحی آزمایش است. در این طراحی آزمایش سه متغیر مستقل موثر بر کاهش درگ شامل غلظت نانوذره (X_1)، غلظت پلیمر (X_2) و عدد رینولدز (X_3) در نظر گرفته شد. به منظور دستیابی به دقت مناسب در برازش مدل درجه دوم و ایجاد قابلیت چرخش‌پذیری نسبی در طرح،

(۱) Response Surface Method (RSM)

(۲) Design-Exper-13

(۳) Central Composite Design (CCD)

جدول ۲ - مقایسه میزان کاهش درگ در خط لوله گالوانیزه با نانو ذرات اکسید منیزیم و دو پلیمر پلی‌آکریل‌آمید و کربوکسی‌متیل سلولز، داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل

آزمایش	غلظت نانوذره (میلی گرم بر لیتر)	غلظت پلیمر (میلی گرم بر لیتر)	عدد رینولدز	کاهش درگ با پلی‌آکریل‌آمید (داده‌های تجربی)	کاهش درگ با کربوکسی‌متیل سلولز (پیش‌بینی شده توسط مدل)	کاهش درگ با کربوکسی‌متیل سلولز (داده‌های تجربی)	کاهش درگ با کربوکسی‌متیل سلولز (پیش‌بینی شده توسط مدل)
۱	۳۰	۱۲	۱۰۰۰۰	۲۸	۲۶/۷۷۴۷	۱۸	۱۷/۶۸۱۱
۲	۱۳۰	۵۲	۱۰۰۰۰	۴۳	۴۱/۹۱۴۷	۲۸	۲۷/۹۲۱۱
۳	۳۰	۵۲	۲۲۰۰۰	۶۷	۶۴/۳۵۴۷	۴۴	۴۳/۹۲۱۱
۴	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۵۲	۵۲/۰۵۰۰	۳۴	۳۳/۹۹۰۰
۵	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۵۲	۵۲/۰۵۰۰	۳۴	۳۳/۹۹۰۰
۶	۱۳۰	۱۲	۲۲۰۰۰	۶۴	۶۳/۸۵۴۷	۴۲	۴۰/۷۴۱۱
۷	۳۰	۱۲	۲۲۰۰۰	۶۱	۶۲/۵۳۴۷	۴۰	۳۹/۹۶۱۱
۸	۱۳۰	۱۲	۱۰۰۰۰	۲۲	۲۵/۰۹۴۷	۲۱	۲۰/۹۶۱۱
۹	۳۰	۵۲	۱۰۰۰۰	۳۸	۳۸/۵۹۴۷	۲۵	۲۴/۱۴۱۱
۱۰	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۵۲	۵۲/۰۵۰۰	۳۴	۳۳/۹۹۰۰
۱۱	۱۳۰	۵۲	۲۲۰۰۰	۶۹	۷۰/۶۴۴۷	۴۵	۴۵/۲۰۱۱
۱۲	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۵۲	۵۲/۰۵۰۰	۳۴	۳۳/۹۹۰۰
۱۳	۱۶۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۵۵	۵۲/۹۹۶۴	۳۶	۳۵/۴۳۱۰
۱۴	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۵۲	۵۲/۰۵۰۰	۳۴	۳۳/۹۹۰۰
۱۵	۸۰	۰	۱۶۰۰۰	۴۶	۴۴/۱۸۴۴	۳۰	۲۹/۷۳۹۰
۱۶	۸۰	۳۲	۲۵۶۰۰	۷۲	۷۱/۹۴۴۴	۴۷	۴۶/۴۳۴۸
۱۷	۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۴۸	۴۹/۲۸۴۴	۳۱	۳۱/۷۸۳۰
۱۸	۸۰	۶۴	۱۶۰۰۰	۵۸	۵۹/۰۹۶۴	۳۸	۳۸/۴۷۵۰
۱۹	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۵۲	۵۲/۰۵۰۰	۳۴	۳۳/۹۹۰۰
۲۰	۸۰	۳۲	۶۴۰۰	۲۱	۲۰/۳۲۸۴	۱۴	۱۴/۷۸۶۸

بحث و نتایج

کاهش درگ در خط لوله گالوانیزه

افزایش یافته و توانایی بیشتری در تضعیف و سرکوب گردابه‌های کوچک جریان داشته و در نتیجه افت فشار کاهش یافته و کاهش درگ بیشتری حاصل می‌شود. از منظر ساختاری، پلیمرها را می‌توان به دو گروه انعطاف‌پذیر و صلب (انعطاف‌ناپذیر) طبقه‌بندی کرد. پلیمرهای انعطاف‌پذیر عملکرد مؤثرتری در کاهش درگ از خود نشان می‌دهند. در این زمینه، پلی‌آکریل‌آمید در گروه پلیمرهای انعطاف‌پذیر قرار می‌گیرد، در حالی که کربوکسی‌متیل سلولز در دسته پلیمرهای صلب طبقه‌بندی می‌شود [۲۶-۲۴]. بنابراین، انتظار می‌رود استفاده از پلی‌آکریل‌آمید منجر به کاهش درگ بیشتری شود. نتایج تجربی نیز این روند را تأیید می‌کنند. در خط لوله گالوانیزه و تحت شرایط مختلف آزمایش، پلی‌آکریل‌آمید کاهش درگ بالاتری نسبت به کربوکسی‌متیل سلولز نشان داده است.

معادلات حاصل از مدل برای محاسبه کاهش درگ با استفاده از دو پلیمر در لوله گالوانیزه در معادلات ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل در جدول ۲ گزارش شده است. مقایسه بین مقادیر به‌دست‌آمده از داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی‌شده نشان می‌دهد که مدل قادر است با دقت قابل قبول میزان کاهش درگ را در شرایط مختلف تخمین بزند. این میزان تطابق

جدول ۲ داده‌های تجربی کاهش درگ با نانو ذرات اکسید منیزیم و دو پلیمر پلی‌آکریل‌آمید و کربوکسی‌متیل سلولز را در خط لوله گالوانیزه مقایسه می‌کند. در شرایط یکسان (غلظت نانوذره، غلظت پلیمر و عدد رینولدز)، مقدار کاهش درگ در حضور پلی‌آکریل‌آمید بیشتر از کربوکسی‌متیل سلولز مشاهده شد. بنابراین، پلی‌آکریل‌آمید عملکرد مؤثرتر و کارآمدتری در کاهش درگ نسبت به کربوکسی‌متیل سلولز نشان داده است. به‌طور کلی، در مورد پلیمرها، عواملی نظیر غلظت، وزن مولکولی، چگالی بار، ساختار شیمیایی و میزان انعطاف‌پذیری زنجیره‌های پلیمری می‌توانند بر رفتار کاهش درگ تأثیرگذار باشند. در این پژوهش و با توجه به نوع پلیمرهای مورد استفاده، دو عامل وزن مولکولی و انعطاف‌پذیری زنجیره‌های پلیمری نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان کاهش درگ دارند. به‌طور معمول، افزایش وزن مولکولی پلیمر موجب افزایش کاهش درگ می‌شود. پلی‌آکریل‌آمید دارای وزن مولکولی بسیار بالا است، در حالی که کربوکسی‌متیل سلولز از وزن مولکولی کمتری برخوردار است. هرچه وزن مولکولی پلیمر بیشتر باشد، طول زنجیره‌های پلیمری

جدول ۳ - نتایج سطح معنی داری از آنالیز واریانس برای نانو ذرات اکسید منیزیم و دو پلیمر پلی آکریل آمید و کربوکسی متیل سلولز در لوله گالوانیزه

منبع	مقادیر سطح معنی داری جهت پلیمر پلی آکریل آمید	مقادیر سطح معنی داری جهت پلیمر کربوکسی متیل سلولز
مدل	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
اثر خطی غلظت نانو ذره	۰/۰۴۹۹	۰/۰۰۰۱
اثر خطی غلظت پلیمر	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
اثر خطی عدد رینولدز	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
اثر برهمکنش بین غلظت نانو ذره و غلظت پلیمر	۰/۰۸۹۹۷	۰/۵۶۹۵
اثر برهمکنش بین غلظت نانو ذره و عدد رینولدز	۰/۲۸۶۰	۰/۰۱۴۸
اثر برهمکنش بین غلظت پلیمر و عدد رینولدز	۰/۰۰۳۷	۰/۰۱۴۸
اثر غیر خطی غلظت نانو ذره بر پاسخ (مربعی)	۰/۵۲۰۶	۰/۴۰۰۷
اثر غیر خطی غلظت پلیمر بر پاسخ (مربعی)	۰/۷۷۰۴	۰/۷۹۴۰
اثر غیر خطی عدد رینولدز بر پاسخ (مربعی)	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۱

$$Y = 52.05 + 1.16x_1 + 4.66x_2 + 16.13x_3 + 1.25x_1x_2 + 0.75x_1x_3 - 2.5x_2x_3 - 0.3553x_1^2 - 0.16x_2^2 - 2.31x_3^2 \quad (۳)$$

$$Y = 33.99 + 1.14x_1 + 2.73x_2 + 9.89x_3 + 0.125x_1x_2 - 0.625x_1x_3 - 0.625x_2x_3 - 0.1496x_1^2 - 0.0457x_2^2 - 1.32x_3^2 \quad (۴)$$

پاسخ دارند. برای پلیمر پلی آکریل آمید، برهم کنش بین غلظت پلیمر و عدد رینولدز (۰/۰۰۳۷) از نظر آماری معنی دار بوده است، در حالی که برهم کنش بین غلظت نانو ذره و غلظت پلیمر (۰/۸۹۹۷) و نیز بین غلظت نانو ذره و عدد رینولدز (۰/۲۸۶۰) معنی دار نبوده اند. این موضوع نشان می دهد که اثر متقابل پلیمر و رینولدز بر میزان کاهش درگ قابل توجه است، اما اثر ترکیب نانو ذره با سایر عوامل چندان برجسته نیست.

در مورد پلیمر کربوکسی متیل سلولز، برهم کنش میان غلظت نانو ذره و عدد رینولدز (۰/۰۱۴۸) و همچنین بین غلظت پلیمر و عدد رینولدز معنی دار تشخیص داده شده است، در حالی که برهم کنش بین غلظت نانو ذره و غلظت پلیمر (۰/۵۶۹۵) تأثیر قابل توجهی نشان نداده است. نتایج بیانگر آن است که در این پلیمر، تغییر همزمان سرعت جریان (عدد رینولدز) با غلظت مواد افزودنی نقش تعیین کننده ای در رفتار پاسخ دارد. به طور کلی، اثرات معنی دار برهم کنشها نشان می دهد که تأثیر هر عامل بر پاسخ به سطح سایر عوامل وابسته است، و بهینه سازی عملکرد سیستم تنها از طریق بررسی همزمان متغیرها امکان پذیر است.

کاهش درگ در خط لوله پنج لایه

خط لوله بعدی مورد بررسی، لوله پنج لایه بود که قطر آن با خط لوله گالوانیزه برابر است. نتایج نشان داد که در این نوع لوله نیز پلی آکریل آمید نسبت به کربوکسی متیل سلولز عملکرد مؤثرتری در کاهش درگ دارد (جدول ۴). معادلات ۵ و ۶ به عنوان مدل های محاسباتی کاهش درگ برای لوله پنج لایه توسعه داده شده اند. با استفاده از این مدل و در شرایط مختلف شامل مقادیر کدگذاری شده

در داده های مربوط به هر دو پلیمر، یعنی پلی آکریل آمید و کربوکسی متیل سلولز مشاهده می شود. همانطور که در معادله ۲ توضیح داده شد، فرمول عوامل کدگذاری شده می تواند پاسخ را برای سطوح عامل خاص پیش بینی کند. فرمول کدگذاری شده از طریق مقایسه ضرایب، به ارزیابی تأثیر مقایسه ای عوامل کمک می کند. در معادله کدگذاری شده، متغیرهای x_1 ، x_2 و x_3 به ترتیب نشان دهنده غلظت نانو ذره، غلظت پلیمر و عدد رینولدز هستند.

برای پلیمر پلی آکریل آمید، ضریب تبیین^۱ و ضریب تبیین تعدیل شده^۲ مقادیر ۰/۹۹۰۹ و ۰/۹۸۲۷ به دست آمده است. این در حالی است که برای پلیمر کربوکسی متیل سلولز، مقادیر ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل شده به ترتیب ۰/۹۹۷۵ و ۰/۹۹۵۲ تعیین شد. این مقادیر نشان می دهند که مدل قادر است تقریباً تمامی تغییرات موجود در داده های تجربی را توضیح دهد. همچنین نزدیکی مقدار ضریب تبیین تعدیل شده به ضریب تبیین بیانگر آن است که افزودن متغیرهای مدل موجب بیش برآزش نشده است. در مجموع، مدل توسعه یافته از دقت و قابلیت پیش بینی مناسبی برخوردار بوده و می تواند برای تخمین پاسخ تحت شرایط آزمایشی مورد استفاده قرار گیرد. مقادیر سطح معنی داری^۳ مربوط به دو پلیمر در جدول ۳ ارائه شده است.

برای تمام ضرایب مدل، سطح معنی داری محاسبه شده است تا معنی داری آماری اثر هر عامل بررسی شود. مقادیر کمتر از ۰/۰۱ اثر بسیار معنی دار، مقادیر بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ معنی دار، بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ مرزی یا نسبی و بزرگتر از ۰/۱ بی معنی است. بر اساس نتایج جدول ۳، بررسی مقادیر سطح معنی داری نشان می دهد که برخی از برهم کنش های بین پارامترها تأثیر معنی داری بر متغیر

(۱) R^2
(۳) p-value

(۲) R_{adj}^2

جدول ۴ - مقایسه میزان کاهش درگ در خط لوله پنج‌لایه با نانو ذرات اکسید منیزیم و دو پلیمر پلی‌آکریل‌آمید و کربوکسی‌متیل سلولز؛ داده‌های تجربی

و پیش‌بینی شده توسط مدل

آزمایش	غلظت نانوذره (میلی گرم بر لیتر)	غلظت پلیمر (میلی گرم بر لیتر)	عدد رینولدز	کاهش درگ با پلی‌آکریل‌آمید (داده‌های تجربی)	کاهش درگ با پلی‌آکریل‌آمید (پیش‌بینی شده توسط مدل)	کاهش درگ با کربوکسی‌متیل سلولز (داده‌های تجربی)	کاهش درگ با کربوکسی‌متیل سلولز (پیش‌بینی شده توسط مدل)
۱	۳۰	۱۲	۱۰۰۰۰	۲۵	۲۵/۰۹۴۰	۱۵	۱۴/۳۳۸۴
۲	۱۳۰	۵۲	۱۰۰۰۰	۳۵	۲۵/۹۵۴۰	۲۲	۲۲/۲۱۸۴
۳	۳۰	۵۲	۲۲۰۰۰	۶۰	۶۱/۵۵۴۰	۳۷	۳۷/۰۱۸۴
۴	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۴۵	۴۵/۲۰۰۰	۲۸	۲۷/۹۶۰۰
۵	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۴۵	۴۵/۲۰۰۰	۲۸	۲۷/۹۶۰۰
۶	۱۳۰	۱۲	۲۲۰۰۰	۵۶	۵۳/۹۴۰	۳۵	۳۴/۸۳۸۴
۷	۳۰	۱۲	۲۲۰۰۰	۵۴	۵۰/۷۹۴۰	۳۳	۳۲/۷۳۸۴
۸	۱۳۰	۱۲	۱۰۰۰۰	۲۸	۲۸/۱۹۴۰	۱۷	۱۶/۹۳۸۴
۹	۳۰	۵۲	۱۰۰۰۰	۲۱	۲۲/۸۵۴۰	۱۹	۱۹/۱۱۸۴
۱۰	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۴۵	۴۵/۲۰۰۰	۲۸	۲۷/۹۶۰۰
۱۱	۱۳۰	۵۲	۲۲۰۰۰	۶۳	۶۴/۶۵۴۰	۳۹	۳۹/۶۱۸۴
۱۲	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۴۵	۴۵/۲۰۰۰	۲۸	۲۷/۹۶۰۰
۱۳	۱۶۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۴۹	۴۵/۶۲۴۳	۳۰	۲۹/۸۴۷۲
۱۴	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۴۵	۴۵/۲۰۰۰	۲۸	۲۷/۹۶۰۰
۱۵	۸۰	۰	۱۶۰۰۰	۳۷	۳۹/۷۳۶۳	۲۳	۲۴/۳۵۸۸
۱۶	۸۰	۳۲	۲۵۶۰۰	۶۵	۶۵/۹۱۶۸	۴۰	۴۰/۰۸۷۱
۱۷	۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۴۰	۴۰/۶۶۴۳	۲۵	۲۵/۶۸۷۲
۱۸	۸۰	۶۴	۱۶۰۰۰	۵۲	۴۶/۵۵۲۳	۳۲	۳۱/۹۷۶۸
۱۹	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۴۵	۴۵/۲۰۰۰	۲۸	۲۷/۹۶۰۰
۲۰	۸۰	۳۲	۶۴۰۰	۱۸	۱۴/۳۹۶۸	۱۱	۱۱/۴۴۷۱

$$Y = 45.2 + 1.55x_1 + 2.13x_2 + 16.13x_3 + 3.5x_2x_3 - 0.803x_1^2 - 0.803x_2^2 - 1.97x_3^2 \quad (5)$$

$$Y = 27.96 + 1.3x_1 + 2.39x_2 + 8.95x_3 + 0.125x_1x_2 - 0.125x_1x_3 - 0.125x_2x_3 - 0.0753x_1^2 - 0.0753x_2^2 - 0.8566x_3^2 \quad (6)$$

آماري دارد، هرچند شدت آن در پلی‌آکریل‌آمید کمتر از کربوکسی‌متیل سلولز است. علاوه بر این، عدد رینولدز در هر دو سیستم نقش اصلی و تعیین‌کننده‌ای در تغییرات پاسخ داشته است.

در بررسی برهم‌کنش‌ها، نتایج نشان می‌دهد که برای پلی‌آکریل‌آمید، تنها برهم‌کنش بین غلظت پلیمر و عدد رینولدز معنی‌دار بوده است، در حالی که سایر برهم‌کنش‌ها (نانوذره × پلیمر و نانوذره × رینولدز) فاقد اهمیت آماری‌اند. این امر بیانگر آن است که رفتار پاسخ در حضور پلیمر به‌شدت به شرایط جریان وابسته است. در مقابل، برای پلیمر کربوکسی‌متیل سلولز هیچ‌یک از اثرات برهم‌کنشی معنی‌دار تشخیص داده نشد، که نشان می‌دهد اثرات عوامل بر پاسخ در این سیستم بیشتر به‌صورت مستقل بروز می‌کنند. در میان اثرات غیرخطی، مشاهده شد که تنها عدد رینولدز در سیستم کربوکسی‌متیل سلولز رفتار غیرخطی معنی‌داری نسبت به پاسخ دارد، در حالی که سایر مؤلفه‌های مربعی در هر دو سیستم فاقد معنی‌داری آماری‌اند. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که در لوله پنج‌لایه، تغییرات پاسخ عمدتاً تحت تأثیر مستقیم عدد رینولدز و اثرات خطی غلظت پلیمرهاست و اثرات برهم‌کنشی محدود و انتخابی می‌باشند.

غلظت نانوذرات اکسید منیزیم، غلظت پلیمر و عدد رینولدز، میزان کاهش درگ محاسبه شده و نتایج در جدول ۴ گزارش شده‌اند. مقایسه بین داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که مدل از دقت و قابلیت پیش‌بینی بالایی برخوردار است.

برای پلیمر پلی‌آکریل‌آمید، مقدار ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل‌شده مقادیر ۰/۹۷۱۶ و ۰/۹۴۵۹ به دست آمده است. این ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل‌شده جهت پلیمر کربوکسی‌متیل سلولز مقادیر ۰/۹۹۷۴ و ۰/۹۹۵۱ به دست آمده است. نزدیکی مقادیر ضریب تبیین تعدیل‌شده به ضریب تبیین بیانگر آن است که مدل از برازش مناسبی برخوردار بوده است. بدین ترتیب، مدل از دقت و قابلیت اطمینان بالایی برای پیش‌بینی پاسخ در شرایط آزمایشی برخوردار است. بر اساس مقادیر سطح معنی‌داری ارائه‌شده در جدول ۵، مشاهده می‌شود که برای هر دو پلیمر پلی‌آکریل‌آمید و کربوکسی‌متیل سلولز، مدل کلی از نظر آماری در سطح اطمینان بالا معنی‌دار است. در میان اثرات خطی، غلظت نانوذره برای پلی‌آکریل‌آمید تأثیر قابل توجهی نداشته، اما برای کربوکسی‌متیل سلولز بسیار معنی‌دار است. اثر خطی غلظت پلیمر نیز در هر دو مورد اهمیت

جدول ۵ - نتایج سطح معنی داری از آنالیز واریانس برای نانو ذرات اکسید منیزیم و دو پلیمر پلی آکریل آمید و کربوکسی متیل سلولز در لوله پنج لایه

منبع مدل	مقادیر سطح معنی داری جهت پلیمر پلی آکریل آمید	مقادیر سطح معنی داری جهت پلیمر کربوکسی متیل سلولز
اثر خطی غلظت نانو ذره	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
اثر خطی غلظت پلیمر	۰/۱۱۵۱	۰/۰۰۰۱
اثر خطی عدد رینولدز	۰/۰۳۹۴	۰/۰۰۰۱
اثر برهمکنش بین غلظت نانو ذره و غلظت پلیمر	۱	۰/۵۳۲۰
اثر برهمکنش بین غلظت نانو ذره و عدد رینولدز	۱	۰/۵۳۲۰
اثر برهمکنش بین غلظت پلیمر و عدد رینولدز	۰/۰۱۸۳	۰/۵۳۲۰
اثر غیر خطی غلظت نانو ذره بر پاسخ (مربعی)	۰/۴۰۵۹	۰/۶۳۷۲
اثر غیر خطی غلظت پلیمر بر پاسخ (مربعی)	۰/۴۰۵۹	۰/۶۳۷۲
اثر غیر خطی عدد رینولدز بر پاسخ (مربعی)	۰/۰۵۸۶	۰/۰۰۰۳

جدول ۶ - مقایسه میزان کاهش درگ در خط لوله مسی با نانو ذرات اکسید منیزیم و دو پلیمر پلی آکریل آمید و کربوکسی متیل سلولز، داده‌های تجربی

و پیش بینی شده توسط مدل

آزمایش	غلظت نانوذره (میلی گرم بر لیتر)	غلظت پلیمر (میلی گرم بر لیتر)	عدد رینولدز	کاهش درگ با پلی آکریل آمید (داده‌های تجربی)	کاهش درگ با پلی آکریل آمید (پیش بینی شده توسط مدل)	کاهش درگ با کربوکسی متیل سلولز (داده‌های تجربی)	کاهش درگ با کربوکسی متیل سلولز (پیش بینی شده توسط مدل)
۱	۳۰	۱۲	۱۰۰۰۰	۱۹	۱۸/۱۵۰۹	۱۰	۹/۹۰۵۹
۲	۱۳۰	۵۲	۱۰۰۰۰	۲۹	۳۰/۱۹۰۹	۱۶	۱۵/۸۵۲۳
۳	۳۰	۵۲	۲۲۰۰۰	۵۵	۵۴/۶۹۰۹	۲۶	۲۶/۲۸۵۹
۴	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۳۹	۳۸/۹۷۰۰	۲۰	۱۹/۹۸۰۰
۵	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۳۹	۳۸/۹۷۰۰	۲۰	۱۹/۹۸۰۰
۶	۱۳۰	۱۲	۲۲۰۰۰	۵۲	۵۰/۹۱۰۹	۲۴	۲۴/۶۳۲۳
۷	۳۰	۱۲	۲۲۰۰۰	۵۰	۴۸/۵۳۰۹	۲۳	۲۲/۹۸۵۹
۸	۱۳۰	۱۲	۱۰۰۰۰	۲۲	۲۲/۰۳۰۹	۱۴	۱۳/۵۵۲۳
۹	۳۰	۵۲	۱۰۰۰۰	۲۵	۲۵/۸۱۰۹	۱۵	۱۴/۲۰۵۹
۱۰	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۳۹	۳۸/۹۷۰۰	۲۰	۱۹/۹۸۰۰
۱۱	۱۳۰	۵۲	۲۲۰۰۰	۵۷	۵۷/۵۷۰۹	۲۶	۲۵/۹۳۲۳
۱۲	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۳۹	۳۸/۹۷۰۰	۲۰	۱۹/۹۸۰۰
۱۳	۱۶۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۴۲	۴۱/۴۲۷۵	۲۱	۲۰/۹۳۸۵
۱۴	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۳۹	۳۸/۹۷۰۰	۲۰	۱۹/۹۸۰۰
۱۵	۸۰	۰	۱۶۰۰۰	۳۲	۳۳/۹۹۵۷	۱۸	۱۷/۸۸۱۳
۱۶	۸۰	۳۲	۲۵۶۰۰	۵۹	۶۰/۳۲۷۶	۲۸	۲۷/۳۸۵۴
۱۷	۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۳۵	۳۶/۰۱۹۵	۱۸	۱۸/۳۰۴۲
۱۸	۸۰	۶۴	۱۶۰۰۰	۴۷	۴۵/۴۵۱۷	۲۲	۲۲/۳۶۱۳
۱۹	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۳۹	۳۸/۹۷۰۰	۲۰	۱۹/۹۸۰۰
۲۰	۸۰	۳۲	۶۴۰۰	۱۵	۱۴/۱۱۹۶	۸	۸/۸۵۷۴

کاهش درگ در خط لوله مسی

پلیمر کربوکسی متیل سلولز مقادیر ۰/۹۹۴۵ و ۰/۹۸۹۵ به دست آمده است. مقادیر بالای این ضرایب بیانگر آن است که مدل قادر است تقریباً تمامی تغییرات مشاهده شده در داده‌ها را توضیح دهد و از پدیده بیش‌برازش جلوگیری شده است. بدین ترتیب، مدل به دست آمده از دقت و قابلیت اطمینان بالایی برای پیش‌بینی پاسخ تحت شرایط آزمایشی برخوردار است. همچنین مقادیر سطح معنی داری محاسبه شده برای هر دو پلیمر (جدول ۷) به منظور بررسی معنی داری آماری اثر هر یک از ضرایب مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده از مدل (معادلات ۷ و ۸) برای خط لوله مسی در جدول ۶ ارائه شده‌اند. مشابه روند مشاهده شده در خطوط لوله گالوانیزه و پنج لایه، در این خط لوله نیز استفاده از پلی آکریل آمید منجر به کاهش درگ بیشتری نسبت به کربوکسی متیل سلولز شد. جهت پلیمر پلی آکریل آمید، ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل شده مقادیر ۰/۹۹۴۳ و ۰/۹۸۹۲ به دست آمده است. این مقدار برای

جدول ۷ - نتایج سطح معنی‌داری از آنالیز واریانس برای نانو ذرات اکسید منیزیم و دو پلیمر پلی‌آکریل‌آمید و کربوکسی‌متیل سلولز در لوله مسی

منبع	مقادیر سطح معنی‌داری جهت پلیمر پلی‌آکریل‌آمید	مقادیر سطح معنی‌داری جهت پلیمر کربوکسی‌متیل سلولز
مدل	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
اثر خطی غلظت نانو ذره	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۲
اثر خطی غلظت پلیمر	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
اثر خطی عدد رینولدز	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
اثر برهمکنش بین غلظت نانو ذره و غلظت پلیمر	۰/۷۹۰۹	۰/۰۲۱۶
اثر برهمکنش بین غلظت نانو ذره و عدد رینولدز	۰/۴۳۲۹	۰/۰۲۱۶
اثر برهمکنش بین غلظت پلیمر و عدد رینولدز	۰/۴۳۲۹	۰/۲۰۳۸
اثر غیر خطی غلظت نانو ذره بر پاسخ (مربعی)	۰/۷۹۹۰	۰/۳۶۴۵
اثر غیر خطی غلظت پلیمر بر پاسخ (مربعی)	۰/۴۴۲۵	۰/۷۱۵۷
اثر غیر خطی عدد رینولدز بر پاسخ (مربعی)	۰/۰۹۳۵	۰/۰۰۰۶

$$Y = 38.97 + 1.69x_1 + 3.58x_2 + 14.44x_3 + 0.125x_1x_2 - 0.375x_1x_3 - 0.375x_2x_3 - 0.0963x_1^2 + 0.2944x_2^2 - 0.6822x_3^2 \quad (7)$$

$$Y = 19.98 + 0.8232x_1 + 1.4x_2 + 5.79x_3 - 0.5x_1x_2 - 0.5x_1x_3 - 0.25x_2x_3 - 0.1401x_1^2 + 0.0552x_2^2 - 0.726x_3^2 \quad (8)$$

ملاحظه می‌شود، با افزایش غلظت پلیمر میزان کاهش درگ افزایش یافته است. این افزایش را می‌توان به رفتار رئولوژیکی و مکانیسم کشسانی زنجیره‌های پلیمری نسبت داد. با افزایش غلظت پلیمر، تعداد زنجیره‌های طویل در محلول بیشتر شده و در نتیجه، خاصیت ویسکوالاستیک محلول تقویت می‌شود. این زنجیره‌ها در جریان آشفته، نیروهای گردابه‌ای را جذب کرده و از انتقال انرژی به نواحی کوچک‌تر جلوگیری می‌کنند، که منجر به کاهش مؤثر درگ می‌گردد. همچنین، حضور نانوذرات اکسید منیزیم موجب تقویت ساختار شبکه‌ای پلیمر و پایداری بیشتر محلول می‌شود. مقایسه سه نوع لوله نشان می‌دهد که در لوله مسی به دلیل سطح صاف‌تر، انتقال گردابه‌ها کمتر و کاهش درگ بیشتر است، در حالی که در لوله گالوانیزه زبری سطحی اندکی افت عملکرد را سبب می‌شود. به طور کلی، این نتایج نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی بین غلظت پلیمر، نانوذرات و جنس لوله در کنترل ناپایداری‌های جریان است.

تأثیر عدد رینولدز بر کاهش درگ

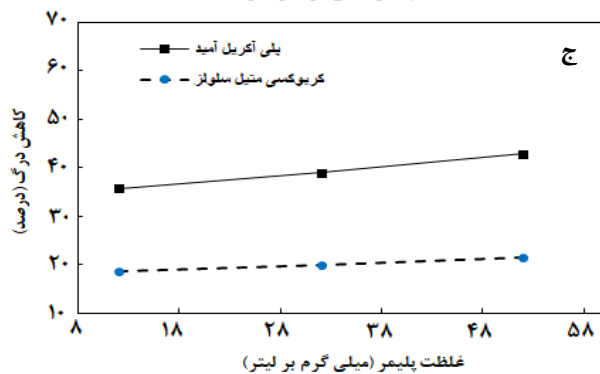
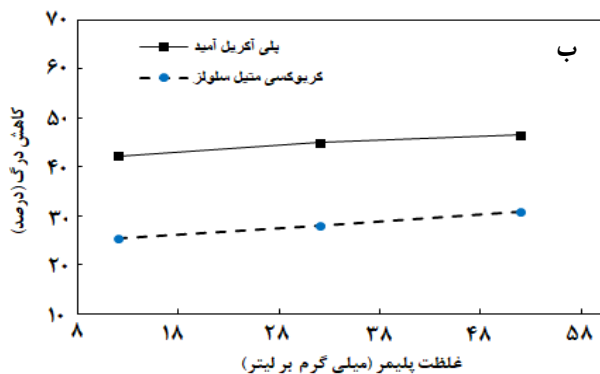
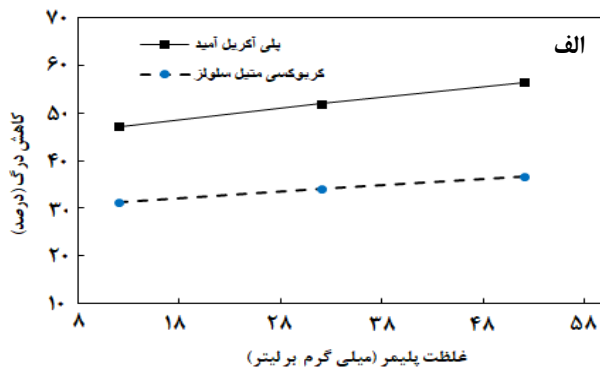
عدد رینولدز یک پارامتر بدون بعد است که نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای لزجی را نشان می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز به مقادیر بالاتر از ۴۰۰۰، جریان در لوله‌ها آشفته شده و در نتیجه گردابه‌ها و افت فشار بیشتری مشاهده می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، گردابه‌ها عامل اصلی افت فشار هستند [۲۹، ۳۰]. در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، میزان کاهش درگ افزایش می‌یابد. در تمامی خطوط لوله، پلی‌آکریل‌آمید عملکرد مؤثرتری نسبت به کربوکسی‌متیل سلولز نشان داده است؛ این موضوع به دلیل وزن مولکولی بالاتر و انعطاف‌پذیری بیشتر زنجیره‌های پلی‌آکریل‌آمید است. مطالعات پیشین نیز این یافته‌ها را تأیید می‌کنند.

تأثیر غلظت نانو ذره بر کاهش درگ

جهت بررسی تأثیر تغییرات غلظت نانوذره بر کاهش درگ، شکل ۲ رسم شد. میزان کاهش درگ برای دو پلیمر پلی‌آکریل‌آمید و کربوکسی‌متیل سلولز در قسمت الف مربوط به خط لوله گالوانیزه، قسمت ب مربوط به خط لوله پنج‌لایه و قسمت ج مربوط به خط لوله مسی نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت نانوذره، میزان کاهش درگ افزایش می‌یابد. علاوه بر این، در شرایط یکسان، کاهش درگ حاصل از پلی‌آکریل‌آمید بیشتر از کربوکسی‌متیل سلولز است. به‌تنهایی، نانوذره تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش درگ ندارد، اما زمانی که همراه با پلیمر به آب اضافه می‌شود، کاهش درگ را بهبود می‌بخشد. زیرا، افزودن نانوذره به پلیمر باعث تشکیل شبکه پایداری می‌شود که مقاومت بیشتری در برابر شکست مکانیکی زنجیره‌های پلیمری دارد. هرچه زمان ریلکسیشن پلیمر بیشتر باشد، توانایی سرکوب گردابه‌های جریان بالاتر رفته و کاهش درگ بیشتری حاصل می‌شود. افزودن نانوذره موجب افزایش زمان ریلکسیشن پلیمر و بهبود اثر کاهش درگ می‌شود. در نتیجه، ترکیب نانوذره و پلیمر باعث ایجاد کاهش درگ پایدارتر و مؤثرتر در سیستم می‌گردد [۱۶، ۲۷]. گردابه‌های کوچک در جریان آشفته باعث افت فشار می‌شوند. زنجیره‌های پلیمر باعث سرکوب این گردابه‌ها شده و درگ را کاهش می‌دهد. با افزایش غلظت پلیمر، تعداد زنجیره‌های پلیمری بیشتر می‌شود. احتمال درگیر شدن گردابه‌ها با زنجیره‌های پلیمری افزایش یافته و درگ را بیشتر کاهش می‌دهد [۲۸].

تأثیر غلظت پلیمر بر کاهش درگ

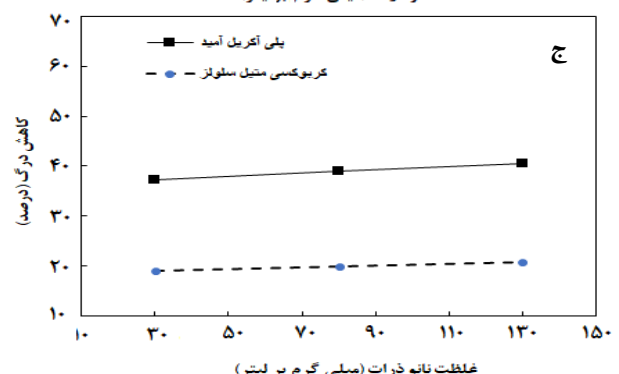
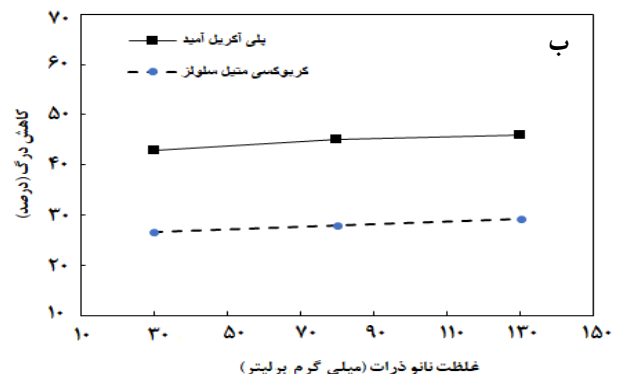
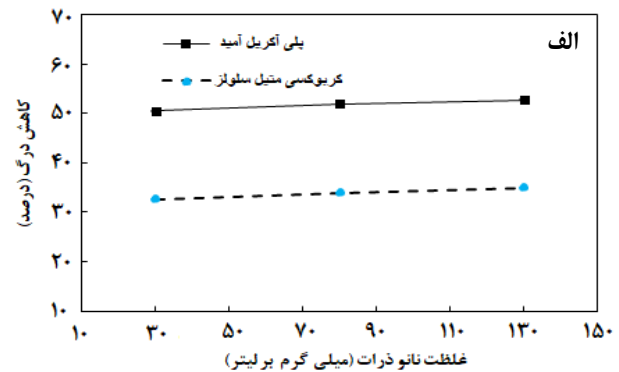
شکل ۳ میزان کاهش درگ بر حسب غلظت پلیمر را در سه خط لوله گالوانیزه، پنج‌لایه و مسی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳



شکل ۳ - مقایسه درصد کاهش درگ بر حسب غلظت پلیمر برای دو پلیمر پلی آکریل آمید و کربوکسی متیل سلولوز در خط لوله‌های (الف) گالوانیزه، (ب) پنج لایه و (ج) مسی (غلظت نانوذره ۸۰ میلی گرم بر لیتر و عدد رینولدز ۱۶۰۰۰)

تنش‌های برشی بالا افزایش می‌دهد. از دیدگاه رئولوژیکی، افزایش عدد رینولدز موجب فعال شدن بیشتر خاصیت الاستیک محلول می‌شود و نقش تقویت‌کنندگی نانوذرات باعث حفظ کشسانی زنجیره‌ها در جریان آشفته می‌گردد. بنابراین، مشاهده می‌شود که در سرعت‌های بالاتر، اثر هم‌افزایی بین پلیمر و نانوذره در کاهش درگ تقویت می‌شود.

عملکرد بهتر پلی آکریل آمید نسبت به کربوکسی متیل سلولوز را می‌توان به چند عامل نسبت داد. نخست، پلی آکریل آمید دارای وزن مولکولی بالاتر و انعطاف‌پذیری زنجیر بیشتری است که توانایی آن را برای کشیده شدن و هم‌راستا شدن با جریان افزایش می‌دهد و اثرات ویسکوالاستیک قوی‌تری ایجاد می‌کند که به کاهش درگ کمک می‌کند. دوم، تعامل بین مولکول‌های پلی آکریل آمید و نانوذرات اکسید منیزیم



شکل ۲ - مقایسه درصد کاهش درگ بر حسب غلظت نانوذره برای دو پلیمر پلی آکریل آمید و کربوکسی متیل سلولوز در خط لوله‌های (الف) گالوانیزه، (ب) پنج لایه و (ج) مسی (غلظت پلیمر ۳۲ میلی گرم بر لیتر و عدد رینولدز ۱۶۰۰۰)

لیو و همکاران گزارش کردند که با افزایش عدد رینولدز تا ۲۲۰۰۰ در حضور پلی آکریل آمید به‌عنوان عامل کاهش‌دهنده درگ، میزان کاهش درگ افزایش می‌یابد [۳۱]. در مطالعه‌ای دیگر، با استفاده از صمغ هیدروکسی پروپیل زانتان نیز مشاهده شد که با افزایش عدد رینولدز، نیروی درگ کاهش می‌یابد [۳۲].

در عددهای رینولدز بالاتر، شدت نوسانات جریان و نرخ برش در نواحی نزدیک دیواره افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی، زنجیره‌های پلیمری در جهت جریان کشیده شده و انرژی گردابه‌ها را جذب می‌کنند، که این پدیده منجر به کاهش تبادل انرژی بین نواحی آشفته و در نهایت افت کمتر فشار می‌شود. حضور نانوذرات اکسید منیزیم در محلول نیز با ایجاد پیوندهای فیزیکی با زنجیره‌های پلیمر، پایداری ساختار شبکه‌ای محلول را در برابر

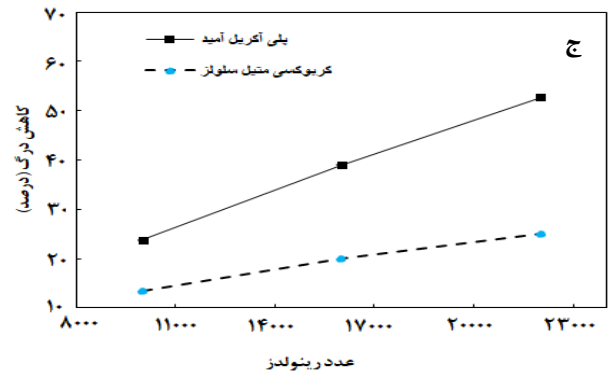
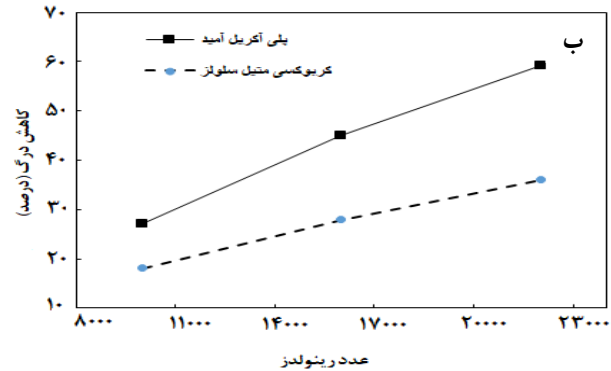
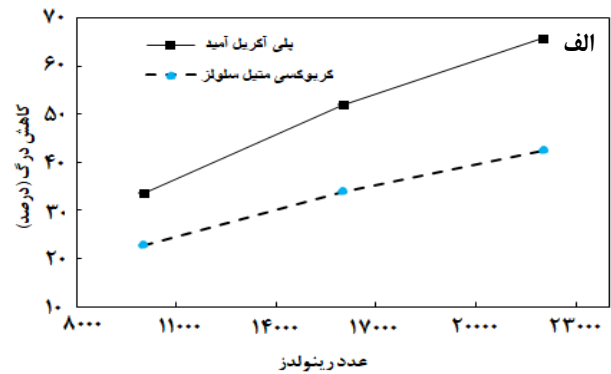
با این حال، در این مطالعه تمرکز بر نانوذرات اکسید منیزیم بوده و مقایسه کمی مستقیم نیازمند انجام آزمایش‌های مشابه با نانوذرات دیگر در شرایط یکسان است [۱۶، ۲۷، ۳۳].

چند مطالعه اخیر نشان داده‌اند که سازوکار هم‌افزایی به ماهیت نانوذره و نحوه برهم‌کنش آن با زنجیره پلیمری بستگی دارد. به‌عنوان مثال در برخی کارها سیلیکا همراه با پلیمر پلی‌آکریل‌آمید سبب تثبیت پلیمری و کاهش تخریب برشی شده‌اند که این امر موجب پایداری طولانی‌تر اثر کاهش درگ می‌شود. مطالعه‌ای که مخلوط سیلیکا و اکسید منیزیم را بررسی کرده نشان داد تغییرات غلظت می‌تواند خواص رئولوژیک را به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر دهد و بنابراین غلظت محدود به‌طور مستقیم بر کاهش درگ تأثیرگذار است. این یافته‌ها با مشاهدات این پژوهش سازگار است [۳۴]. مطالعات اخیر تأکید دارند که اثربخشی پلیمر و نانوذره بسیار وابسته به عدد رینولدز است. در مقادیر عدد رینولدز بالا ممکن است تخریب پلیمر یا دینامیک ورتکس تغییر کند و بنابراین نقطه‌ی بهینه غلظتی جابجا می‌شود. نتایج این تحقیق که نشان‌دهنده تأثیر معنادار برهم‌کنش‌ها بین غلظت‌ها و عدد رینولدز در برخی شرایط بود، با این الگو همخوانی دارد [۳۵]. زبری سطح و جنس دیواره لوله (فلزی در مقایسه با پلیمری) تأثیر قابل توجهی بر ساختار لایه مرزی و توزیع سرعت جریان در نزدیکی دیواره دارند. این ویژگی‌ها نحوه‌ی تعامل پلیمر و نانوذرات با جریان آشفته را تغییر می‌دهند و در نتیجه بر میزان کاهش درگ اثر می‌گذارند. بنابراین، مشاهده‌ی تفاوت عملکرد افزودنی‌ها در لوله‌های گالوانیزه، مسی و پنج‌لایه منطقی است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ویژگی‌های سطح داخلی لوله نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری و کارایی افزودنی‌های کاهش‌دهنده درگ دارند [۳۶].

برای یافتن نقطه‌ی بهینه، از بخش بهینه‌سازی عددی نرم‌افزار طراحی آزمایش نسخه ۱۳ استفاده شد. در این مرحله، هدف بهینه‌سازی درصد کاهش درگ در محدوده‌ی مجاز عوامل عملیاتی شامل عدد رینولدز، غلظت پلیمر و غلظت نانوذرات تعیین گردید. پس از اجرای فرآیند بهینه‌سازی، ترکیب بهینه‌ی شرایط با بیشترین مقدار مطلوبیت به‌دست آمد که شامل غلظت نانوذرات ۱۳۰ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت پلیمر ۵۲ میلی‌گرم بر لیتر و عدد رینولدز ۲۲۰۰۰ بود.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف مقایسه عملکرد دو پلیمر پلی‌آکریل‌آمید و کربوکسی‌متیل سلولز همراه با نانوذرات اکسید منیزیم در کاهش درگ خطوط لوله افقی از جنس گالوانیزه، پنج‌لایه و مس انجام شد. پارامترهای مؤثر بر فرآیند شامل غلظت نانوذرات اکسید منیزیم، غلظت پلیمر و عدد رینولدز در نظر گرفته شدند. با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش، برای هر خط لوله ۲۰ آزمایش طراحی شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نانوذرات، غلظت پلیمر و عدد رینولدز،



شکل ۴ - مقایسه درصد کاهش درگ بر حسب عدد رینولدز برای دو پلیمر پلی‌آکریل‌آمید و کربوکسی‌متیل سلولز در خط لوله‌های (الف) گالوانیزه، (ب) پنج‌لایه و (ج) مسی (غلظت نانوذره ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر و غلظت پلیمر ۳۲ میلی‌گرم بر لیتر)

مطلوب‌تر است و شبکه پایدارتر پلیمر- نانوذره‌ای ایجاد می‌کند که در برابر تخریب ناشی از آشفته‌گی مقاومت می‌کند. در مقابل، کربوکسی‌متیل سلولز دارای زنجیره‌های کوتاه‌تر و اسکلت سخت‌تری است که ظرفیت آن برای تعامل با نانوذرات و تشکیل ساختارهای ویسکوالاستیک مؤثر در جریان توربولانسی محدود می‌کند.

نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعاتی که از نانوذراتی مانند سیلیکا و اکسید تیتانیوم برای بهبود کاهش درگ استفاده کرده‌اند، سازگار است. در این پژوهش‌ها نیز گزارش شده است که حضور نانوذرات موجب افزایش پایداری ساختار شبکه‌ای پلیمر و بهبود خاصیت ویسکوالاستیک محلول می‌شود. با وجود تفاوت در نوع نانوذره و ویژگی‌های سطحی، مکانیسم کلی کاهش درگ از طریق تقویت برهم‌کنش نانوذره-پلیمر و مهار گردابه‌های آشفته مشابه است.

نانوذرات، و کنترل شرایط هیدرودینامیکی (از جمله عدد رینولدز) نقش تعیین کننده‌ای در بهینه‌سازی رفتار جریان دارند. از دیدگاه کاربردی، نتایج به دست آمده می‌تواند در سیستم‌های انتقال سیالات صنعتی، به‌ویژه در شبکه‌های آبرسانی، سامانه‌های خنک کاری، و خطوط انتقال نفت و فرآورده‌های نفتی مورد استفاده قرار گیرد. کاهش اصطکاک در لوله‌ها می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در انرژی پمپاژ، کاهش افت فشار و افزایش بهره‌وری سیستم‌های انتقال شود. با این حال، لازم به ذکر است که این تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی و در بازه محدودی از عدد رینولدز و غلظت‌های افزودنی انجام شده است؛ بنابراین، تعمیم نتایج به مقیاس‌های صنعتی نیازمند مطالعات تکمیلی در شرایط واقعی جریان (از جمله دما و فشار بالا، حضور ناخالصی‌ها، و طول مسیر انتقال بیشتر) است. علاوه بر این، تأثیر پایداری زمانی پلیمرها و نانوذرات، اثر جنس و زبری سطح لوله‌ها، و مسائل زیست‌محیطی ناشی از رهائش نانوذرات باید در پژوهش‌های آتی مورد بررسی قرار گیرد. به طور کلی، نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای طراحی افزودنی‌های کارآمدتر جهت کاهش درگ در سامانه‌های انتقال سیال در نظر گرفته شود.

کاهش درگ بهتری حاصل می‌شود. مطابق با نتایج حاصل از طراحی آزمایش و بهینه‌سازی، شرایط بهینه برای دستیابی به بیشترین کاهش درگ در سیستم شامل غلظت نانوذرات ۱۳۰ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت پلیمر ۵۲ میلی‌گرم بر لیتر و عدد رینولدز ۲۲۰۰۰ تعیین شد. این ترکیب به عنوان نقطه‌ی بهینه، بیانگر هم‌افزایی مؤثر بین پلیمر و نانوذرات در بهبود ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان است. نتایج نشان داد که هر دو پلیمر موجب کاهش قابل توجه درگ می‌شوند، اما میزان و نحوه تأثیر آن‌ها به شرایط جریان و جنس لوله وابسته است. این مقایسه، درک بهتری از نقش ساختار پلیمر و اثرات متقابل آن با نانوذرات و شرایط هیدرودینامیکی فراهم کرده است. البته در تمام آزمایش‌ها پلیمر پلی‌آکریل‌امید در کاهش درگ موثرتر بود. زیرا این پلیمر در دسته پلیمرهای قابل انعطاف قرار دارد و از طرفی وزن مولکولی بالاتر از کربوکسی‌متیل سلولوز را دارا می‌باشد.

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از ترکیب پلیمر و نانوذره می‌تواند به طور مؤثری موجب کاهش درگ در جریان آشفته شود. این یافته‌ها بیانگر آن است که انتخاب نوع پلیمر، غلظت مناسب

مراجع

- [1] Virk P.S., **Drag Reduction Fundamentals**, *AICHE Journal*, **21**: 625-656 (1975).
- [2] Sun J., Meng F., Wang Z., Zeng X., Wen Y., Wang S., Lu Y., Sun N., Li W., **Drag Reduction Performance in Transportation of Thermally Produced Heavy Oil by Self-Generating Foam Injection**, *International Journal of Multiphase Flow*, **193**: 105389 (2025).
- [3] Lv Q., Wang C., Xu X., Lv X., Xia W., Shang J., Qin A., Ma Q., Liu Y., Zhou S., Duan J., **Study on Deposition Characteristics and Mechanism of Waxy Oil under the Effect of Drag Reducer**, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, (2025).
- [4] محمدرضا حسامی، نادیا اسفندیاری، بررسی آزمایشگاهی کاهش نیروی درگ در یک خط لوله‌ی افقی زبر با استفاده از نانو سیال به روش پاسخ سطحی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، ۴۰(۲): ۳۳۹ تا ۳۴۶ (۱۴۰۰)
- [5] Mousavi M., Darvishi P., Pournafard A., **Comparative Study of Heat Transfer and Pressure Drop in Turbulent Flow of a Singular and Hybrid Nanofluids into a Horizontal Pipe**, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **148**: 14375-14384 (2023).
- [6] Alsaedi S.S., Shnain Z.Y., Rashed M.K., Filip P., **Triple Solutions of Nanoparticle plus Polymer-Surfactant compound for Enhancing the Drag Reduction Using a Rotational Disk Apparatus**, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **881**: 012079 (2020).
- [7] Edomwonyi-Otu L.C., Dosumu A.I., Yusuf N., **Effect of Oil on the Performance of Biopolymers as Drag Reducers in Fresh Water Flow**, *Heliyon*, **7**: e06535 (2021).

- [8] Asidin M.A., Suali E., Jusnukin T., Lahin F.A., [Review on the Applications and Developments of Drag Reducing Polymer in Turbulent Pipe Flow](#), *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **27**: 1921-1932 (2019).
- [9] Abdulrahman A.A., Kadhim B.J., Shnain Z.Y., Majidi H.S., Alwaiti A.A., Al-Sheikh F., AbdulRazak A.A., Shorbaz M., Shibeeb M.J., [Experimental and Numerical Analysis of Oil-Water Flow with Drag Reducing Polymers in Horizontal Pipes](#), *Fluid Dynamics and Materials Processing*, **19**: 2579-2595 (2023).
- [10] Esfandiari N., Zareinezhad R., [A Review of the Application of Polymers to Drag Reduction in Horizontal Pipelines](#), *Basparesh*, **10** 3-12 (2020).
- [11] Pouranfard A.R., Mowla D., Esmacilzadeh F., [An Experimental Study of Drag Reduction by Nanofluids through Horizontal Pipe Turbulent Flow of a Newtonian Liquid](#), *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **20**: 633-637 (2014).
- [12] Esfandiari N., Zareinezhad R., 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](#), *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **28**: 63-75 (2020).
- [13] Luo M.-L., Si X.-D., Li M.-Z., Jia X.-H., Yang Y.-L., Zhan Y.-P., [Experimental Study on the Drag Reduction Performance of Clear Fracturing Fluid Using Wormlike Surfactant Micelles and Magnetic Nanoparticles under a Magnetic Field](#), *Nanomaterials*, **11(4)**: 885 (2021).
- [14] Pouranfard A.R., Mowla D., Esmacilzadeh F., [An Experimental Study of Drag Reduction by Nanofluids in Slug Two-phase Flow of Air and Water through Horizontal Pipes](#), *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **23**: 471-475 (2015).
- [15] Adogbeji V.O., Sharifpur M., Meyer J.P., [Experimental Investigation into Heat Transfer and Flow Characteristics of Magnetic Hybrid Nanofluid \(Fe₃O₄/TiO₂\) in Turbulent Region](#), *Applied Thermal Engineering*, **258**: 124630 (2025).
- [16] Li X., Pan J., Shi J., Chai Y., Hu S., Han Q., Zhang Y., Li X., Jing D., [Nanoparticle-Induced Drag Reduction for Polyacrylamide in Turbulent Flow with High Reynolds Numbers](#), *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **56**: 290-298 (2023).
- [17] Orang M., Pouranfard A., [Experimental, Comparative and Statistical Study of Heat Transfer and Drag Reduction of Water/Polyisobutylene/Nano SiO₂ Poly-Nanofluid through a Horizontal Pipe](#), *Chemical Engineering Research and Design*, **183**: 466-477 (2022).
- [18] Niazi M., Ashrafizadeh S.N., Hashemabadi S.H., [Improving the Prediction of Turbulent Kinetic Energy for Drag Reduction in Turbulent Viscoelastic Pipe Flow](#), *Physics of Fluids*, **36**: 063101 (2024).
- [19] Dastbaz Z., Ashrafizadeh S.N., [Intensifying the Performance of Polymer Suspensions to Evaluate Drag Reduction using Rotating Disc Apparatus](#), *Arabian Journal of Chemistry*, **17**: 105858 (2024).
- [20] Niazi M., Ashrafizadeh S.N., Hashemabadi S.H., Karami H., [Novel k- \$\omega\$ Turbulent Model for Prediction of Drag Reduction in Viscoelastic Fluid Flow](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **63**: 22177-22191 (2024).

- [21] Niazi M., Ashrafizadeh S.N., Hashemabadi S.H., Karami H., [CFD Simulation of Drag-Reducing Fluids in a Non-Newtonian Turbulent Pipe Flow](#), *Chemical Engineering Science*, **285**: 119612 (2024).
- [22] Dastbaz Z., Dana S.N., Ashrafizadeh S.N., [Preparation of a Stabilized Aqueous Polystyrene Suspension via Phase Inversion](#), *RSC Advances*, **11**: 17547-17557 (2021).
- [23] Dastbaz Z., Ashrafizadeh S.N., [Preparation, Stabilization, and Characterization of Polyisobutylene Aqueous Suspension](#), *Colloid and Polymer Science*, **298**: 1335-1347 (2020).
- [24] Eshrati M., Al-Wahaibi T., Al-Hashmi A.R., Al-Wahaibi Y., Al-Ajmi A., Abubakar A., [Significance of Polymer Elasticity on Drag Reduction Performance in Dispersed Oil-in-Water Pipe Flow](#), *Chemical Engineering Research and Design*, **182**: 571-579 (2022).
- [25] Mohammadtabar M., Sanders R.S., Ghaemi S., [Viscoelastic Properties of Flexible and Rigid Polymers for Turbulent Drag Reduction](#), *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **283**: 104347 (2020).
- [26] Warwaruk L., Ghaemi S., [A Direct Comparison of Turbulence in Drag-Reduced Flows of Polymers and Surfactants](#), *Journal of Fluid Mechanics*, **917**: A7 (2021).
- [27] Xing L., Ke Y., Hu X., Liang P., [Preparation and Solution Properties of Polyacrylamide-Based Silica Nanocomposites for Drag Reduction Application](#), *New Journal of Chemistry*, **44**: 9802-9812 (2020).
- [28] Serafini F., Battista F., Gualtieri P., Casciola C.M., [Drag Reduction in Polymer-Laden Turbulent Pipe Flow](#), *Fluids*, **7(11)**: 355 (2022).
- [29] Shi P., Hu H., Wen J., Sun H., Xie L., [Experimental Investigation on Drag Reduction in Turbulent Pipe Flow with Polymer Injection](#), *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **341**: 105434 (2025).
- [30] Zhang X., Duan X., Muzychka Y.S., [Drag Reduction by Polymers: A Brief Review of the History, Research Progress, and Prospects](#), *International Journal of Fluid Mechanics Research*, **48**: 1-21 (2021).
- [31] Liu D., Wang Q., Wei J., [Experimental Study on Drag Reduction Performance of Mixed Polymer and Surfactant Solutions](#), *Chemical Engineering Research and Design*, **132**: 460-469 (2018).
- [32] Tian M., Fang B., Jin L., Lu Y., Qiu X., Jin H., Li K., [Rheological and Drag Reduction Properties of Hydroxypropyl Xanthan Gum Solutions](#), *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **23**: 1440-1446 (2015).
- [33] Paryani S., Ramazani S.A. A., [Investigation of the Combination of TiO₂ Nanoparticles and Drag Reducer Polymer Effects on the Heat Transfer and Drag Characteristics of Nanofluids](#), *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **96**: 1430-1440 (2018).
- [34] Alhamd S.J., Manteghian M., Dehaghani A.H.S., Rashid F.L., [An Experimental Investigation and Flow-System Simulation about the Influencing of Silica-Magnesium Oxide Nano-Mixture on Enhancing the Rheological Properties of Iraqi Crude Oil](#), *Scientific Reports*, **14**: 6148 (2024).
- [35] Ghavamifar S., Pouranfard A., Shamsi M., [Experimental and Numerical Study of Drag Reduction and Heat Transfer Enhancement in a Vertical Pipe using Water/Polyisobutylene/Nano-SiO₂ Polynanofluids](#), *Journal of Dispersion Science and Technology*, **45**: 584-595 (2024).
- [36] Zheng Z., Gu X., Yang S., Wang Y., Zhang Y., Han Q., Cao P., [Underwater Drag Reduction Applications and Fabrication of Bio-Inspired Surfaces: A Review](#), *Biomimetics*, **10(7)**: 470 (2025).