

# بررسی آزمایشگاهی کاهش نیروی درگ در یک خط لوله‌ی افقی زبر با استفاده از نانو سیال به روش پاسخ سطحی

محمد رضا حسامی، نادیا اسفندیاری\*<sup>+</sup>

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

**چکیده:** هدف این پژوهش بررسی تأثیر افزودن نانو سیال متشکل از نانو ذره‌های منیزیم اکسید و پلیمر پلی اکریل آمید بر میزان کاهش درگ در جریان آشفتگی آب در یک خط لوله‌ی افقی زبر می‌باشد. بدین منظور سه پارامتر مؤثر بر فرایند (غلظت نانوذره، غلظت سورفکتانت و عدد رینولدز) در هر خط لوله با روش پاسخ سطحی بررسی و بهینه شدند. بیشترین میزان کاهش درگ با روش بهینه‌سازی عددی، ۸۲ درصد محاسبه شد. کفایت مدل با تحلیل نتیجه‌های ANOVA بررسی شد و با توجه به مقادارهای بالای ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل شده، مشخص شد داده‌ها به خوبی توسط مدل تجربی مرتبه دوم توصیف می‌شوند.

**واژگان کلیدی:** کاهش درگ؛ پلی اکریل آمید؛ منیزیم اکسید؛ جریان آشفتگی؛ خط لوله‌ی افقی زبر؛ رویه‌ی پاسخ.

**KEYWORDS:** Drag reduction, Polyacrylamide, Magnesium oxide, Turbulent flow, Rough horizontal pipeline, Surface Response Method.

## مقدمه

سرعت جریان با افزودن مقداری عامل کاهش‌دهنده درگ<sup>۱</sup> افزایش می‌یابد. از جمله فناوری‌های نوین و پرکاربرد برای کاهش نیروی درگ می‌توان به افزودن افزودنی‌های پلیمری [۳] و فیبری [۴]، تزریق نانوسیال [۵]، حباب و میکرو حباب [۶] و استفاده از ریلته‌ها [۷] اشاره کرد.

تامز<sup>۲</sup> [۸] برای اولین بار با افزودن مقدار کمی از یک پلیمر با وزن مولکولی بالا، متوجه شد که در الگوی جریان درون لوله تغییر چشمگیری ایجاد شده است که این امر باعث کاهش نیروی درگ بر روی سطح جامد می‌شد. میسلز<sup>۳</sup> [۹] با انجام آزمایش‌هایی به اثر افزودن مواد پلیمری بر جریان و کاهش افت فشار پی برد.

در گذشته متصدیان خطوط لوله برای کاهش فشار یا افزایش ظرفیت انتقال نفت خام یا فراورده‌های سیالی از روش‌هایی مانند افزایش قطر خط لوله، احداث خط لوله‌ی نوین، ایجاد لوپ در بخش‌هایی که ظرفیت محدودی داشت و افزایش تعداد یا قدرت پمپ استفاده می‌کردند [۱]. این روش‌ها به دلیل این که مستلزم تغییر در طراحی تجهیزها بوده و در بر دارنده‌ی هزینه‌ای هنگفت و صرف چشمگیری است، دارای محدودیت می‌باشند. بنابراین همواره استفاده از راهکارهایی که بدون تغییر در طراحی منجر به بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش نیروی درگ شود، مورد توجه پژوهشگران بوده است [۲]. کاهش درگ پدیده‌ای است که اصطکاک فشاری در جریان درهم درون لوله کاهش یافته و

\* عهده‌دار مکاتبات

+ E-mail: esfandiari\_n@miau.ac.ir

(۱) Drag Reduction Agent

(۲) Toms

(۳) Mysles

استفاده از عامل کاهش درگ دارای مزایای بزرگی است. در خطوط انتقال قدیمی یا خطوط لوله‌ای که در اثر خوردگی و زنگ‌زدگی مقاومت آن‌ها کاهش یافته است، با استفاده از ماده‌ی کاهش‌دهنده‌ی اصطکاک می‌توان بدون تغییر میزان جریان عبوری، افت فشار را در طول خط لوله تا حد چشمگیری کاهش داد. در نتیجه، به دنبال کاهش فشار اصطکاک می‌توان ظرفیت انتقال نفت خام یا فراورده را در خط لوله افزایش داد. همچنین با تزریق عامل کاهش‌دهنده درگ به میزان چشمگیری در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری تاسیسات صرفه‌جویی خواهد شد. نانوسیال مورد استفاده با تأثیر بر رئولوژی سیال پایه به واسطه‌ی عامل فعال سطحی و الگوی زبری لوله بواسطه‌ی قرار گرفتن نانوذره‌ها در خلل و فرج جداره‌ی لوله منجر به کاهش درگ می‌شود.

### بخش تجربی

#### مواد

در این پژوهش از آب یون‌زدایی‌شده (با خلوص ۹۹/۸ درصد) تهیه شده از شرکت زلاب (ایران) به عنوان سیال پایه و از نانوذره‌های منیزیم اکسید (با خلوص ۹۹ درصد) و پلیمر پلی‌اکریل آمید (با میزان خلوص ۹۹ درصد) ساخت شرکت سیگما آلدریج به عنوان اجزای نانوسیال کاهش‌دهنده درگ استفاده شده است.

#### تهیه‌ی نانوسیال و انجام آزمایش

نانو سیال مورد استفاده در پژوهش حاضر از آب یون‌زدایی شده، نانوذره‌های منیزیم اکسید و پلی‌اکریل آمید تشکیل شده است. در این محلول پلی‌اکریل آمید به عنوان یک عامل فعال سطحی به پایداری نانو سیال کمک می‌کند. عملکرد این ترکیب به گونه‌ای است که سطح آب‌گریز نانوذره‌ها را به سطوح آب دوست تغییر می‌دهد [۲۵]. برای تهیه‌ی نانو سیال نخست نانوذره‌های منیزیم اکسید و پلی‌اکریل آمید با غلظت‌های مشخص شده در طراحی آزمایش، هم‌زمان به آب یون‌زدایی شده افزوده شدند و سپس به مدت ۱ ساعت با دستگاه فراصوت (مدل Scientz-08 شرکت Scientz کشور چین) تحت امواج فراصوت با شدت ۱۲۰۰W قرار داده شد تا یک محلول همگن از عامل فعال سطحی و نانو ذره‌ها تشکیل شود و برای انجام آزمایش، استفاده شد.

یکی از اولین آزمایش‌ها برای کاهش درگ توسط لوملی<sup>۱</sup> [۱۰] بر روی مخلوط گاز و مایع انجام شد. آن‌ها از پلی اتیلن اکسید<sup>۲</sup> به عنوان افزودنی پلیمری کاهش‌دهنده درگ استفاده کرده و توانستند اثر کاهش درگ را بر فرایند نشان دهند. ژبونگ<sup>۳</sup> و همکاران [۱۱] با بررسی تأثیر پلیمرها بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی مخلوط دو فاز آب و هوا در جریان عبوری از خطوط لوله، دریافتند که درگ با افزودن یک ماده‌ی پلیمری تا حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. در میان پژوهش‌های موجود در زمینه‌ی تزریق پلیمر به منظور کاهش درگ، می‌توان از پژوهش‌های ادمونی<sup>۴</sup> و همکاران [۱۲]، یانگ<sup>۵</sup> و همکاران [۱۳]، ژینگ<sup>۶</sup> و همکاران [۱۴]، ژو<sup>۷</sup> و همکاران [۱۳]، خادم<sup>۸</sup> و همکاران [۱۵]، خومایوف<sup>۹</sup> [۱۶]، عشرتی و همکاران [۱۷] و سوارز<sup>۱۰</sup> [۱۸] نام برد.

پوران فرد و همکاران [۱۹، ۵] تأثیر نانو ذره‌های سیلیکا را بر کاهش درگ سیال نیوتنی و سیال دو فاز آب و هوا در خطوط لوله افقی با قطرهای گوناگون مورد بررسی قرار دادند. ساهین<sup>۱۱</sup> و همکاران [۲۰] افت فشار آب را در یک لوله با قطر ۳۳ نانومتر با افزودن کسر حجمی گوناگون نانوذره‌های مس اکسید مورد مطالعه قرار دادند. افزودن نانو لوله‌های کربنی به عنوان عامل کاهش‌دهنده درگ در دیسک چرخان مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۱]. رائی<sup>۱۲</sup> و همکاران [۲۲] نانو ذره‌های گاما آلومینا با غلظت‌های گوناگون را با آب مخلوط کرده و تأثیر آن بر کاهش درگ در مبدل حرارتی لوله پوسته را مورد بررسی قرار دادند. کاستیک<sup>۱۳</sup> [۲۳] تأثیر نانوذره‌های سیلیکا و نانولوله‌های کربنی بر ویژگی‌های رئولوژیکی و گرمایی جریان عبوری از خط لوله را مورد بررسی و آزمایش قرار داد. اسفندیاری و همکاران [۲۴] در پژوهشی به بررسی و بهینه‌سازی کاهش درگ در جریان آشفته‌ی سیال نیوتونی عبوری از خط لوله‌ی افقی با استفاده از نانو ذره‌های فوتوکاتالیستی مغناطیسی عامل‌دار شده و لسیترین پرداختند. این پژوهش بر مبنای روش پاسخ سطحی طرح‌ریزی شده و با بهینه‌سازی هم‌زمان همه عامل‌های مؤثر بر میزان کاهش درگ (غلظت نانو ذره، غلظت پلیمر، عدد رینولدز و pH) میزان کاهش درگ قابل توجه ۹۰ درصد به دست آمد.

در پژوهش حاضر از یک نانو سیال متشکل از نانو ذره‌های منیزیم اکسید که ویژگی‌های رئولوژی سیال را بهبود می‌بخشد و پلیمر پلی‌اکریل آمید به عنوان عامل فعال سطحی در فرایند کاهش نیروی درگ استفاده شده است.

(۱) Lumley

(۳) Xiong

(۵) Yang, et al.

(۷) Zhu, et al.

(۹) Khomyakov

(۱۱) Sahin

(۱۳) Kostic

(۲) Poly Ethylene Oxide

(۴) Edomwonyi, et al.

(۶) Xing, et al.

(۸) Khadom, et al.

(۱۰) Soares

(۱۲) Raeli

**مجموعه آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش**

هدف از پژوهش حاضر بررسی کاهش درگ به وسیله‌ی تزریق نانوسیال به جریان آب عبوری از یک خط لوله‌ی گالوانیزه‌ی افقی می‌باشد. برای به دست آوردن اطلاعات کاهش درگ در غلظت‌های گوناگون نانوسیال، یک دستگاه آزمایشگاهی ساخته شد. این دستگاه از یک خط لوله‌ی گالوانیزه‌ی زبر با قطر داخلی ۱/۹۰۵ سانتی‌متر و طول ۶ متر بوده که سیال درون آن مدام چرخانده می‌شود و به مخزن سیال برمی‌گردد. افت فشار در ۴ متر میانی خط لوله اندازه‌گیری می‌شود و در دو سر خط لوله، ۱ متر برای توسعه‌یافتگی جریان در نظر گرفته شد. نخست آزمایش شاهد با استفاده از آب خالص (بدون هرگونه افزودنی) با رینولدزهای مشخص شده در طراحی آزمایش به درون دستگاه پمپ شده و افت فشار دو سر خط لوله ( $\Delta P$ ) اندازه‌گیری شد. پس از آن سوسپانسیون‌های نانوسیال با غلظت‌های مشخص به سیال افزوده شد و مقادیر جدید افت فشار ( $\Delta P_{DRA}$ ) اندازه‌گیری شد. سپس میزان کاهش درگ با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد [۲۴].

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

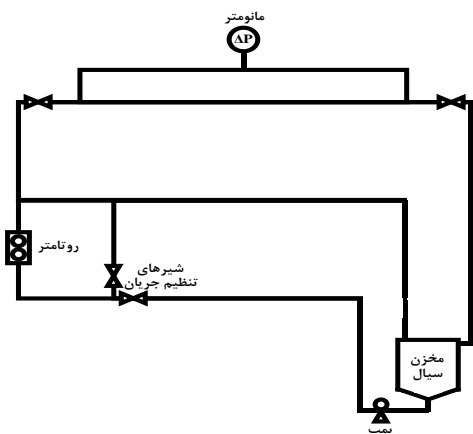
سیال توسط یک پمپ سانتریفیوژ با توان ۱ اسب بخار به درون خط لوله‌ی افقی پمپ شد. تنظیم دبی با استفاده از یک روتامتر شیشه‌ای انجام گرفت. افت فشار خطوط لوله با استفاده از یک فشارسنج دیجیتال با دقت اندازه‌گیری ۱ میلی‌بار ساخت شرکت لوترون (تایوان) اندازه‌گیری شد. شمای کلی تجهیز آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است.

**طراحی آزمایش**

روش پاسخ سطح، مجموعه‌ای از فناوری‌های آماری است که در بهینه‌سازی فرآیندهایی به کار می‌رود که پاسخ مورد نظر توسط تعدادی از متغیرها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. شمای گرافیکی مدل ریاضی سبب تعریف واژه‌ی روش رویه‌ی پاسخ شده است. با کمک این طرح آماری، تعداد آزمایش‌ها کاهش یافته و همه‌ی ضریب‌های مدل برازشی درجه دوم و اثر متقابل فاکتورها، قابل برآورد هستند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و رسم نمودارهای مربوطه از نرم‌افزار مینی‌تب ۱۸ استفاده شد. مهم‌ترین مساله‌ی این پژوهش بررسی اثرهای اصلی و متقابل فاکتورها بود، از این رو طرح آماری سطح پاسخ انتخاب شد [۲۶]. در این مطالعه اثر سه متغیر مستقل مؤثر بر فرایند شامل غلظت نانو ذره ( $X_1$ )، غلظت سورفکتانت ( $X_2$ ) و رینولدز ( $X_3$ ) در پنج سطح و یک بلوک بررسی شد،

جدول ۱- بازه‌ی متغیرهای در نظر گرفته شده در طرح آزمایش روش پاسخ سطح

سطح‌های گذشته					نماد	متغیرهای مستقل
-۱/۶۳	-۱	۰	۱	۱/۶۳		
۰	۳۰	۸۰	۱۳۰	۱۶۰	$X_1$	غلظت نانو ذره (میلی گرم بر لیتر)
۰	۱۲	۳۲	۵۲	۶۴	$X_2$	غلظت پلیمر (میلی گرم بر لیتر)
۶۲۰۰	۱۰۰۰۰	۱۶۰۰۰	۲۲۰۰۰	۲۵۸۰۰	$X_3$	عدد رینولدز



شکل ۱- شمای دستگاه آزمایشی

که سطح‌های متغیرهای فرایندی در جدول ۱ نشان داده شده است. شش تکرار نقطه‌ی مرکزی برای تخمین خطای آزمایش استفاده شد. تعداد کل آزمایش‌ها برابر ۲۰ و متغیر پاسخ میزان کاهش درگ بود (جدول ۲). همچنین، متغیرها مطابق معادله‌ی (۲) کدگذاری شدند:

$$x_i = (X_i - \bar{X}_i) / \Delta X_i \quad (2)$$

در این جا،  $x_i$  مقدار بدون بعد متغیر مستقل فرایند،  $X_i$  مقدار واقعی متغیر مستقل فرایند،  $\bar{X}_i$  مقدار واقعی متغیر مستقل در نقطه‌ی مرکزی و  $\Delta X_i$  گام افزایش می‌باشد.

در مرحله‌ی دوم طرح آماری گزینش شده و رابطه‌ی مدل مورد استفاده برای پیش‌بینی، برازش شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل مورد استفاده در مدل روش پاسخ سطحی یک رابطه‌ی درجه دوم با در نظر گرفتن برهم‌کنش‌های دوتایی می‌باشد، که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 \quad (3)$$

(۱) Response Surface Method

جدول ۲- بازه‌ی متغیرهای در نظر گرفته شده در طرح آزمایش روش پاسخ سطحی

آزمایش	غلظت نانوذره (میلی گرم بر لیتر)	غلظت پلیمر (میلی گرم بر لیتر)	عدد رینولدز	میزان کاهش درگ (درصد)
۱	۳۰	۱۲	۱۰۰۰۰	۳۳
۲	۱۳۰	۵۲	۱۰۰۰۰	۴۸
۳	۳۰	۵۲	۲۲۰۰۰	۷۲
۴	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۵۷
۵	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۵۷
۶	۱۳۰	۱۲	۲۲۰۰۰	۶۹
۷	۳۰	۱۲	۲۲۰۰۰	۶۷
۸	۱۳۰	۱۲	۱۰۰۰۰	۳۹
۹	۳۰	۵۲	۱۰۰۰۰	۴۳
۱۰	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۵۷
۱۱	۱۳۰	۵۲	۲۲۰۰۰	۷۶
۱۲	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۵۷
۱۳	۱۶۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۶۰
۱۴	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۵۷
۱۵	۸۰	۰	۱۶۰۰۰	۵۰
۱۶	۸۰	۳۲	۲۵۸۰۰	۸۰
۱۷	۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۵۳
۱۸	۸۰	۶۴	۱۶۰۰۰	۶۴
۱۹	۸۰	۳۲	۱۶۰۰۰	۵۷
۲۰	۸۰	۳۲	۶۲۰۰	۲۴

به درستی انتخاب شده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل پاسخ سطحی برای آزمایش کاهش درگ در خط لوله‌ی گالوانیزه با استفاده از نانوذره‌ی منیزیم اکسید و پلیمر پلی اکریل آمید دارای کفایت است.

#### تحلیل نتیجه‌های پاسخ سطح

با استفاده از مدل آماری روبه‌ی پاسخ، معادله‌ی زیر که نشان‌دهنده‌ی ارتباط تجربی میان میزان کاهش درگ و متغیرهای کد شده است، به دست آمد. ضریب‌های مدل درجه دوم پاسخ سطحی با استفاده از فناوری حداقل مربعات محاسبه شدند. نتیجه‌های به‌دست‌آمده از ترسیم سه‌بعدی مدل پاسخ سطحی در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. همچنین در شکل ۳ قابل دیدن است که تغییر میزان کاهش درگ در راستای غلظت پلیمر دارای بیشینه می‌باشد.

در روش پاسخ سطح برای هر متغیر وابسته مدلی تعریف می‌شود، که آثار اصلی و متقابل فاکتورها را روی هر متغیر جداگانه بیان می‌نماید. در این مدل چند متغیره،  $Y$  پاسخ پیش‌بینی شده،  $\beta_0$  ضریب ثابت،  $\beta_1$  و  $\beta_2$  و  $\beta_3$  اثرات خطی،  $\beta_{11}$ ،  $\beta_{22}$  و  $\beta_{33}$  اثر مربعات و  $\beta_{12}$ ،  $\beta_{13}$  و  $\beta_{23}$  اثرات متقابل می‌باشند.

مرحله‌ی سوم شامل ارایه‌ی گرافیکی رابط‌های مدل و تعیین شرایط عملیاتی بهینه بود که بوسیله‌ی نمودار روبه‌ی پاسخ و کانتور صورت پذیرفت. شرایط عملیاتی بهینه برای کاهش درگ در خط لوله‌ی گالوانیزه، با استفاده از فناوری بهینه‌سازی عددی<sup>۱</sup> محاسبه شد. بدین منظور، نخست بهینه‌سازی مشخص شده و سپس سطح‌های پاسخ و متغیرهای مستقل تنظیم شده و با استفاده از فناوری فاین تیونینگ<sup>۲</sup> بهترین جواب‌ها تخمین زده شد [۲۶].

#### نتیجه‌ها و بحث

##### آنالیز واریانس

برای به‌دست آوردن یک مدل تجربی برای پیش‌بینی پاسخ، معادله‌ی پاسخ سطحی برای ۳ فاکتور مؤثر بر آزمایش (معادله‌ی (۳)) بر داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش (جدول ۲) برازش شد. برای اطمینان از درستی مدل برازشی، مدل مورد آنالیز آماری قرار گرفت که این مهم با استفاده از جدول آنالیز واریانس<sup>۳</sup> (ANOVA) صورت پذیرفت. تحلیل واریانس و روش‌های تجزیه‌ی واریانس، یک دسته از مدل‌های تحلیل آماری هستند که قادرند اختلاف بین گروه‌ها یا دسته‌ها را بررسی کنند. تحلیل نتیجه‌های این پژوهش در سطح اطمینان ۹۵٪ انجام گرفت. در جدول آنالیز واریانس شاخصی به نام مقدار احتمال وجود دارد، که کمک می‌کند بدون مراجعه به جدول بتوان در مورد نتیجه آزمون فرض آماری تصمیم گرفت. بدین صورت که هر تأثیری که احتمال آن کم‌تر از ۰/۰۵ باشد، معنادار آماری است. از نظر آماری مدلی مناسب است که در آن احتمال مدل (در اینجا  $0/05 < 0/000$ ) معنادار بوده و آزمون ضعف برازش (آزمون تطابق نداشتن، در اینجا  $0/05 > 0/548$ ) معنادار نباشد. همچنین مقدار بالای  $R^2$  (۹۸/۹۳٪) بیان‌گر این مطلب است که میزان کاهش درگ توسط این مدل با دقت مناسبی قابل تعریف است. پارامتر دیگری که در جدول ۳ دیده می‌شود،  $R^2$  تعدیل شده (در اینجا ۹۵/۷۸٪) می‌باشد که میزان  $R^2$  را با توجه به متغیرهای مستقل افزوده شده به خط برازش و با توجه به عرض از مبدا‌های نوین، تعدیل و اصلاح می‌کند هر چه تفاوت میان این دو مقدار کم‌تر باشد، نشان می‌دهد که متغیرهای مستقلی که به مدل افزوده شده‌اند،

(۱) Numerical Optimization

(۲) Analysis of Variance

(۳) Fine Tuning

جدول ۳- نتیجه‌های آنالیز واریانس برای آزمایش کاهش درگ در خط لوله‌ی گالوانیزه

منبع	درجه‌ی آزادی	خطای مجموع مربعات <sup>۱</sup>	خطای میانگین مربعات <sup>۲</sup>	ضریب	مقدار احتمال <sup>۳</sup>
مدل	۹	۳۴۱۳/۷۸	۳۱۰/۳۴	۱۰۲۶/۶۰	۰/۰۰۰
ضریب‌های خطی	۱	۴۸/۵۱	۴۸/۵۱	۱۶۰/۴۵	۰/۰۰۰
	۱	۱۹۹/۶۶	۱۹۹/۶۶	۶۶۰/۴۷	۰/۰۰۰
	۱	۳۰۹۹/۲۹	۳۰۹۹/۲۹	۱۰۲۵۲/۲۹	۰/۰۰۰
ضریب‌های درجه دوم	۱	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۲۳	۰/۶۴۶
	۱	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۵۸	۰/۴۶۸
	۱	۵۰/۰۷	۵۰/۰۷	۱۶۵/۶۲	۰/۰۰۰
برهم‌کنش دوتایی	۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰۰
	۱	۲/۰۰	۲/۰۰	۶/۶۲	۰/۰۳۳
	۱	۱۲/۵۰	۱۲/۵۰	۴۱/۳۵	۰/۰۰۰
خطای باقی‌مانده <sup>۴</sup>	۵	۲/۴۲	۰/۴۸	۰/۵۴۸	۰/۵۴۸
	۵	۰/۰۰	۰/۰۰		
مجموع <sup>۵</sup>	۱۹	۳۴۱۶/۲۰			
R <sup>2</sup>			۹۸/۹۳٪		
R <sup>2</sup> تعدیل‌شده <sup>۸</sup>			۹۵/۷۸٪		

### بررسی اثر رینولدز

همان‌گونه که بیان شد تغییرها در راستای رینولدز افزایشی است. زیرا با افزایش دره‌می زنجیره‌های پلیمری بیش‌تر کشیده می‌شوند و در نتیجه روان‌سازی بهتر اتفاق می‌افتد، ولی با توجه به محدودیت کشش پلیمر، از آستانه‌ای به بعد دیگر افزایش اغتشاش دیگر تأثیری بر افزایش میزان کاهش درگ ندارد [۲۷]. در نتیجه‌های گزارش شده توسط لیو و همکاران [۲۸] در حضور پلی‌اکریل‌امید به عنوان عامل کاهنده‌ی درگ با افزایش رینولدز تا ۲۲۰۰۰ میزان کاهش درگ افزایشی است و پس از آن با یک افت ناچیز روند کاهش درگ مقدار ثابتی می‌شود که نتیجه‌ی همانند این پژوهش دارد.

### بررسی اثر غلظت نانو ذره

با افزایش غلظت نانو ذره‌ها، افزایش میزان کاهش درگ تا یک حد بحرانی دیده می‌شود که پس از آن به علت فعالیت سطحی بالا، نانو ذره‌ها با یک‌دیگر کنش نشان داده و اثر متضاد کاهش فعالیت سطحی دیده می‌شود که موجب می‌شود دیگر با افزایش غلظت نانو ذره‌ها تغییری در میزان کاهش درگ رخ ندهد [۲۹]. در پژوهشی همانند که توسط پوران‌فرد و همکاران [۵] انجام گرفت، گزارش شد که با افزودن

نانوسیال متشکل از نانوذره‌های سیلیکا تا یک غلظت بحرانی (حدود ۱ درصد وزنی) میزان کاهش درگ افزایش یافته و پس از آن افزایش غلظت نانوذره تأثیری بر میزان کاهش درگ ندارد.

### بررسی اثر غلظت پلیمر

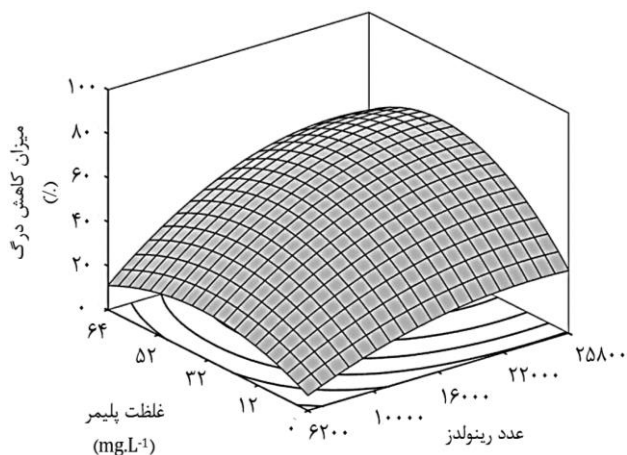
تغییر میزان کاهش درگ در راستای غلظت پلیمر دارای بیشینه است. زیرا افزودن پلیمر تا یک حد بحرانی، منجر به روان‌سازی سیال و کاهش گرانروی و کشش سطحی سیال می‌شود و پس از آن حد آستانه‌ای افزودن پلیمر منجر به افزایش کشش سطحی و کاهش روان‌سازی سیال می‌شود که نتیجه‌ی آن کاهش میزان درگ است [۳۰]. در پژوهش اسفندیاری و همکاران [۲۴] با افزودن لسیتین به عنوان پلیمر برای کاهش درگ، نتیجه‌ای همانند به دست آمد و عنوان شد که این غلظت بهینه، غلظت بحرانی تشکیل مایسل می‌باشد که یک غلظت انتخابی در یک بازه‌ی محدود غلظتی است.

### بهینه‌سازی شرایط فرایند کاهش درگ

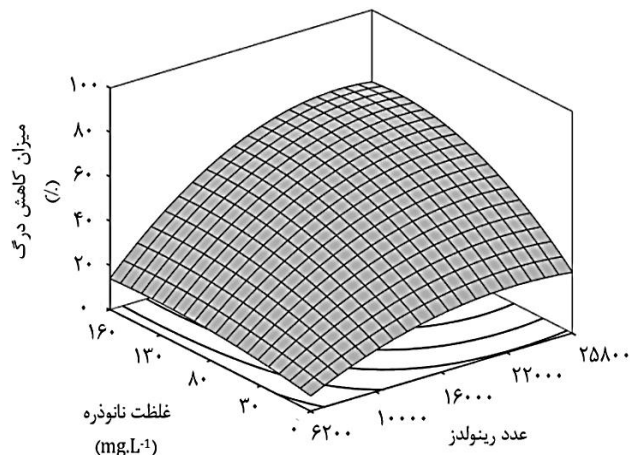
در پژوهش حاضر، هدف از بهینه‌سازی به بیشینه کردن میزان کاهش نیروی درگ بود. بر این اساس، شرایط بهینه‌ی میزان کاهش

(۱) Sum of Square  
(۳) Probability Value  
(۵) Lack of Fit  
(۷) Total

(۲) Mean Square  
(۴) Residual Error  
(۶) Pure Error  
(۸) R2-Adjusted



شکل ۳- نمودار تغییر میزان کاهش درگ بر حسب رینولدز و غلظت پلیمر



شکل ۲- نمودار تغییر میزان کاهش درگ بر حسب غلظت نانوذره و غلظت پلیمر

رینولدز بودند، با استفاده از طرح آزمایش روش پاسخ سطح بررسی و بهینه شدند. مطابق نتیجه‌ها، افزایش آشفتگی جریان و افزایش غلظت نانو ذره تا یک آستانه‌ی بحرانی منجر به افزایش درگ می‌شود و پس از آن روند کاهش درگ ثابت می‌شود. ولی در راستای غلظت پلیمر، نمودار تغییرات میزان کاهش درگ تا رسیدن به یک مقدار بهینه روند افزایشی دارد و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین میزان کاهش درگ با استفاده از فناوری فاین تیونینگ محاسبه شد که در سطح‌های غلظت پلیمر ۴۸ میلی گرم در لیتر، غلظت نانوذره‌ی ۱۱۷ میلی گرم بر لیتر و عدد رینولدز ۲۳۰۰۰ برابر درصد تعیین شد.

درگ با استفاده از تزریق نانوسیال و دستیابی به بیشینه‌ی میزان کاهش درگ برابر ۸۲ درصد به دست آمد. غلظت بهینه‌ی پلیمر ۴۸ میلی گرم بر لیتر، غلظت بهینه‌ی نانوذره‌ی منیزیم اکسید، ۱۱۷ میلی گرم بر لیتر و عدد رینولدز بهینه ۲۳۰۰۰ تعیین شد. پس از تعیین مقدارهای بهینه‌ی پارامترها توسط نرم‌افزار، یک مرتبه آزمایش با تنظیم پارامترها در سطوح بهینه انجام گرفت که میزان ۸۱ درصد کاهش درگ به دست آمد. که تفاوت ناچیزی با میزان تخمین زده شده توسط نرم‌افزار داشت.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور بررسی فرایند کاهش درگ در جریان آشفته‌ی عبوری از خط لوله‌ی گالوانیزه‌ی زیر افقی، از نانو سیال آب نانوذره‌های منیزیم اکسید استفاده شد. سپس، پارامترهای مؤثر بر فرایند کاهش درگ که غلظت نانو ذره، غلظت سورفکتانت و عدد بدون بعد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۸

## مراجع

- [1] Quan Q., Wang S., Wang L., Shi Y., Xie J., Wang X., Wang S., [Experimental Study on the Effect of High-Molecular Polymer as Drag Reducer on Drag Reduction Rate of Pipe Flow](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **178**: 852-856 (2019).
- [2] Fuaad P.A., Arul Prakash K., [Enhanced Drag-Reduction Over Superhydrophobic Surfaces with Sinusoidal Textures: A DNS Study](#), *Computers & Fluids*, **181**: 208-223 (2019).

- [3] Zhu L., Schrobsdorff H., Schneider T.M., Xi L., [Distinct Transition in Flow Statistics and Vortex Dynamics Between Low- and High-Extent Turbulent Drag Reduction in Polymer Fluids](#), *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **262**: 115-130 (2018).
- [4] Moosaie A., Manhart M., [An Algebraic Closure for the DNS of Fiber-Induced Turbulent Drag Reduction in a Channel Flow](#), *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **166**: 1190-1197 (2011).
- [5] Pouranfard A.R., Mowla D., Esmailzadeh 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).
- [6] Wu S.J., Ouyang K., Shiah S.W., [Robust Design of Microbubble Drag Reduction in a Channel Flow Using the Taguchi Method](#), *Ocean Engineering*, **35**: 856-863 (2008).
- [7] Kim T., Shin R., Jung M., Lee J., Park C., Kang S., [Drag Reduction Using Metallic Engineered Surfaces with Highly Ordered Hierarchical Topographies: Nanostructures on Micro-Riblets](#), *Applied Surface Science*, **367**: 147-152 (2016).
- [8] Fu Z., Kawaguchi Y., [A Short Review on Drag-Reduced Turbulent Flow of Inhomogeneous Polymer Solutions](#), *Advanced in Mechanical Engineering*, 1-12 (2013).
- [9] Mysles K., [Flow of Thickened Fluids](#), *US Patent 2492173* (1949).
- [10] Lumley J.L., ["Two-Phase and Non-Newtonian Flows"](#), in ["Turbulence"](#), Bradshaw P. (Editor), Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. **12**: 289-324 (1976).
- [11] Xiong Y.L., Bruneau C.H., Kellay H., [A Numerical Study of two Dimensional Flows Past a Bluff Body for Dilute Polymer Solutions](#), *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **196**: 8-26 (2013).
- [12] Edomwonyi-Otu L.C., Angeli P., [Separated Oil-Water Flows with Drag Reducing Polymers](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **102**: 467-478 (2019).
- [13] Yang S.Q., Ding D., [Drag Reduction Induced by Polymer in Turbulent Pipe Flows](#), *Chemical Engineering Science*, **102**: 200-208 (2013).
- [14] Xing L., Ke Y., Hu X., Zhao Y., Peng F., Bai C., Lin Y., [Preparation and Properties of Amphoteric Polyacrylamide/Modified Montmorillonite Nanocomposites and its Drag Reduction Performance](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **574**: 94-104 (2019).
- [15] Khadom A.A., Abdul-Hadi A.A., [Performance of Polyacrylamide as Drag Reduction Polymer of Crude Petroleum Flow](#), *Ain Shams Engineering Journal*, **5(3)**: 861-865 (2014).
- [16] Khomyakov A., Elyukhina I., [Complete Dynamic Similarity for Sea Trials and Towing Tank Experiments by Means of Polymer Drag Reduction](#), *Ocean Engineering*, **178**: 31-37 (2019).

- [17] Eshtrati M., Al Wahaibi T., Al Hashemi A. R., Al Wahaibi Y., Al Ajmi A., Abubakar A., [Experimental Study of Drag Reduction of Polymer-Polymer Mixtures in Horizontal Dispersed Oil-Water Flow](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **83**: 169-176 (2017).
- [18] Soares E.J., Siqueira R.N., Leal L.M., Barbosa K.C.O., Cipriano D.F., Freitas J.C.C., [The Role Played by the Aging of Aloe Vera on Its Drag Reduction Properties in Turbulent Flows](#), *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **265**: 1-10 (2019).
- [19] Pouranfard A.R., Mowla D., Esmaeilzadeh 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 (3)**: 471-475 (2015).
- [20] Sahin B., Manay E., Akyurek E.F., [An Experimental Study on Heat Transfer and Pressure Drop of CuO-Water Nanofluid](#), *Journal of Nanomaterials*, 1-10 (2015).
- [21] Akindoyo E.O., Abdulbari H.A., [Investigating the Drag Reduction Performance of Rigid Polymer-Carbon Nanotubes Complexes](#), *Journal of Applied Fluid Mechanics*, **9(3)**: 1041-1049 (2016).
- [22] Raei B., Peyghambarzadeh S.M., Salehi Asl R., [Experimental Investigation on Heat Transfer and Flow Resistance of Drug Reducing Alumina Nanofluid in a Fin-and Tube Heat Exchanger](#), *Applied Thermal Engineering*, **144**: 926-936 (2018).
- [23] Kostic M., [Friction and Heat Transfer Characteristics of Silica and CNT Nano Fluids in a Tube Flow](#). *Recent Advances in Energy and Environmental Management*, 99-105 (2013).
- [24] 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*, (2019).
- [25] Zakerhamidi M.S., Tajalli H., Ghanadzadeh A., Milanchian K., Hosseini Nasab N., Moghadam M., [Effect of Polyacrylamide Hydrophilic Gel Composition on Photo-Physical Behavior of Oxazine 750](#), *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **77(1)**: 164-169 (2010).
- [26] Karami H.R., Keyhani M., Mowla D., [Experimental Analysis of Drag Reduction in the Pipelines with Response Surface Methodology](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **138**: 104-112 (2016).
- [27] Quintavalla S.J., Angilella A.J., Smits A.J., [Drag Reduction on Grooved Cylinders in the Critical Reynolds Number Regime](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **48**: 15-18 (2013).
- [28] 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).
- [29] Yan Y.L., Cui M.Y., Jiang W.D., He A.L., Liang C., [Drag Reduction in Reservoir Rock Surface: Hydrophobic Modification by SiO<sub>2</sub> Nanofluids](#), *Applied Surface Science*, **396**: 1556-1561 (2017).
- [30] Zhu Z., Nathan R., Wu Q., [An Experimental Study of the Lubrication Theory for Highly Compressible Porous Media, with and Without Lateral Leakage](#), *Tribology International*, **127**: 324-332 (2018).