

بررسی عامل های کاهش دهنده نیروی درگ در لوله ها

البرز شامخی نیا

Alborz.shamekhinia@gmail.com

چکیده:

یکی از شناخته شده ترین روش های کاهش افت فشار در خطوط لوله، افزودن موادی به نام عوامل کاهش دهنده درگ اصطکاکی (DRA) است. روش های مختلفی برای افزایش کاهش اصطکاک در طول سال ها توسعه یافته و به دو دسته غیر افزودنی و افزودنی تقسیم می شوند. هر دو دسته دارای انواع مختلفی از روش ها با فرمولاسیون ها و کاربردهای مختلف هستند که از میان همه روش های مورد بحث، کاهش درگ با استفاده از افزودنی های پلیمری یکی از جذاب ترین و مطلوب ترین روش ها می باشد و موضوع تحقیقات برای مدتی طولانی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. کاهش درگ در لوله به توان پمپاژ کمتری نیاز دارد و در نتیجه کاهش هزینه های اقتصادی را برای صنایع ارائه می دهد. بنابراین، بیشتر بر روی استفاده از افزودنی های پلیمری به عنوان عامل کاهش اصطکاک، فرمولاسیون های کلی افزودنی ها، مسائل عمده مربوط به استفاده از پلیمرهای کاهش دهنده اصطکاک (DRP) و کاربردهای بالقوه آن متمرکز خواهیم شد. استفاده از افزودنی هایی مانند پلیمرها، نانوذرات و سورفکتانت ها را برای افزایش راندمان هیدرولیک در رژیم های جریان و پیکربندی های لوله مختلف بررسی می کنیم. پلی آکریلونیتریل ها (PAN) مانند غلظت PAN 300 ppm تا ۵۶ درصد، نانوفوتوکاتالیست های مغناطیسی عملکردی ترکیب شده با لسیتین، با بهینه سازی پارامترها با استفاده از روش سطح پاسخ به ویژه در لوله های گالوانیزه و مس، تا ۹۹.۱ درصد، پلیمرهایی مانند پلی اکریل آمید در جریان های روغن-آب تا ۶۴ درصد در جریان های افقی اصطکاک را کاهش دادند. افزودن پلیمر همچنین بر الگوهای جریان، گرادیان های فشار و نسبت های سرعت لغزش، به ویژه در مناطق جریان غالب آب، تأثیر گذاشت. روش های مبتنی بر پلیمر که قادر به کاهش درگ اصطکاکی تا ۸۰ درصد هستند، با کاهش مصرف انرژی، مزایای اقتصادی قابل توجهی ارائه می دهند. با این حال، چالش هایی در مدل سازی دقیق مکانیسم کاهش اصطکاک وجود دارد که نشان دهنده نیاز به تحقیقات بیشتر وجود دارد. به طور کلی مطالعات عوامل کاهش دهنده درگ نقشی چشمگیر و تحول آفرین را در افزایش کارایی جریان لوله برجسته می کنند. این پژوهش به رویکردهای تجربی و تحلیلی مختلفی را برای درک کاهش اصطکاک در جریان های لوله خواهیم پرداخت.

کلمات کلیدی:

DRAs: عامل کاهش دهنده درگ

Drag Redution: کاهش درگ

DRP: کاهش دهنده درگ پلیمری

PAA: پلی اکریلیک اسید

PAM: پلی اکریلیک آمید

PEO: پلی اتیلن اکسید

DRR: نرخ کاهش درگ برحسب درصد

مقدمه:

یکی از مسائل اصلی صنعت نفت و گاز، حمل و نقل سیالات است. به دلیل آشفتگی درون سیال منتقل شده است یکی از پر مصرف ترین بخش های انرژی است. آشفتگی باعث می شود ذرات سیال به صورت آشفته حرکت کنند که انرژی پمپاژ را به جهات مختلف هدایت می کند. بنابراین، اصطکاک ایجاد می شود و منجر به درگ می شود. اصطکاک افت فشار هیدرولیکی داخل لوله است که باعث کاهش دبی جریان می شود. برای غلبه بر کاهش دبی جریان، ایستگاه های پمپاژ بیشتری در امتداد خط لوله نصب می شوند تا انرژی تأمین کنند و دبی جریان مورد نظر را حفظ کنند. در نتیجه، نصب ایستگاه های پمپاژ پرهزینه و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. روش دیگر برای غلبه بر این مشکل، کاهش اصطکاک داخل لوله است. این روش کاهش درگ (DR) نامیده می شود. عبدالباری و همکاران کاهش درگ (Drag Reduction) را به عنوان علم بهبود جریان با کاهش افت فشار اصطکاکی در یک لوله یا کانال تعریف کرده اند. "ترونگ" بیان کرد که هدف اصلی کاهش درگ افزایش جریان های آرام داخل کانال با تأخیر در شروع جریان های آشفته است. این کاهش را می توان با افزودن مقدار کمی از مواد انتخاب شده به نام عوامل کاهش دهنده درگ (DRA) به سیستم به دست آورد. شناخته شده ترین روش برای کاهش درگ، استفاده از افزودنی های پلیمری است. برایان اتکینسون تامز اولین بار در سال ۱۹۴۹ پلیمرها را به عنوان عامل کاهش درگ شناسایی کرد. او دریافت که افزودن ۱۰ ppm پلی متیل متاکریلات به مونوکلروبنزن می تواند نیروی درگ اصطکاکی آشفته را تا ۳۰-۴۰ درصد کاهش دهد. این یافته منجر به تحقیقات گسترده در مورد کاهش درگ (DR) و نحوه استفاده از پتانسیل DR در صنایع شد. علاقه مهندسی به مفهوم DR عمدتاً به دلیل توانایی آن در کاهش توان پمپاژ و بهبود ظرفیت خط لوله است. جدا از حمل و نقل سیال، DRA همچنین در چندین سیستم مهندسی مانند آتش نشانی، گرمایش و سرمایش ناحیه ای، بارگیری و تخلیه نفت و همچنین در پالایشگاه ها و سایر موارد کاربرد پیدا کرده است. توسعه اخیر در DRA شامل پیاده سازی در سیستم جریان چند فازی لوله است. السرخی و همکاران دریافتند که افزودن اکسید پلی اتیلن به جریان مخلوط روغن-آب گرادیان فشار را کاهش می دهد و درجه اختلاط آشفتگی را کاهش می دهد. DR حاصل ۶۵ درصد با تنها ۱۰-۱۵ ppm غلظت DRA اضافه شده به مخلوط است. افزودن DRA در جریان چند فازی می تواند پراکندگی فضایی سیالات را تغییر دهد و بر مرزهای بین الگوهای جریان مختلف تأثیر بگذارد. [1]

شکل ۱ مکانیسم هاس کاهش درگ (DR) را نشان می دهد:

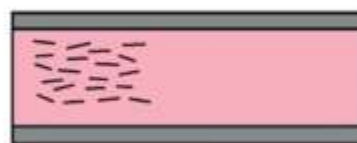
MA. Asidin et al./Chinese Journal of Chemical Engineering 27 (2019) 1921–1932



(a) No drag reduction.



(b) Drag reduction occur.



(c) Maximum drag reduction.

شکل ۱- مکانیسم DR در فیلر سوسپانسیون

تأثیر پلیمر کاهش دهنده درگ (DRP) بر ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت در رژیم های جریان آرام، گذرا و آشفته:

محققان دریافته‌اند که درگ اصطکاکی در لایه نازک نزدیک به رابط جامد-مایع بخش بزرگی از افت فشار را دارد. این مواد بر انرژی هیدرولیک پمپ برای حرکت سیال در خط لوله متمرکز هستند و نه بر غلبه بر مقاومت خط لوله و در نتیجه ظرفیت سیستم لوله را افزایش می‌دهند. Sung و همکاران پلیمرهای PAM و PEO را در شرایط عملیاتی مختلف مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که PAM مقاومت برشی بالاتری نسبت به PEO دارد. آنها این پلیمر را به عنوان یک افزودنی عالی برای کاربردهای انتقال با دمای بالا و طولانی مدت پیشنهاد کرده‌اند. Pereira و همکاران پلیمرهای مختلفی مانند PAM، PEO و XG را با استفاده از یک دستگاه شکاف دوگانه استوانه‌ای چرخان بررسی کردند. آنها دریافتند که به دلیل استحکام مکانیکی بالای زنجیره PAM، DR آن در مقایسه با سایر پلیمرها در طول زمان کاهش نیافته است. بنابراین، PAM برای مطالعه حاضر در مقایسه با سایر پلیمرها انتخاب شده است. تعدادی از مطالعات در مورد DR توسط پلیمر PAM در شرایط عملیاتی مختلف و سیستم های آزمایشگاهی در (جدول ۱) خلاصه شده است. همانطور که در جدول زیر نشان داده شده است، حداکثر DR% پلیمر PAM توسط Sitaramaiah و Smith و Jouenne و همکاران به میزان ۸۰ درصد در سیستم خط لوله مشاهده شد در حالی که حداقل DR% توسط Raei و همکاران در یک مبدل حرارتی لوله دوگانه به دست آمد که ناچیز بود. بسیاری از سیستم‌ها مانند سیستم‌های گرمایش و سرمایش ناحیه‌ای (DHC) که از لوله‌های توزیع طولانی تشکیل شده‌اند، برای انتقال سیال از منبع به مبدل‌های حرارتی به توان پمپاژ زیادی نیاز دارند. اگر افت فشار و مقاومت هیدرولیکی (افت‌های اصطکاکی) مرتبط با پمپاژ سیال کاهش یابد، هزینه‌های عملیاتی این سیستم‌ها به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. DRA می‌تواند با کاهش درگ اصطکاکی جریان، مصرف انرژی پمپاژ را کاهش دهد و واضح است که حل این مشکل برای هر سیستمی از جمله خطوط لوله ضروری است.

[2]

Comparison of using PAM as a DRA in previous experimental studies.

Ref.	Experimental system	Operating conditions	Max%DR
Al-Wahaibi et al. [15]	Acrylic pipe	Water and Oil, (PAM Sodium Acrylate) u: 0.1-0.8 m/s C: 20-50 ppm D: 14 mm	50
Andrade et al. [16]	Rotating cylindrical double gap device	Water, PAM (Mw: 5×10^6 g/mol) Re: 1360, 1570 C: 50 ppm	24
Eshtrati et al. [17]	Acrylic pipe	Water and Oil, (PAM, Mw: 12 MDa) Re: 35,000-65,000 u: 0.8-1.5 m/s C: 5 - 30 ppm D: 30.6 mm	55
Hoyt [18]	Pipeline	Water PAM and Ferric ions Re: $10^4 - 2 \times 10^5$ C: 1-20 ppm D: 25.4 mm	68
Jouenne et al. [8]	Pipelines Carbon Steel PVC tubing	Water, HPAM (MW: 18 MDa) Re: max 561,438 Q: max 242 m ³ /h C: max 2000 ppm D: max 152 mm	80
Khadom & Abdul-Hadi [19]	Pipelines	Crude oil, PAM (3×10^6 g/mol) Re: 6064-36,388 Q: 2-12 m ³ /h D: 1.91-5.08 mm	40.64
Liberatore et al. [20]	Rectangular flow channel having a flat wall and a wavy wall	Tap water, PAM (2.5×10^6 g/mol) Re: 48,000 C: 200-1000 ppm	58
Lim & Choi [21]	Rotating disk apparatus	Water, PAM (18×10^6 g/mol) $N_{Re} \geq 3 \times 10^5$ $\omega \geq 750$ rpm C: 1.35 wppm	16
Pereira & Soares [22]	Axial symmetric double gap geometry	Water, PAM (5×10^6 g/mol) Re: 1360-1600 C: 50, 100 ppm ω : max 3000 rpm	24
Pereira et al. [6]	Axial symmetric double gap geometry	Water, PAM (M.W.: 5×10^6 g/mol) Re: max 1360 C: max 37.5 ppm	22
Raei et al. [9]	Double tube heat exchanger	Water, PAM (5×10^6 g/mol) Re: 18,000 - 40,000 C: 0-100 ppm	%DR: Negligible %HTR: max 25
Sandoval et al. [23]	Pipe flow galvanized steel pipes	Filtered water, PAM (5×10^6 g/mol) Re: 85,000-110,000 C: 25-200 ppm D: 16.35 mm	70
Sitaramaiah and Smith [7]	Pipe flow Steel pipe	Distillate water, tap water, brine, PAM (M.W.: $3.1-6.3 \times 10^6$ g/mol) Q: 0.45-4.3 m ³ /h C: 100-1000 ppm D: 3.175 mm	80
Sung et al. [5]	Rotating disk apparatus	Distillate water, PAM (5.5×10^6 g/mol) C: 10 - 50 ppm $N_{Re} \geq 3 \times 10^5$ $\omega \geq 2800$ rpm	29
Varnaseri et al. [24]	Compact heat exchanger	Pure water, PAM (5×10^6 g/mol) Re: 200 - 1400 C: 0-150 ppm	%DR: 14 %HTR: max 28
Zhang et al. [25]	horizontal smooth circular tube	Air-Water, PAM (18×10^6 g/mol) Re: 3892-12,025; V_{LS} : 0.52-1.46 m/s C: 300 ppm D: 40 mm	%DR: 54.7 %HTR: max 70.3

جدول ۱ - مقایسه استفاده PAM به عنوان کاهنده درگ در مطالعات تجربی قبلی

با وجود مطالعات متعدد در مورد کاهش درگ (DR)، مفهوم آن کاملاً درک نشده است. طبق گفته‌های Virk و همکاران، DR بسته به نوع پلیمر از دو مکانیزم پیروی می‌کند:

الف- در مکانیزم اول، پلیمرها در حالت استراحت پیچ خورده می‌مانند. این مواد برای کشش و شروع به کاهش اصطکاک به سطح مشخصی از آشفتگی نیاز دارند.

ب- در مکانیزم دوم، پلیمرها در حالت استراحت کشیده می‌شوند.

بنابراین، انتظار می‌رود که زمانی که مکانیزم دوم غالب باشد، DR سریع‌تر شروع شود. مکانیزم DR برای محلول‌های PAM به وضوح از مکانیزم دوم است. خواص ویسکوالاستیک در کاهش آشفتگی موثرتر از نیروی ویسکوزی ایجاد شده در سیال هستند و خطی شدن ساختار مولکول‌های پیچیده یک عامل موثر در DR است در حالی که تحقیقات نشان داده‌اند

که اثرات الاستیک می‌توانند درگ را کاهش دهند. (جدول ۲) نظریه‌های مختلف در مورد مفهوم DR و برخی از مطالعاتی که از این مفاهیم استفاده کرده‌اند را خلاصه می‌کند. از بین نظریه‌های ارائه شده در (جدول ۲)، نظریه‌های کشش مولکولی، کشش گردابه و لایه‌های زیر لایه ویسکوز به واقعیت نزدیک‌تر هستند و بیشترین استناد را در بین مطالعات داشته‌اند، اما نظریه رقیق‌سازی برشی کمترین مرجع را دارد و از واقعیت دورترین است. [2]

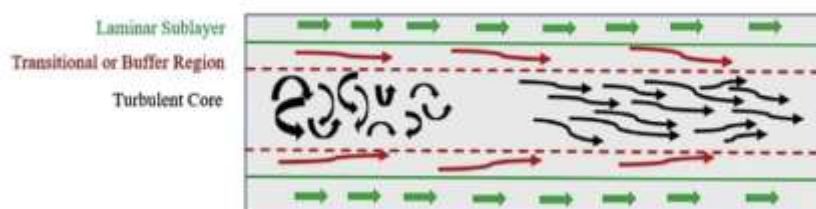
Theories of the concept of DR [35].

Theory title	Description	Ref.
Shear Thinning	According to this theory, by thinning the shear stress, the friction factor of the layer near the wall is lower than that of pure solvent, and as a result, DR occurs.	Toms [4]
Viscoelasticity	In this theory, it is assumed that the drag reduction polymer solution is a viscoelastic and the DR is due to the loss of energy in the turbulent flow due to its viscoelastic properties.	Astarita [36]
Molecular Stretching	Elastic properties and continuous deformation of the DRA molecule, causing damping of fine eddies and dispersing turbulent energy, as a result, DR occurs.	De Gennes [37], Tulin [14], Lumley [13,38,39]
Decreased Turbulent Dissipation	This theory is based on the dispersion of turbulent energy by fine eddy and DR due to suppression of turbulence by the DRAs. In other words, the absorption of energy from the turbulent vortices by the extended polymer molecules causes the DR.	Kostic [35]
Vortex Stretching	In this theory, the extended (enlargement, stretching) of the vortex near the wall causes to stretch of polymer molecules and create tensional stress along the flow lines and the DR is caused by the system's resistance to this phenomenon. This theory emphasizes on the role of the region outside the laminar sublayer.	Gadd [40], Virk [41,42]
Non-isotropic properties	According to this theory, shear flow causes the polymer chains to be transformed and consequently, change the viscosity of the solution. On the other hand, the amount of shear force and viscosity is directional (non-isotropic) and this property is considered as the DR source. In other words, with the extension of polymers, the turbulence structure changes due to anisotropic role of stress, viscosity and elasticity, and because of the entropy change, DR occurs.	Kostic [35], Virk [41,42]
Laminarization of Turbulent Flow	In this theory, the DR is described as a direct measure of the flow relaxation by DRAs. In fact, relaxing the turbulent flow reduces fluid energy loss and helps DR. Also, suppressing speed fluctuations in turbulent flow with the help of DRA can achieve maximum DR.	Kostic [35]
Viscos Sublayer	Extending the polymer molecules outside the viscous sub-layer and thus, increasing its thickness reduces the velocity gradient near the wall and creates DR.	Tulin [14], Lumley [13,38,39], Virk [41,42]

(جدول ۲ - نظریه‌های مفهوم کاهش درگ)

طبق شکل (۲)، سه لایه جریان در جریان آشفته لوله وجود دارد، از جمله یک لایه زیرین آرام (کنار دیواره)، یک منطقه گذرا (منطقه بافر) و یک هسته کاملاً آشفته (در مرکز لوله). تنها مقدار کمی در مقیاس ppm از پلیمرهای با وزن مولکولی بالا تشکیل انفجارهای آشفته در منطقه بافر را سرکوب می‌کند. علاوه بر این، پلیمرها همچنین تشکیل و پراکندگی گردابه‌ها در منطقه آشفته را سرکوب می‌کنند و باعث کاهش درگ (DR) می‌شوند. [2]

M. Varnaseri and S.M. Peyghambarzadeh/International Journal of Heat and Mass Transfer 154 (2020) 119815



(شکل ۲ - لایه‌های مختلف جریان آشفته درون لوله و اثر کاهش دهنده درگ)

با وجود توسعه گسترده عامل کاهش دهنده درگ (DRAS) در سیستم‌های جریان سیال، چالش جدی تأثیر این مواد بر کاهش انتقال حرارت بوده است. کاهش انتقال حرارت همیشه در استفاده از DRAS ظاهر شده است. بسیاری از مطالعات

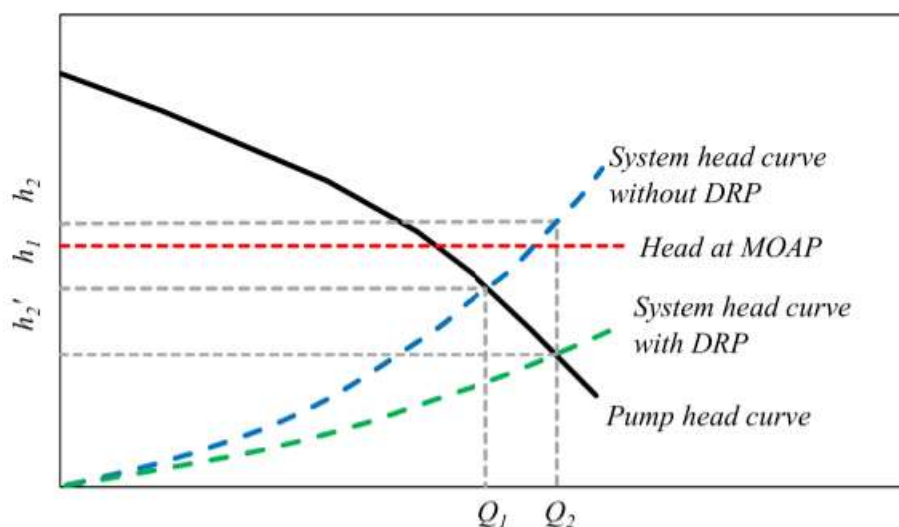
گزارش کرده‌اند که خواص کاهش انتقال حرارت (HTR) بیشتر از DR است که نامطلوب است. همانطور که در جدول شماره ۱ نشان داده شده است، مطالعه اثر عوامل کاهش دهنده درگ بر عملکرد انتقال حرارت سیستم بسیار محدود بوده است. از میان این مطالعات می‌توان به مطالعه Zhang و همکاران اشاره کرد که گزارش کرده‌اند استفاده از PAM به عنوان یک DRA ضریب درگ و ضریب انتقال حرارت را به ترتیب حدود ۳۷ و ۷۰ درصد کاهش داده است. وایت ثابت کرد که افزودن پلیمر به یک حلال همیشه انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. Sabersky و Debrule کاهش قابل توجهی در انتقال حرارت در لوله‌های زبر برای پلیمر اکسید پلی اتیلن (PEO) گزارش کردند. پیغمبرزاده و همکاران کاهش انتقال حرارت همراه با کاهش DR در جریان آرام با افزودن پلیمر CMC را نشان دادند. [2]

تحلیل انرژی جریان روغن-آب با پلیمر کاهش دهنده درگ در شیب‌های لوله و قطرهای مختلف:

صنایع نفت و گاز به طور سنتی از کاهش دنده‌های درگ برای کاهش افت فشار در انتقال سیالات در مسافت‌های طولانی استفاده می‌کنند. یک مثال معمول، افزایش قابل توجه دبی جریان روغن در نتیجه کاهش افت فشار با افزودن ۱۰ ppm پلیمر در خط لوله ۱۳۰۰ کیلومتری ترانس آلاسکا است. درگ پوسته‌ای که هنگام جریان سیال روی سطح دیوار ظاهر می‌شود، بخشی از تلفات فشار در خطوط لوله است و می‌تواند مقادیر زیادی انرژی مصرف کند و گاهی اوقات باعث انتشار گازهای مضر شود. با توجه به استفاده از پمپ‌ها در جریان سیال برای غلبه بر این درگ اصطکاکی با افزایش فشار سیال است. متأسفانه، استفاده از چندین پمپ در طول خط لوله دارای محدودیت‌هایی است زیرا می‌تواند بسیار پرهزینه باشد و فشار خط لوله را فراتر از "حداکثر فشار عملیاتی مجاز" (MAOP) افزایش دهد. یکی از راه‌های افزایش ظرفیت خط لوله در صورتی که فشار خروجی به MAOP رسیده باشد، لوپینگ است. با این حال، لوپینگ نیز چالش‌های خاص خود را دارد مانند نیاز به خاموش کردن خط لوله و هزینه ثابت بالای آن که می‌تواند کارایی عملیات را کاهش دهد. بنابراین، استفاده از افزودنی‌های معروف به عوامل کاهش دهنده درگ یکی از ایمن‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های افزایش ظرفیت و کارایی سیستم بدون تغییر شرایط خط لوله است. به همین دلیل، تکنیک کاهش درگ (DR) برای آشفته‌گی دیواره در کاربردهای صنعتی بسیار مهم شده است. [3]

پلیمرها بهترین افزودنی‌های کاهش دهنده درگ هستند زیرا توانایی کاهش چشمگیر توان لازم برای هدایت سیالات به سمت پایین را با تنها حل کردن مقادیر بسیار کمی از پلیمرها در سیالات کار دارند.

یک پلیمر کاهش دهنده درگ به عنوان یک بهبود دهنده جریان برای خطوط لوله عمل می‌کند که می‌تواند یا افزایش جریان (با استفاده از همان مقدار انرژی) را فراهم کند که منجر به توان عملیاتی بسیار بالاتر می‌شود، یا به طور جایگزین همان دبی جریان را با استفاده از انرژی بسیار کمتر برای پمپاژ حفظ کند. مزیت استفاده از پلیمرهای افزودنی به جای استفاده از چندین پمپ و/یا لوپینگ برای افزایش راندمان حمل و نقل را می‌توان از تحلیل انرژی سیستم در شکل (۳) مشاهده کرد. [3]



(شکل ۳ - اثر کاهنده های درگ بر افت هد سیستم خطوط لوله)

در تحلیل سیستم‌های لوله کشی، افت فشار معمولاً به صورت ارتفاع ستون سیال معادل بیان می‌شود که به عنوان افت هد شناخته می‌شود. افت‌های هدی که ناشی از ویسکوزیته هستند و مستقیماً با تنش‌های برشی دیواره مرتبط هستند، ارتفاع‌های اضافی را نشان می‌دهند که سیالات باید توسط پمپ‌ها برای غلبه بر تلفات اصطکاکی در لوله‌ها بالا بروند. همانطور که در شکل بالا نشان داده شده است، واضح است که فشار لوله در هد سیستم نهایی (h_2) در صورت افزایش دبی از Q_1 به Q_2 از MAOP فراتر خواهد رفت. افزودن DRP منحنی هد سیستم را تغییر می‌دهد به طوری که فشار لوله در هد سیستم نهایی (h_2) به زیر MAOP کاهش می‌یابد. [3]

تأثیر پلیمر کاهش دهنده درگ بر الگوهای جریان. کاهش درگ و نسبت سرعت لغزش جریان روغن-آب در لوله افقی:

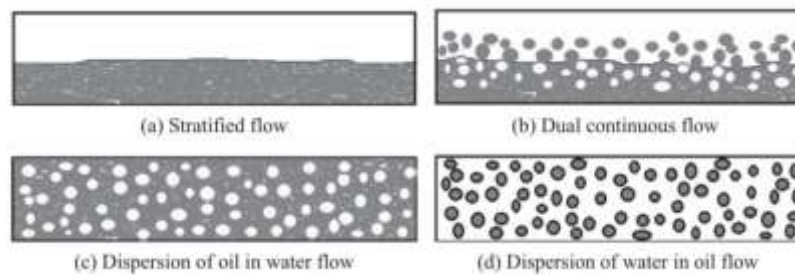
جریان چند فاز زمانی رخ می‌دهد که دو یا چند فاز سیال به طور همزمان از یک مجرا عبور کنند. برای جریان‌های دو فاز روغن-آب، آنها معمولاً در صنایع شیمیایی، پتروشیمی و به ویژه در صنایع نفت در حین انتقال و تولید یافت می‌شوند. معمولاً دو فاز در جریان‌های روغن-آب به دلیل تفاوت در چگالی، تمایل به جداسازی و جریان با سرعت‌های مختلف دارند که باعث تغییر در توزیع فیزیکی فازها در لوله می‌شود. این توزیع فیزیکی فازها منجر به الگوهای جریان مختلفی می‌شود که توسط نیروهای ماندند: "شناوری، آشفتگی، اینرسی و کشش سطحی" کنترل می‌شود. برخلاف جریان‌های تک‌فازی، الگوی جریان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های جریان‌های چندفازی در لوله‌ها است زیرا فشار افت ایجاد شده و سهولت جداسازی فازها را تعیین می‌کند. پلیمرهای کاهش دهنده درگ (DRP) متداول‌ترین عوامل مورد استفاده برای کاهش آشفتگی و اصطکاک با طولانی کردن جریان آرام یا تأخیر در شروع جریان آشفته به اعداد رینولدز بالاتر هنگام تزریق پلیمرها به جریان‌های روغن-آب هستند. [4]

عوامل کاهش دهنده درگ دیگر شامل سورفکتانت‌ها هستند که کمتر استفاده می‌شوند و الیاف که به ندرت استفاده می‌شوند. DRPها پلیمرهای زنجیره بلند، محلول در آب و یا روغن با وزن مولکولی بسیار بالا (معمولاً در محدوده ۱ تا ۱۵ میلیون دالتون) هستند که حتی در مقادیر بسیار کمی از قسمت در میلیون، می‌توانند کاهش قابل توجهی در افت فشار و همچنین اصلاح الگوهای جریان ایجاد کنند. [4]

لازم به ذکر است که اتفاق نر در مورد انواع و تعداد الگوهای جریان جریان روغن-آب مشاهده شده توسط محققان وجود ندارد. با این حال، رایج‌ترین الگوهای جریان مشاهده شده در جریان روغن-آب عبارتند از:

1- stratified, 2- stratified wavy, 3-stratified with mixing at the interface (or drops at the interface), 4-dispersion of oil in water and water in oil, 5-dispersion of oil in water and water layer, 6-dispersion of water in oil and oil layer, 7- complete dispersion of oil in water and complete dispersion of water in oil flows

به صورت شماتیک نشان داده شده است. [4] Lovick و Angeli به طور کلی تمام این الگوهای جریان را به سه دسته تقسیم کردند که همانطور که در شکل (۴) به



(شکل ۴ - الگوهای جریان رایج در جریان نفت-آب)

روش تحقیق:

کاهش افت هد توسط DRP

افت هد در جریان سیال درون یک لوله طبق معادله دارسی-وایسباخ به صورت زیر داده می‌شود:

(۱)

$$h_L = \frac{\Delta P}{\rho g} = 4f \frac{L}{D} \frac{U^2}{2g}$$

که در آن h_L افت هد، ΔP افت فشار، f ضریب اصطکاک فانینگ، U سرعت متوسط، L طول لوله، ρ چگالی سیال و g شتاب گرانشی است.

برای جریان نفت-آب، معادله (۱) را می‌توان بازنویسی و ساده کرد تا افت هد به صورت زیر به دست آید:

(۲)

$$h_L = \frac{\Delta P}{\rho_m g} = 2f_m \frac{L}{D} \frac{U_m^2}{g}$$

که در آن f_m ضریب اصطکاک فانینگ مخلوط، U_m سرعت مخلوط و ρ_m چگالی مخلوط است.

شایان ذکر است که تعریف دیگری از درصد کاهش درگ بر حسب ضریب اصطکاک به صورت زیر ارائه می‌شود:

(۳)

$$\%DR = \left(1 - \frac{f_{m-DRP}}{f_m}\right) \times 100$$

که در آن f_m و f_{m-DRP} به ترتیب ضریب اصطکاک قبل و بعد از افزودن DRP هستند.

بنابراین، در یک دبی ثابت (یا سرعت مخلوط ثابت)، با در نظر گرفتن همزمان معادلات (۳) و (۴) نشان داده می‌شود که افت هد جریان قبل (h_L) و بعد (h_{L-DRP}) از افزودن DRP به صورت زیر با یکدیگر مرتبط هستند:

(۴)

$$h_{L-DRP} = \left(1 - \frac{\%DR}{100}\right) h_L$$

به طور کلی، افت هد سیستم هم قبل و هم بعد از افزودن DRP با افزایش برش نفتی و گذردهی افزایش یافت. این امر به این دلیل است که افت هد سیستم مستقیماً با گرادیان فشار متناسب است، که همین روند را در برابر این شرایط جریان نشان داد. همچنین مشاهده می‌شود که افزودن 40ppm DRP افت هد را در سیستم جریان نفت-آب کاهش داد و این کاهش‌ها با افزایش گذردهی افزایش یافت. این روند در گرادیان‌های فشار نیز مشاهده شد و می‌توان آن را به بهبود عملکرد DRP در نتیجه شدت آشفستگی قوی‌تر مرتبط با افزایش گذردهی نسبت داد.

شایان ذکر است که DRP فقط در مناطق جریان غالب آب مؤثر بود (یعنی تا برش نفتی ۰.۶ در لوله با قطر داخلی ۳۰.۶ میلی‌متر و تا برش نفتی ۰.۷ در لوله‌های با قطر داخلی ۵۵.۷ میلی‌متر و ۷۴.۷ میلی‌متر) زیرا DRP فقط در آب محلول است. بنابراین، کاهش در افت هد در بالای این برش‌های نفتی که جریان غالب نفت رخ می‌داد، مشاهده نشد. یک مشاهده به همان اندازه مهم دیگر این بود که تغییر در زاویه لوله، تأثیر قابل توجهی بر کاهش افت هد نداشت. با این حال، افزایش قطر لوله، کاهش در افت هد را کاهش داد. این کاهش در افت هد با افزایش گذردهی بارزتر شد.

بحث و تحلیل نتایج:

اثر پلیمر با وزن مولکولی بالا به عنوان کاهش دهنده بر نرخ کاهش اصطکاک جریان لوله بصورت تجربی:

پلیمرهای کاهش دهنده درگ (DRP) نوعی از پلیمرهای با وزن مولکولی بالا هستند که می‌توانند مقاومت اصطکاکی در دیواره را حتی در مقادیر بسیار کم اعمال شده به جریان آشفته تک فاز به طور مؤثر کاهش دهند. همانطور که گفته شد ویرک در سال ۱۹۷۵ کاهش اصطکاک القایی توسط محلول‌های رقیق ماکرومولکول‌های خطی و تصادفی در جریان لوله آشفته را بررسی کرد. نتایج نشان داد که برای یک پلیمر معین، مقدار پلیمر مورد نیاز برای رسیدن به سطح کاهش درگ معین با افزایش وزن مولکولی پلیمر کاهش می‌یابد. [2]

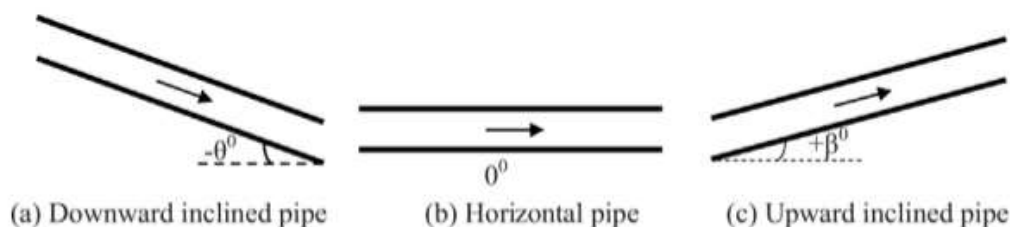
علاوه بر این، همانطور که قبلاً توسط یانگ در سال ۲۰۰۹ گزارش شده است، کاهش درگ با افزایش عدد رینولدز (Re) افزایش می‌یابد. زاکین و هانستون (۱۹۸۰) از طریق آزمایش‌ها، وزن مولکولی و غلظت DRP ها را در یک لوله با قطر

داخلی ۱.۵۸ میلی‌متر با مخلوطی از ۵۸ درصد تولوئن و ۴۲٪ ۲، ۲، ۴-ایزوکتان در $Re\ 18000$ بررسی کردند. نتایج نشان داد که کاهش درگ با افزایش وزن مولکولی و عدد Re افزایش می‌یابد و با افزایش غلظت، نرخ کاهش به حداکثر مقدار افزایش می‌یابد. مارتین و شاپلا در سال ۲۰۰۳ تأثیر وزن مولکولی و غلظت پلیمر بر کاهش درگ محلول‌های پلی‌ایزوبوتیلن محلول در روغن را در یک لوله شیشه‌ای افقی با قطر داخلی ۳.۰۲ میلی‌متر بررسی کردند. نتایج نشان داد که اثربخشی DRP با افزایش وزن و غلظت افزایش می‌یابد و $DRP\ 70\%$ در بالاترین وزن مولکولی رخ می‌دهد. [5]

کارامی و مولوی در سال ۲۰۱۲ تأثیر پارامترهای مختلف بر کاهش افت فشار ناشی از افزودن مقادیر کمی کاهش دهند درگ پلیمری (DRP) به خطوط لوله نفت خام را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که درجه کاهش با افزایش دما، دبی جریان روغن و غلظت عامل کاهش دهنده درگ (DRA) افزایش می‌یابد. پورعرب و همکاران در سال ۲۰۱۴ اثر تزریق نانوسلولز به عنوان یک DRA در لوله‌های افقی ۱۲.۷ میلی‌متری با قطر داخلی در شرایط جریان آشفته آب را بررسی کردند. نتایج نشان داد که برای یک Re یا مجموعه مشخصی از شرایط جریان، ضریب درگ با تزریق غلظت کمی از نانوسلولز کاهش می‌یابد. درصد کاهش درگ با افزایش غلظت نانوسلولز افزایش یافت، اگرچه کاهش در غلظت بحرانی ۰.۷۵ درصد وزنی اشباع شد. پیغمبرزاده و همکاران در سال ۲۰۱۶ از دو نوع کربوکسی متیل سلولز (CMC) با وزن مولکولی مختلف به عنوان DRA برای مطالعه اثر DRP بر افت فشار و انتقال حرارت یک کولر هوا استفاده کردند. نتایج نشان داد که در شرایط مشابه، درجه کاهش درگ حاصل شده با پلیمر با وزن مولکولی بالاتر بیشتر از پلیمر با وزن مولکولی پایین‌تر است. علاوه بر این، برای یک غلظت پلیمر مشخص، درجه کاهش با افزایش دبی جریان و دما افزایش یافت. [5]

عملکرد یک پلیمر کاهش دهنده اصطکاک در جریان روغن-آب افقی و شیب‌دار رو به پایین:

تغییر جهت لوله یک جریان روغن-آب از موقعیت افقی به موقعیت شیب‌دار باعث تغییراتی در ویژگی‌های جریان مانند الگوهای جریان، گرادیان‌های فشار و همچنین هولداپ‌ها می‌شود، حتی اگر شرایط جریان ثابت بماند. این به این دلیل است که در نتیجه شیب، نرخ اختلاط در هر دو فاز افزایش می‌یابد که بر الگوهای جریان و هولداپ‌ها تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، معرفی گرادیان‌های فشار گرانشی توسط شیب باعث افزایش (برای شیب رو به بالا) یا کاهش (برای شیب رو به پایین) گرادیان‌های فشار کلی می‌شود. علاوه بر این، گرادیان فشار اصطکاکی می‌تواند تحت تأثیر شیب به دلیل تغییرات در سرعت‌های درون‌سازه فازهای موجود در لوله قرار گیرد. در همین حال، تأثیر شیب لوله در سرعت‌های مخلوط پایین‌تر بیشتر احساس می‌شود، جایی که جاذبه نقش مهم‌تری ایفا می‌کند. انواع مختلف جهت‌گیری لوله (به غیر از شیب عمودی) در شکل (۵) به صورت شماتیک نشان داده شده است. [6]



شکل ۵ - انواع جهت لوله. "شکل فلش جهت جریان را نشان می‌دهد"

جریان روغن-آب در شیب رو به پایین توجه زیادی را در ادبیات به خود جلب نکرده است:

مطالعات موجود بر روی تأثیر شیب‌ها بر الگوهای جریان، افت فشار و هولدآپ‌ها بدون استفاده از پلیمرهای کاهش دهنده درگ متمرکز شده‌اند. چنین آثاری شامل:

الف- Cox در سال ۱۹۸۵ در منفی ۱۵ درجه و منفی ۳۰ درجه

ب- Vedapuri و همکاران در سال ۱۹۹۷ در منفی ۲ درجه

پ- Alkaya در سال ۲۰۰۰ در منفی ۰.۵ درجه، منفی ۱ درجه، منفی ۲ درجه و منفی ۵ درجه

ت- Oddie و همکاران در سال ۲۰۰۳ در منفی ۲ درجه

ث- Abduvayt و همکاران در سال ۲۰۰۴ در منفی ۰.۵ درجه و منفی ۳ درجه

ج- Lum و همکاران در سال ۲۰۰۶ در منفی ۵ درجه

ح- Rodriguez و Oliemans در سال ۲۰۰۶ در منفی ۱.۵ درجه، منفی ۲ درجه و منفی ۵ درجه

خ- Kumara و همکاران در سال ۲۰۰۹ در منفی ۱ درجه و منفی ۵ درجه

د- همه این مطالعات، به استثنای Oddie و همکاران در سال ۲۰۰۳،

مشاهده کردند که معرفی شیب‌های رو به پایین منجر به اختلاط بیشتر می‌شود به طوری که انتقال از جریان‌های جدا شده به جریان‌های پراکنده در سرعت‌های مخلوط پایین‌تر از جریان‌های افقی رخ می‌دهد.

کاکس گزارش کرد که تأثیر شیب رو به پایین بر الگوهای جریان زمانی که جهت‌گیری لوله از منفی ۱۵ درجه به منفی ۳۰ درجه تغییر می‌کرد، بیشتر از تغییر از ۰ درجه به منفی ۱۵ درجه بود.

آلکایا همچنین دریافت که شیب رو به پایین فقط پراکندگی جریان آب در روغن را در منفی ۵ درجه افزایش می‌دهد اما در منفی ۱ درجه افزایش نمی‌دهد. [6]

عبدوویت و همکاران به طور مشابه دریافتند که در منفی ۳ درجه، جریان صاف لایه لایه که قبلاً در جریان افقی مشاهده شده بود به جریان موج‌دار لایه لایه تغییر کرد در حالی که منطقه جریان پیوسته دوگانه (اصطلاح Dual Continuous Flow نوع خاصی از جریان که در آن دو فاز "مانند مایع-مایع، یا گاز-گاز" به‌طور هم‌زمان و پیوسته در یک سیستم حرکت می‌کنند، اما هر دو فاز به صورت پیوسته حضور دارند). فقط به کسرهای ورودی آب متوسط و بالا کاهش یافت. [6] رودریگز و اولیمنس نیز همین مشاهده را در مورد ناپدید شدن جریان صاف لایه لایه و جایگزینی آن با جریان موج‌دار لایه لایه در نتیجه شیب رو به پایین گزارش کردند. علاوه بر این، آنها مشاهده کردند که منطقه پراکندگی روغن در آب و الگوی جریان لایه آب با شیب رو به پایین به سمت الگوی جریان لایه لایه با اختلاط در رابط افزایش می‌یابد. [7]

لوم و همکاران اظهار داشتند که اختلاط دو فاز در شیب منفی ۵ درجه بیشتر تقویت شده است به طوری که جریان‌های موج‌دار لایه لایه و پلاگین که در جریان افقی مشاهده شده بود کاملاً ناپدید شد و فقط جریان‌های دو پیوسته و پراکنده باقی ماند. آنها این معرفی پراکندگی را به رابط آشفته‌تر مرتبط با جریان شیب‌دار رو به پایین نسبت دادند. باز هم، آنها مشاهده کردند که منطقه جریان دو پیوسته که از کمترین سرعت مخلوط اندازه‌گیری شده ۰.۵ متر بر ثانیه شروع می‌شد، کوچکتر از جریان افقی بود زیرا جابجایی در مرز بین جریان دو پیوسته و پراکندگی کامل روغن در آب (یعنی امولسیون روغن در آب) به کسرهای روغن ورودی بالاتر در سرعت‌های مخلوط بالاتر وجود داشت. این جابجایی به سرعت بالاتر لایه آب در شیب رو به پایین نسبت داده شد که مقدار روغن پراکنده شده در آب را افزایش داد و در نتیجه انتقال از جریان دو پیوسته به جریان امولسیون روغن در آب را به کسرهای روغن بالاتر به تأخیر انداخت. در نهایت، مشاهده شد که منطقه جریان امولسیون روغن در آب نیز به کسرهای ورودی روغن بالاتر در مقایسه با جریان افقی گسترش می‌یابد، اما منطقه جریان امولسیون آب در روغن به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار نگرفت. معرفی شیب‌های رو به پایین به طور مشابه بر الگوهای جریان مشاهده شده توسط کومارا و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر گذاشت. [6]

مکانیسم‌های کاهش اصطکاک پلیمری با تمرکز بر خواص ویسکوالاستیک:

مواد افزودنی کاهش دهنده درگ (DRAS) است به پنج دسته اصلی تقسیم می‌شوند: پلیمرها، سورفکتانت‌ها، میکروحباب‌ها، پوشش‌های سطحی انعطاف‌پذیر و الیاف. استفاده از این مواد باعث کاهش مصرف انرژی پمپاژ و افزایش ظرفیت سیستم لوله کشی می‌شود. این کاهش انرژی به دلیل کاهش درگ سطحی سیال در سیستم پمپاژ و در نتیجه کاهش افت فشار اصطکاک حاصل می‌شود. [7]

دو دسته اصلی از نظریه‌ها وجود دارد که به روشن شدن پدیده کاهش اصطکاک بر اساس تأثیرات پلیمرها کمک می‌کنند. برخی از توضیحات در این زمینه توسط جوزف و همکاران، دُجنس و لاملی ارائه گردید. جوزف و همکاران و دُجنس خواص الاستیک پلیمرها را علت کاهش درگ پیشنهاد کرده‌اند. محلول پلیمری حتی در حالت بسیار رقیق نیز می‌تواند به عنوان یک سیال ویسکوالاستیک در نظر گرفته شود. در واقع، به دلیل قابلیت پلیمرها در ذخیره انرژی الاستیک، امواج برشی می‌توانند منتشر شوند. این امواج برشی دارای یک حد قطع طبیعی هستند که با افزایش فرکانس نوسان می‌کنند و در نتیجه گردابه‌های کوچک را از بین می‌برند و احتمالاً منجر به کاهش درگ می‌شوند. این مکانیسم توسط لاملی با در نظر گرفتن کشیدگی مولکول‌های پلیمری مارپیچ پیشنهاد شده است. با کشیدگی پلیمرهای مارپیچ، ویسکوزیته مؤثر در نزدیکی دیواره افزایش می‌یابد و در نتیجه با کاهش گردابه‌های کوچک و ضخامت لایه زیرین ویسکوز، درگ کاهش می‌یابد. اما مشکل اصلی عملی مرتبط با پلیمرهای انعطاف‌پذیر، تخریب سریع بیولوژیکی، حرارتی، مکانیکی یا شیمیایی آن‌ها است که کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. امروزه، جایگزین‌های احتمالی برای پلیمرهای انعطاف‌پذیر ارائه شده است، از جمله پلیمرهای سخت، حباب‌ها، سورفکتانت‌ها، الیاف، و نانوذرات. [7]

تأثیر پارامترهای مختلف بر کاهش درگ پلیمری:

مطالعات متعددی در مورد تأثیر پارامترهای مختلف بر کاهش درگ انجام شده است. راعی و پیغمبرزاده مطالعه جامعی در مورد کاهش درگ انجام دادند. آن‌ها عملکرد سه ماکرومولکول زیستی مانند صمغ زانتان (XG)، کربوکی متیل سلولز (CMC)، صمغ گوار (GG) و سه ماکرومولکول مصنوعی مانند اسید پلی اکریلیک (PAA)، پلی اتیلن اکسید (PEO) و پلی اکریل آمید (PAM) را مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که همه درصد کاهش درگ (DR%) به جز GG با افزودن ماکرومولکول‌ها افزایش یافته است. با افزایش دبی جریان سیال، DR% تقریباً برای همه ماکرومولکول‌ها کاهش یافت. به گفته پیغمبرزاده و همکاران، با افزایش ویسکوزیته مؤثر با افزودن غلظت‌های بالاتر کربوکی متیل سلولز (CMC)، افت فشار به صورت غیرخطی نسبت به افزایش غلظت پلیمر کاهش یافت. [7]

اثر نانوفوتوکاتالیست‌های مغناطیسی عملکردی و لسیتین کاهش درگ در جریان آشفته سیال نیوتنی عبوری از لوله‌های افقی:

بر اساس قانون ویسکوزیته نیوتن، افزایش گرادیان سرعت می‌تواند تنش برشی، اصطکاک و مصرف انرژی را افزایش دهد. در نتیجه، باید راه حلی برای کاهش درگ آشفته ارائه شود. نیروی درگ در سطوح صاف و منحنی قابل توجه است. روش‌های کاهش درگ به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. استفاده از هر یک از روش‌ها به مسئله شرایط فیزیکی بستگی دارد. در روش‌های غیرفعال کاهش درگ، آشفتگی به صورت حلقه بسته کنترل نمی‌شود و در نتیجه بازخورد آن ارزیابی نمی‌شود. در این روش، آشفتگی با افزودن مواد کاهش دهنده درگ مانند زنجیره‌های پلیمری بلند، میکروحباب‌ها و ساختارهای ریپلیت مانند-

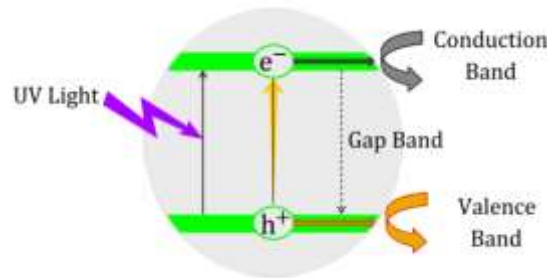
(ribblet-like structures) {در واقع برجستگی‌های بسیار ریز و موازی هستند که روی سطح یک جسم جامد قرار می‌گیرند. این برجستگی‌ها معمولاً به صورت خطوط یا شیارهای موازی و با ابعاد بسیار کوچک (در مقیاس میکرو یا نانو) ساخته می‌شوند.} و همچنین ایجاد پوشش‌های ترکیبی هم جهت کنترل می‌شود. با این حال، کنترل در روش فعال از طریق بازخورد در حلقه بسته انجام می‌شود. بر اساس این رویکرد، می‌توان از یک دیوار هوشمند با سنسور و محرک در فعالیت‌های آزمایشگاهی استفاده کرد. در اینجا، با نزدیک شدن گردابه‌های جریان آشفته به دیوار، سنسورها آن را تشخیص

داده و محرک‌ها را فعال می‌کنند. محرک‌ها با توجه به نوع گردابه، دیوار را حرکت می‌دهند تا آن‌ها را حذف یا ضعیف کنند. بنابراین، جریان آشفته نزدیک به دیوار آرام می‌شود و منجر به کاهش درگ می‌شود. مکش یا دهش در سطح یکی از روش‌های فعال در نظر گرفته می‌شود. [8]

تزریق نانوفلوئید به عنوان روشی غیرفعال استفاده شده است که راهکاری مهم، سریع و اقتصادی برای کاهش افت فشار در خطوط لوله انتقال سیال است. نانوفلوئید از نانوذرات و سورفکتانت تشکیل شده است که به ترتیب با تأثیر بر خواص شبه تریبولوژیکی و رئولوژیکی سطح و سیال، نیروی درگ را کاهش می‌دهند. بر این اساس، کاهش درگ از طریق دو مکانیسم انجام می‌شود: روانکاری مرزی (کاهش کشش سطحی بین سیال و دیواره لوله) و روانکاری سیال (کاهش ویسکوزیته سیال). در مکانیسم اول، از ذراتی استفاده می‌شود که مقاومت ناچیزی در برابر نیروهای برشی دارند و می‌توانند لایه بسیار نازکی بین دو لایه اصطکاکی ایجاد کنند و آن‌ها را از هم جدا کنند. در این راستا، از نانوذرات فوق آب دوست یا فوق آب گریز برای پوشش سطح داخلی لوله استفاده می‌شود. تر شوندگی سطوح معمولاً با کمی کردن زاویه تماس بین قطره و سطح جامد تعیین می‌شود. سطوح فوق آب گریز و قطره زاویه تماس بزرگتر از ۱۵۰ درجه و زاویه لغزش کوچکتر از ۱۰ درجه ایجاد می‌کنند. حالت انرژی سطحی پایین و انطباق با الگوی زبری خاص در ابعاد میکرو و نانو برای فوق آب گریزی ضروری است. زاویه تماس سطح فوق آب دوست کمتر از ۳۰ درجه است. خاصیت فوق آب دوستی که به عنوان زاویه تماس بین قطره و سطح تعریف می‌شود، به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و قطره کاملاً روی سطح پخش می‌شود. این بدان معنا نیست که قطرات به سرعت سطح را جذب می‌کنند. در مکانیسم دوم، یک عامل روان کننده (سورفکتانت) بین لایه‌های متحرک سیال قرار می‌گیرد که منجر به کاهش کشش سطحی و روانکاری سیال می‌شود. [8]

نانوذرات مغناطیسی:

نانوذرات مغناطیسی TiO_2 عملکردی شده با سیستئین و لسیتین به ترتیب به عنوان روانکار مرزی و سورفکتانت استفاده شدند. نانوذرات مغناطیسی TiO_2 عملکردی شده به عنوان یک نانوساختار هسته-پوسته با خاصیت مغناطیسی در نظر گرفته می‌شوند. به عنوان یک مزیت برای فرآورده‌ها، پس از انتقال سیال که وجود ذرات در سیال ممکن است فرآیند را مختل کند یا به تجهیزات آسیب برساند، این نانوذرات به راحتی با یک آهنربای خارجی جمع آوری می‌شوند. همچنین، وجود گروه‌های عاملی بر روی سطح نانوذرات باعث می‌شود نانوذرات به لیگاندهای فعال (Active Ligands) [مولکول‌هایی هستند که به طور فعال با مولکول‌های هدف خاصی (مانند پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک یا گیرنده‌ها) در یک سیستم بیولوژیکی تعامل می‌کنند. این تعامل معمولاً منجر به تغییراتی در عملکرد یا ساختار مولکول هدف می‌شود و در نتیجه، فرآورده‌های بیولوژیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.] در pH مناسب تبدیل شوند و به دلیل جاذبه الکترواستاتیک ضعیف در سطح داخلی لوله قرار گیرند. علاوه بر این، TiO_2 یک فوتوکاتالیست نیمه هادی با یک باند ظرفیت (پر از الکترون) و یک باند هدایت (خالی از الکترون) است و بین آنها یک شکاف انرژی وجود دارد. تحت تابش UV، الکترونی از باند ظرفیت به باند هدایت منتقل می‌شود که زمان کوتاهی طول می‌کشد و سپس الکترون از سطح انرژی بالاتر (باند هدایت) به سطح انرژی پایین تر (باند ظرفیت) باز می‌گردد. (شکل ۶) این فرآیند اکسیداسیون-کاهش در ابتدا انرژی لازم برای تشکیل لایه ای از لیگاند کامپوزیتی ذکر شده را فراهم می‌کند و ثانیاً، نانوذراتی که به ساختار فوق آب دوست تغییر می‌کنند به دلیل خیس شدن کامل سطح از تشکیل لایه اصطکاک جلوگیری می‌کنند. [8]



(شکل ۶ - فرآیند اکسیداسیون فوتوکاتالیستی)

بررسی گرادیان فشار و توقف ناگهانی (Holdup) جریان روغن-آب مهم‌ترین پارامترها در طراحی چاه‌های جهت‌دار یا خطوط لوله:

طراحی مناسب به شدت به پیش‌بینی دقیق این دو پارامتر بستگی دارد. دو رویکرد مدل‌سازی مانند مدل‌های مکانیکی و تجربی می‌توانند این پارامترها، به ویژه گرادیان‌های فشار را به طور قابل اعتمادی پیش‌بینی کنند. مدل‌های مکانیکی به عنوان مدل دو سیال طبقه‌بندی می‌شوند که برای پیش‌بینی گرادیان‌های فشار جریان روغن-آب جدا شده استفاده می‌شود و مدل همگن که برای پیش‌بینی گرادیان‌های فشار جریان پراکنده روغن-آب استفاده می‌شود. از سوی دیگر، مدل‌های تجربی یا همبستگی‌ها معمولاً از داده‌های تجربی موجود توسعه می‌یابند. [9]

مدل‌های مکانیکی اصلاح‌شده بیشتر توسط محققان برای پیش‌بینی گرادیان‌های فشار جریان روغن-آب نسبت به رابطه‌های تجربی استفاده می‌شوند. با این حال، چالش اصلی در استفاده از مدل دو سیال، تعیین شکل صحیح رابط بین روغن و آب است. در مدل دو سیال معمولی، رابط جداکننده دو فاز جریان جدا شده اغلب فرض می‌شود که صفحه‌ای است اما مشاهدات گسترده و دقیق رفتار رابط تأیید می‌کند که شکل رابط در جریان جدا شده معمولاً مسطح نیست. شکل رابط می‌تواند بسته به عواملی مانند خواص فیزیکی سیالات، ترشوندگی سیال-دیواره، هندسه لوله (یعنی قطر و زاویه شیب) و هولدآپ (توقف ناگهانی) هر فاز، به یک پیکربندی صفحه یا قمری نزدیک شود. خواص ترشوندگی دیواره مایعات و کشش سطحی به ویژه در تعیین الگوی جریان جریان روغن-آب به دلیل اختلاف چگالی نسبتاً کم بین دو سیال که اثر گرانش را تضعیف می‌کند، مهم هستند. برای مدل همگن، چالش این است که رابطه ویسکوزیته مخلوط مناسب را بدانیم که به دانش نقطه وارونگی فاز بستگی دارد، برای یک سیستم جریان روغن-آب خاص استفاده شود. [9]

پیش‌بینی‌های اولیه گرادیان‌های فشار با استفاده از روابط تجربی بر روی جریان‌های گاز-مایع انجام شد. گارسیا و همکاران همچنین روابط ضریب اصطکاک قانون توان مرکب (friction factor composite power law) را برای جریان گاز-مایع در لوله‌های افقی برای هر الگوی جریان و الگوهای جریان ترکیبی توسعه دادند. آنها از ۲۴۳۵ داده تجربی در خطوط لوله افقی استفاده کردند که از منابع مختلف، از جمله داده‌های جدید برای نفت سنگین، گرفته شده بود. گرادیان‌های فشار پیش‌بینی شده توسط روابط با داده‌هایی که روابط از آنها توسعه یافته بودند و با داده‌های به دست آمده از بسیاری از روابط گزارش شده در متن مقایسه شد. همچنین، آنها یک مقایسه عملکرد جامع بین مدل‌ها و روابط مختلف با استفاده از فاکتور عملکرد نسبی اصلاح شده (PF) پیشنهادی خود انجام دادند که یک معیار آماری است که به رتبه‌بندی مدل‌ها و روابط از نظر دقت اجازه می‌دهد. روابط توسعه‌یافته بهترین عملکرد را در بین همه روابط دیگر که با آن مقایسه شده بود، داشتند. [9]

کارهای بسیار کمی وجود دارد که در آنها از روابط تجربی برای پیش‌بینی گرادیان‌های فشار جریان روغن-آب استفاده شده است. یکی از این کارها توسط الوهیبی انجام شده است. او با استفاده از ضرایب اصطکاک فانیگ به دست آمده از

داده‌های گرادیان فشار برای جریان جدا شده روغن-آب (لایه لایه، دو پیوسته و حلقوی) در لوله‌های اکریلیک و فولادی افقی به یک همبستگی گرادیان فشار قانون توان دست یافت. [9]

لازم به تأکید است که همه مدل‌ها و روابط مذکور از جریان‌های دو فاز دو فازی بدون کاهش دهنده درگ پلیمری (DRP) توسعه یافته‌اند. تنها کاری که یافت شد و روابط تجربی را برای جریان‌های دو فاز افقی با DRP توسعه داد، توسط ابوبکر و الوهیبی انجام شد. اگرچه آنها روابط قانون توان را برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک جریان‌های گاز-مایع و روغن-آب در حداکثر کاهش درگ توسط DRP ها توسعه دادند، داده‌های استفاده شده برای روابط بسیار محدود بود، به ویژه داده‌های جریان روغن-آب. همچنین، آنها فقط گرادیان‌های فشار به دست آمده از ضرایب اصطکاک پیش‌بینی شده را با گرادیان‌های فشار تجربی که روابط از آن توسعه یافته بودند، مقایسه کردند. [9]

اثرات پلیمرهای کاهش دهنده درگ بر الگوهای جریان، گرادیان‌های فشار و نرخ‌های کاهش درگ جریان‌های افقی نفت-آب:

پلیمرهای کاهش دهنده درگ (DRPs) پلیمرهای زنجیره بلند با وزن مولکولی بالا مانند پلی متیل متاکریلات (PMMA)، پلی اتیلن اکسید (PEO) و پلی ایزوبوتیلن (PIB) هستند. افزودن پلیمرهای کاهش دهنده درگ به جریان آشفته می‌تواند درگ آشفته را به طور قابل توجهی کاهش دهد و به نرخ کاهش درگ بیش از ۸۰ درصد برسد. با توجه به افزایش سختگیرانه الزامات حفاظت از محیط زیست، کاهش مصرف انرژی در حمل و نقل خط لوله برای مهندسی نفت، مهندسی شیمی و مهندسی دریا مهم است. [10]

پلیمرهای انعطاف‌پذیر زنجیره بلند می‌توانند توزیع پروفیل سرعت میانگین و برش در لایه مرزی را تغییر دهند. DRP ها ماهیت و شدت گردابه‌ها را اصلاح می‌کنند که منجر به توزیع مجدد قابل توجه ساختار نزدیک به دیوار لایه مرزی آشفته می‌شود. اثرات پلیمرهای کاهش دهنده درگ مربوط به آشفتگی نزدیک به دیوار و دینامیک محلول‌های پلیمری رقیق است که در ۷۰ سال گذشته توجه زیادی را به خود جلب کرده است. [10]

ویسکوزیته‌های کششی ($\mu(\text{extensional})$) محلول‌های پلیمری ویسکوالاستیک رقیق می‌تواند بسیار بیشتر از ویسکوزیته برشی ($\mu(\text{shear viscosity})$) باشد. در ناحیه نزدیک به دیوار، حرکات کششی گذرا اما قوی به طور مداوم در حال تولید هستند. DRP ها در آن نقاط کششی شدید به صورت محلی تراز شده و بسیار کشیده می‌شوند. زنجیره‌های کشیده DRP ها نیروهای با جذب قوی ایجاد می‌کنند که در برابر حرکت جریان کششی مقاومت می‌کنند و منجر به سرکوب دینامیک گردابه می‌شوند. در مکانیسم ویسکوز، شروع کاهش درگ به یک عدد وایسنبرگ بحرانی (Wi) مرتبط است اما به غلظت DRP برای محلول‌های رقیق مرتبط نیست زیرا در محلول‌های رقیق، انتقال C-S هر زنجیره DRP تحت تأثیر حالت و حضور زنجیره‌های دیگر قرار نمی‌گیرد. برای یک Re داده شده، یک مقدار بحرانی از Wi وجود دارد. اگر Wi بزرگ‌تر از مقدار بحرانی آن باشد، انتظار می‌رود کاهش درگ رخ دهد.

De Gennes و همکاران مدلی مبتنی بر خواص الاستیک محلول DRP پیشنهاد کردند. در مکانیسم الاستیک، فرض می‌شود که زنجیره‌های پلیمری تا حدی کشیده شده‌اند و تغییر شکل ذاتاً گذرا است. درجه تغییر شکل برای ایجاد افزایش قابل توجهی در ویسکوزیته کششی کافی نیست، اما انرژی الاستیک ذخیره شده در هر زنجیره DRP کشیده شده می‌تواند جمع شود. هنگامی که تنش الاستیک قابل مقایسه یا بزرگتر از تنش رینولدز شود، انتظار می‌رود کاهش درگ رخ دهد. در مقایسه با مکانیسم ویسکوز، وابستگی غلظت شروع کاهش درگ یک ویژگی متمایز مکانیسم الاستیک است. در مکانیسم ویسکوز، اثرات DRP ها آنی و منفرد است. کاهش درگ تا زمانی که انتقال C-S رخ دهد و مقدار Wi به مقدار بحرانی خود برسد، رخ خواهد داد. در مکانیسم الاستیک، اثرات DRP ها جمعی است. هنگامی که انرژی الاستیک از یک آستانه مشخص فراتر رود، انتظار می‌رود کاهش درگ رخ دهد. کاهش درگ به Wi و همچنین غلظت DRP بستگی دارد. [10]

De Gennes و همکاران مدلی مبتنی بر خواص الاستیک محلول DRP پیشنهاد کردند. در مکانیسم الاستیک، فرض می‌شود که زنجیره‌های پلیمری تا حدی کشیده شده‌اند و تغییر شکل ذاتاً گذرا است. درجه تغییر شکل برای ایجاد افزایش قابل توجهی در ویسکوزیته کششی کافی نیست، اما انرژی الاستیک ذخیره شده در هر زنجیره DRP کشیده شده می‌تواند جمع شود. هنگامی که تنش الاستیک قابل مقایسه یا بزرگتر از تنش رینولدز شود، انتظار می‌رود کاهش اصطکاک رخ دهد. در مقایسه با مکانیسم ویسکوز، وابستگی غلظت شروع کاهش اصطکاک یک ویژگی متمایز مکانیسم الاستیک است. در مکانیسم ویسکوز، اثرات DRP ها آنی و انفرادی است. کاهش اصطکاک تا زمانی که انتقال C-S رخ دهد و مقدار Wi به مقدار بحرانی خود برسد، رخ خواهد داد. در مکانیسم الاستیک، اثرات DRP ها جمعی است. هنگامی که انرژی الاستیک از یک آستانه مشخص فراتر رود، انتظار می‌رود کاهش اصطکاک رخ دهد. کاهش اصطکاک به Wi و همچنین غلظت DRP بستگی دارد. [10]

در (جدول ۳) که ضریب اصطکاک به عنوان یک پارامتر مهم در مدل گرادیان فشار است و مدل های تجربی ضرایب اصطکاک جریان های تک فازی و چند فازی را با DRP نشان می دهد: [10]

Friction factors for flows with DRPs

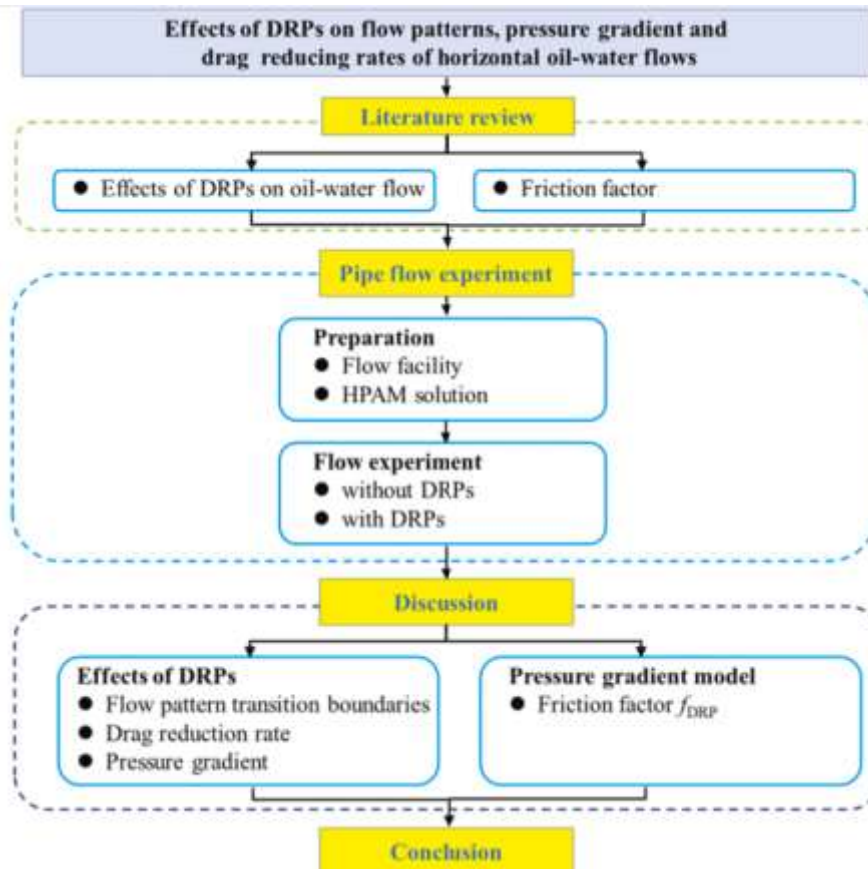
Authors	Friction factor equation	Scope of application
Al-Sarkhi and Hanratty (2001a)	$f_t = 0.0791 Re_t^{-0.25} Re_t = \frac{\rho_g Du_t}{\mu_g}$	Gas-liquid annular flow
Al-Wahaibi et al. (2007)	$f_w = m Re^{-n}$ Turbulent flow; $m = 0.046, n = 0.2$ Laminar flow; $m = 16, n = 1$	ST in liquid-liquid flow
Al-Sarkhi et al. (2011)	$f_{DRP} = 3.36 \times 10^{-7} \frac{D_0}{D} (Re_m (u_{lg}/u_{ld})^{0.5})^{0.599}$	Gas-liquid flow
Al-Sarkhi et al. (2011)	$f_{DRP} = 0.614 (Re_m (u_{lw}/u_{wm})^{0.5})^{-0.5}$	Liquid-liquid flow
Karami and Mowla (2013)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left(\frac{4}{n^{0.75}} + \xi \right) \log [Re_f^{(1-n/2)}] - \left(\frac{0.4}{n^{1.2}} \right) - 2.1 \xi$	Crude oil flow, non-Newtonian fluid flow
Abubakar et al. (2014)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{Re \sqrt{f}}{16}$ Laminar flow $\frac{1}{\sqrt{f}} = 4 \log_{10} Re \sqrt{f} - 0.4$ Turbulent flow	Single-phase flow
Deka et al. (2014)	$f = (21.011 - 2.032 C_1) \left(\frac{\rho_g}{\rho_m} \right) \left(\frac{u_m}{u_{lm}} \right)^2 \frac{Re_m^{0.0013 C_1 - 1.2172}}{Re_m^{0.0057 C_1 - 0.19227}}$	$0.254 \times 10^4 < Re_m < 2.54 \times 10^4$, $0.021 \times 10^2 < Re_m < 2.76 \times 10^2$
Edomwonyi-Otu et al. (2015)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4.0 \log_{10} Re \sqrt{f} - 0.4$	Oil-water two-phase flow, Newtonian fluid
Edomwonyi-Otu et al. (2015)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 19.0 \log_{10} Re \sqrt{f} - 32.4$	Flow pattern of maximum drag reduction rate of oil-water flow
Abubakar et al. (2016)	$f_m = 1.38353 Re_m^{-0.687}$	Oil-water flow

(جدول ۳ - ضریب اصطکاک برای جریان هایی با کاهش دهنده های درگ پلیمری)

اثرات کاهش دهنده های درگ پلیمری بر جریان چند فازی و روابط تجربی برای عوامل اصطکاک جریان تک فاز و جریان چند فازی با کاهش دهنده های درگ پلیمری به طور مداوم گزارش شده است، در حالی که ارزیابی راندمان کاهش درگ

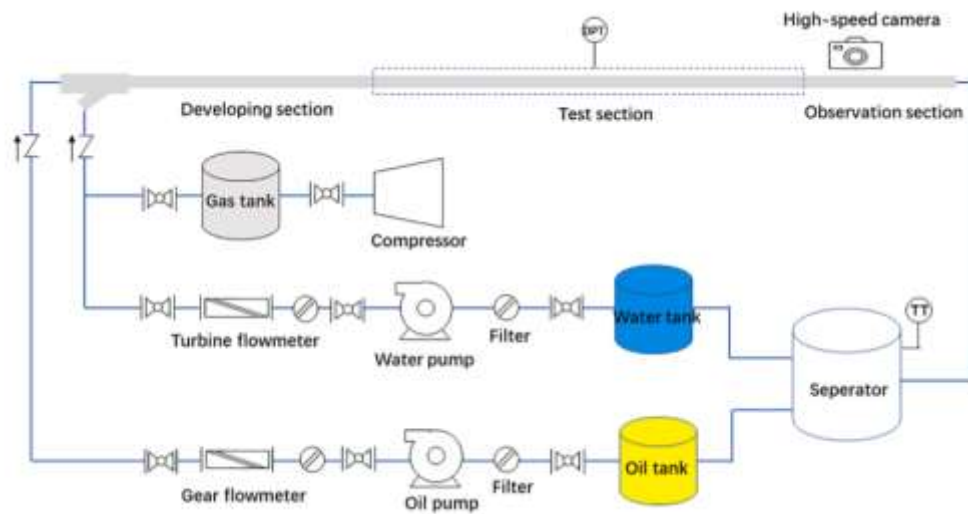
برای جریان نفت-آب با کاهش دهنده درگ پلیمری (DRPs) هنوز محدود است و نیاز به ادامه و تحقیق در این زمینه وجود دارد. [10]

با این حال تحقیقات برای رفع این مشکل، بر اساس جریان نفت-آب در یک لوله افقی، مطالعه حاضر ساختارهای الگوی جریان و مرزهای انتقال را قبل و بعد از افزودن DRPs مقایسه شده است، اثرات سرعت روغن و آب را بر گرادیان فشار و آنالیز کرده است. نمودار زیر (شکل ۷) جریان مطالعه در این زمینه را نشان داده شده است (نرخ کاهش درگ، و یک مدل تجربی با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک مخلوط برای پیش‌بینی گرادیان فشار جریان نفت-آب با DRPs): [10]



(شکل ۷ - فلوچارت این مطالعات)

(شکل ۸) به طور شماتیک فلودیگرام سیستم خط لوله را نشان می دهد که برای آن یک لوله اکریلیک با قطر ۲۵.۴ میلی متر و جریان حلقوی استفاده شد. مولد در ورودی به کار گرفته شد. در مولد جریان حلقوی، زاویه بین ورودی آب و ورودی روغن ۳۰ درجه بود. آب از حلقه بیرونی وارد می شود و روغن از هسته افقی وارد می شود در امتداد محور خط لوله طول خط لوله مستقیم ۷.۵ متر بود. $(L/D=300)$ ، شامل یک بخش در حال توسعه ۳.۲ متری در ورودی، یک ۲.۸ متری بخش آزمایش و یک بخش مشاهده ۱.۵ متری در پایان. بخش تست مجهز به مبدل فشار دیفرانسیل (DPT) می باشد. و با دوربین پر سرعت برای عکسبرداری و مشاهده ساختار الگوی جریان استفاده شد. [10]



(شکل ۸ - نمودار شماتیک از راه اندازی آزمایشی)



(شکل ۹ - مولد جریان حلقوی)

نتیجه گیری:

مطالعات گردآوری شده به صورت کلی بر اثربخشی و پیچیدگی روش های کاهش افت فشار (کاهش نیروی درگ) در سامانه های جریان، به ویژه در لوله ها، تأکید دارند. روش های افزودنی، به ویژه با استفاده از پلیمرهایی نظیر پلی آکریلونیتریل (PAN) یا پلیمرهای با وزن مولکولی بالا، کاهش قابل توجهی در افت فشار در برخی موارد تا ۸۰ درصد نشان داده اند که این امر آن ها را برای کاربردهای صنعتی مختلف بسیار مطلوب می سازد. عواملی نظیر غلظت پلیمر، دما و نرخ برشی تأثیر چشم گیری بر درصد کاهش درگ (DR%) دارند. ابزارهای آماری مانند روش تاگوچی و مدل سازی های تجربی و روابط توانی به منظور بهینه سازی و پیش بینی عملکرد سامانه به کار گرفته شده اند. همچنین، روش های مبتنی بر نانوذرات و بهینه سازی پارامترهایی مانند غلظت سورفکتانت و pH نیز مورد بررسی قرار گرفته اند که مسیرهای نوینی را برای کاهش مؤثر افت فشار از طریق بهبود ساختار گردابه ای و پایداری کلوئیدی نمایان می سازند.

در جریان های چندفازی نفت-آب، پلیمرهای کاهنده درگ (DRP) عمدتاً بر نواحی غالب آبی اثرگذار هستند که دلیل آن حلالیت بالای آن ها در آب است. نتایج مطالعات نشان می دهد که DRP ها الگوهای جریان را تغییر داده، برخی رژیم های جریان را گسترش داده و تفکیک فازی را تحت شرایط خاصی بهبود می بخشد، که منجر به کاهش افت فشار اصطکاکی می گردد. این اثرات در جریان های افقی بیشتر از جریان های مایل به پایین مشاهده شده اند، جایی که اختلاط بیشتر می تواند عملکرد DRP را کاهش دهد. تحلیل های انرژی نیز مزایای اقتصادی استفاده از DRP ها را با کاهش تلفات هد،

صرفه‌جویی در مصرف انرژی و افزایش دبی عبوری تأیید کرده‌اند. با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده، چالش‌هایی مانند تخریب پلیمر، نتایج ناپایدار تحت شرایط جریان‌ی مختلف، و نبود یک مکانیزم جهانی پذیرفته‌شده برای کاهش درگ همچنان پابرجا هستند. از این رو، پژوهش‌های آینده باید بر ادغام روش‌های مختلف و تعمیق درک دینامیک جریان‌های آشفته تمرکز نمایند تا فناوری‌های کاهش درگ را در طیف وسیعی از کاربردها ارتقاء دهند.

با توجه به اینکه ایران یک کشور نفت خیز بوده و اقتصاد آن بیشتر مبتنی بر صنعت نفت می‌باشد. لذا تحقیقات کلی متخصصان صنعت نفت راجع به نیازها و ضرورت استفاده از کاهش دهنده‌های درگ به شرح زیر می‌باشد:

۱- بسیاری از میادین نفتی ایران نفت خام سنگین و با ویسکوزیته بالا تولید می‌کنند که مقاومت جریان را افزایش می‌دهد. تحقیقات در مورد عوامل کاهش دهنده درگ پیشرفته (DRA) که برای چنین شرایطی طراحی شده‌اند محدود است.

۲- زیرساخت‌های قدیمی منجر به زبری و خوردگی داخلی می‌شود و به طور قابل توجهی درگ را افزایش می‌دهد. راه حل‌های نوآورانه، مانند پوشش‌ها یا درمان‌های درون خطی، باید مورد بررسی قرار گیرند.

۳- بسیاری از DRA های سنتی مبتنی بر مواد شیمیایی هستند و ممکن است خطرات زیست محیطی ایجاد کنند. توسعه DRA های سازگار با محیط زیست و زیست تخریب پذیر که با مقررات بین‌المللی مطابقت داشته باشند یک نیاز مبرم است.

۴- با توجه به اقلیم و شرایط آب و هوایی ایران، خطوط لوله اغلب از مناطق بیابانی و کوهستانی عبور می‌کنند و آنها را در معرض تغییرات شدید دما قرار می‌دهند. تأثیر این شرایط بر اثربخشی DRA ها و عملکرد خط لوله نیاز به مطالعه عمیق‌تری دارد.

۵- خطوط لوله اغلب مخلوطی از نفت، آب و گاز را حمل انتقال می‌دهند که منجر به دینامیک جریان پیچیده و رفتار درگ می‌شود. تحقیقات در مورد استراتژی‌های بهینه کاهش درگ برای جریان‌های چند فازي هنوز در مراحل اولیه است.

۶- در حالی که تحقیقات در مقیاس آزمایشگاهی در مورد کاهش درگ نتایج امیدوارکننده‌ای را نشان می‌دهد، مقیاس‌بندی این راه‌حل‌ها برای شبکه‌های خط لوله بزرگ و واقعی یک چالش مهم باقی مانده است. پرداختن به این معضل‌ها و شکاف‌ها می‌تواند به انتقال نفت کارآمدتر، کاهش مصرف انرژی و افزایش پایداری عملیاتی منجر شود.

منابع:

1. Asidin, M.A., et al., *Review on the applications and developments of drag reducing polymer in turbulent pipe flow*. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019. 27(8): p. 1921-1932.
2. Varnaseri, M. and S.M. Peyghambarzadeh, *The effect of polyacrylamide drag reducing agent on friction factor and heat transfer coefficient in laminar, transition and turbulent flow regimes in circular pipes with different diameters*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020. 154: p. 119815.
3. Al-Wahaibi, T., et al., *Energy analysis of oil-water flow with drag-reducing polymer in different pipe inclinations and diameters*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017. 149: p. 315-321.

4. Abubakar, A., et al., *Influence of drag-reducing polymer on flow patterns, drag reduction and slip velocity ratio of oil–water flow in horizontal pipe*. International Journal of Multiphase Flow, 2015. **73**: p. 1-10.
5. Quan, Q., et al., *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, 2019. **178**: p. 852-856.
6. Abubakar, A., et al., *Performance of a drag-reducing polymer in horizontal and downward-inclined oil–water flow*. Chemical Engineering Research and Design, 2015. **104**: p. 237-246.
7. Raei, B., *The effect of polymeric drag reducing agent on pressure drop reduction in circular pipes: Experimental and statistical investigation*. Journal of the Indian Chemical Society, 2023. **100**(3): p. 100905.
8. Esfandiari, N., R. Zareinezhad, and Z. Habibi, *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, 2020. **28**(1): p. 63-75.
9. Abubakar, A., et al., *Empirical correlation for predicting pressure gradients of oil–water flow with drag-reducing polymer*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016. **79**: p. 275-282.
10. Tan, J., et al., *Effects of drag-reducing polymers on the flow patterns, pressure gradients, and drag-reducing rates of horizontal oil–water flows*. International Journal of Multiphase Flow, 2022. **153**: p. 104136.
11. Alsarkhi, A. and M. Salah, *Multiphase Flow Production Enhancement Using Drag Reducing Polymers*. Polymers, 2023. **15**(5): p. 1108.