مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٩) العدد (١٣) ٢٠٢٥
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (9) No. (13) 2025

دراسة مقارنة لأثر العوامل الهيدروديناميكية على فقدان الضغط في أنابيب النفط الثقيل– تحليل الجريان الرقائقي في الأنابيب الأفقية والمائلة بزاوية "٣٠ درجة"

د. حسن علي وسوف*

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/٨/٣١ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٥/١٠/٢٨)

□ ملخّص □

تقدم هذه الدراسة تحليلاً مقارناً شاملاً لأداء أنابيب النفط الثقيل تحت ظروف الجريان الرقائقي، مع التركيز على الفروقات الجوهرية بين الأنابيب الأفقية والأنابيب المائلة بزاوية (٣٠ درجة) صاعد. استخدم البحث نموذجاً رياضياً قائماً على معادلة هاجن–بوازوي مع تعديلات تأثير الجاذبية، وتم تنفيذ المحاكاة باستخدام .(MATLAB 2014) بينت النتائج أن زاوية الميل تمثل العامل الأكثر تأثيراً على فقدان الضغط، حيث سجلت الأنابيب المائلة فقدان ضغط أعلى بـ (١٢ ضعفاً) مقارنة بالأنابيب الأفقية، مما يستدعي اعتبارات تصميمية مختلفة لكل حالة.

زاوية الميل هي العامل الأكثر تأثيراً على فقدان الضغط الكلي في الأنابيب المائلة، حيث مثلت مساهمة الجاذبية (99.2%) من الإجمالي، والجريان الرقائقي يظل مسيطراً في كلا النوعين عند السرعات المنخفضة إلى المتوسطة(Re<2300) . في كلا النوعين، القطر له تأثير هائل على فقدان الضغط($\Delta p \propto {}^{1}/_{D^4}$) ، وزيادة القطر تقلل فقدان الضغط بشكل كبير.

الكلمات المفتاحية: نقل النفط الثقيل، جريان رقائقي، أنابيب مائلة، فقدان الضغط، نمذجةMATLAB ، ، معادلة هاجن–بوازوي.

*أستاذ مساعد في كلية الهندسة التقنية في جامعة طرطوس

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٩) العدد (١٣) ٢٠٢٥
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (9) No. (13) 2025

Comparative Study of Hydrodynamic Factors Affecting Heavy Oil Pipeline Performance - Analysis of Laminar Flow in Horizontal and (30-Degree) Inclined Pipelines

Hassan Ali Wassof*

(Received 31/8/2025 . Accepted 28/10/2025)

□ ABSTRACT □

This study presents a comprehensive comparative analysis of heavy oil pipeline performance under laminar flow conditions, focusing on the fundamental differences between horizontal pipelines and inclined pipelines at a 30-degree upward angle. The research employed a mathematical model based on the Hagen-Poiseuille equation with gravity effect modifications, and simulations were conducted using MATLAB 2014. Results demonstrated that the inclination angle represents the most influential factor on pressure loss, with inclined pipelines recording a pressure loss 12 times higher than horizontal pipelines, necessitating different design considerations for each case.

The inclination angle is the most dominant factor affecting total pressure loss in inclined pipelines, with gravity contribution accounting for 99.2% of the total pressure loss. Laminar flow remains dominant in both pipeline types at low to medium velocities ($Re < 2300$). In both pipeline types, diameter has a tremendous impact on pressure loss ($\Delta p \propto 1/D^4$), and increasing diameter significantly reduces pressure loss.

Keywords: Heavy Oil Transportation, Laminar Flow, Inclined Pipelines, Pressure Loss, MATLAB Modeling, Hagen-Poiseuille Equation.

*Assistant Professor at the Faculty of Technical Engineering at Tartous University

1. المقدمة

تُشكل خطوط الأنابيب شريان الحياة لصناعة النفط العالمية، حيث تجمع بين الكفاءة الاقتصادية والأمان التشغيلي والاستدامة البيئية. على الرغم من التحديات التقنية والمالية، تبقى هذه الشبكات الاستثمار الأكثر جدوى لنقل الطاقة على المدى الطويل، مما يجعلها ركيزة أساسية في تحقيق الأمن الطاقي العالمي.(Trench, C. J. 2001)).

يُمثل نقل النفط عبر خطوط الأنابيب العمود الفقري لصناعة الطاقة العالمية، حيث يُعد الوسيلة الأكثر كفاءةً وأماناً لنقل النفط الخام ومنتجاته لمسافات طويلة. تبرز الأهمية الإستراتيجية لهذه الشبكات في تحقيق الاستقرار الاقتصادي والأمن الطاقي للدول.((EIA (2020).

من الناحية الاقتصادية، فان تكلفة نقل النفط عبر الأنابيب تقل بنسبة(٦٠%-٤٠) مقارنة بالنقل البري بالشاحنات، والقدرة على نقل كميات كبيرة مستمرة على مدار ٢٤ ساعة، وتكون ذو كفاءة عالية، أي فقدان أقل من(٠,٥%) مقارنة بـ(٣%-٢) في وسائل النقل الأخرى.(الكتبي، ٢٠١٨).

من الناحية التشغيلية فإنه يحقق استمرارية الإمداد، أي تدفق مستمر دون انقطاع بغض النظر عن الظروف الجوية، وتكون السعة التخزينية مناسبة،أي تعمل بعض الخطوط كخزانات طبيعية بسعات كبيرة. وتكون هناك المرونة التشغيلية، أي إمكانية نقل أنواع مختلفة من المنتجات النفطية بالتتابع.(الشمراني،٢٠٢٠).

من الناحية البيئية، فإنه يحقق أقل وسائل النقل تلوثاً للبيئة بنسبة انسكاب (٠,٠٠٠١%) فقط، ويخفف حركة النقل البري على الطرقات، **و** حماية إمدادات النفط من المخاطر الأمنية.((API (2019).

تأتي الأهمية الإستراتيجية من خلال التكامل الإقليمي، أي ربط مناطق الإنتاج بمراكز التكرير والتوزيع، وتنمية المناطق النائية، أي تمكين استغلال الحقول البعيدة اقتصاديا، **و** تعزيز التعاون الإقليمي والدولي عبر مشاريع الأنابيب المشتركة.((IEA (2021).

تتضمن التحديات والحدود لنقل النفط من خلال(الغامدي،٢٠١٥):

١) التكلفة الأولية العالية : استثمارات مالية كبيرة في البنية التحتية.
٢) الصعوبات الفنية : تعقيدات هندسية في المناطق ذات التضاريس الصعبة.
٣) الاعتبارات البيئية : ضرورة تقييم الأثر البيئي والشروط التنظيمية الصارمة.

٢. مشكلة البحث

تتمثل المشكلة البحثية في الافتقار إلى دراسات مقارنة منهجية تحلل تأثير العوامل الهيدروديناميكية (مثل اللزوجة، القطر، السرعة، وزاوية الميل) على أداء أنابيب النفط الثقيل تحت ظروف الجريان الرقائقي المثالي، خاصة عند مقارنة الأنابيب الأفقية بالأنابيب المائلة بزاوية (٣٠ درجة). هذا النقص في المعرفة يؤدي إلى تصميم غير أمثل لأنظمة النقل، واستهلاك غير كفء للطاقة، وزيادة التكاليف التشغيلية، مما يستدعي تطوير نموذج رياضي دقيق قادر على محاكاة هذه الظروف وتحسين عملية اتخاذ القرار في التصميم الهندسي.

٣. أهمية البحث وأهدافه

١. **أهمية تطبيقية عملية** :يقدم تحليلاً كمياً دقيقاً لسلوك الجريان الرقائقي في أنابيب النفط، مما يمكّن مهندسي التصميم من تحسين كفاءة أنظمة النقل وتقليل تكاليف التشغيل.

٢. **توفير الطاقة** :تحديد العوامل المؤثرة على فقدان الضغط يساهم في تخفيض استهلاك الطاقة في المضخات، مما ينعكس إيجاباً على الجوانب الاقتصادية والبيئية.

٣. **تطوير نماذج تنبؤية** :يقدم نموذجاً رياضياً يمكن الاعتماد عليه للتنبؤ بأداء الأنابيب تحت ظروف تشغيل مختلفة، مما يساعد في المشاريع المستقبلية.

٤. **معالجة تحديات النفط الثقيل** : يركز على نقل النفط الثقيل الذي يشكل تحدياً تقنياً due) (toلزوجته العالية، مما يسهم في تطوير حلول مبتكرة لهذه المشكلة.

٥. **تكمين الدراسات السابقة** : يملأ فراغاً في الأدبيات العلمية من خلال المقارنة المنهجية بين الأنابيب الأفقية والمائلة، وهو جانب محدود التغطية في الدراسات السابقة المذكورة اعلاه.

يهدف البحث بشكل عام الى نمذجة وتحليل الجريان الرقائقي في أنابيب النفط الأفقية والمائلة بزاوية (٣٠ درجة) لتحديد الفروقات في أدائها الهيدروديناميكي.

أما **الأهداف الفرعية:**

١. تحديد تأثير العوامل الهيدروديناميكية (اللزوجة، القطر، السرعة) على فقدان الضغط في كلا النوعين من الأنابيب.

٢. حساب ومقارنة استطاعة المضخة المطلوبة للتغلب على فقدان الضغط في كل حالة.

٣. تطوير نموذج رياضي باستخدام (MATLAB 2014) لمحاكاة سلوك الجريان تحت ظروف تشغيل مختلفة.

٤. تقديم توصيات عملية لمهندسي التصميم لتحسين كفاءة أنظمة نقل النفط.

٤. فرضيات البحث

١. تسبب الأنابيب المائلة بزاوية (٣٠ درجة) فقدان ضغط أعلى بكثير مقارنة بالأنابيب الأفقية (due to)بتأثير الجاذبية.

٢. يكون فقدان الضغط في الأنابيب الأفقية (dominated) بالاحتكاك، بينما في المائلة (dominated) بالجاذبية.

٣. تزيد حساسية النظام لتغير اللزوجة في الأنابيب الأفقية المائلة.

٤. يمكن تطوير نموذج (MATLAB) دقيق للتنبؤ بالأداء تحت ظروف مختلفة.

٥. الدراسة النظرية والتحليلية

- **الجريان الرقائقي** :جريان طبقي منتظم تكون فيه قوى اللزوجة مسيطرة على قوى القصور الذاتي.
- **معيار الاختلاف(التمييز)** :عدد رينولدز أقل من ٢٣٠٠.
- **المعادلة الحاكمة** : معادلة هاجن–بوازوي(Hagen-Poiseuille) (Nersesian,2010).

تم استخدام المعادلات الرياضية في نمذجة فقدان الضغط التالية:(OGJ (2021),Mokhatab,2012):

فقدان الضغط الاحتكاك(due to):

$$\Delta p_{friction} = {128\,\mu LQ}\Big/{\pi D^4} \qquad (1)$$

فقدان الضغط للأنابيب المائلة:

$$\Delta P_{gravity} = \rho g L \sin(\theta) \qquad (2)$$

فقدان الضغط الكلي:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{friction} + \Delta P_{gravity} \qquad (3)$$

استطاعة المضخة:

$$P_{pump} = \Delta P_{total} \cdot Q \qquad (4)$$

حيث أن:

اللزوجة (μ): تزيد فقدان الضغط بشكل خطي(pa.s).

القطر (D): يتناسب فقدان الضغط عكسياً مع القطر (m).

السرعة (v): تزيد فقدان الضغط بشكل خطي(m/s).

زاوية الميل (θ): تزيد فقدان الضغط بشكل كبير (حتى ١٢ ضعفاً).

٦. طرائق البحث ومواده:

١. برنامج ماتلاب للنمذجة (MATLAB-2014) موجود على حاسب ذو معالج عالي السرعة، حيث تم تصميم كود برمجي مرن ممكن تعديله وفق المعطيات المطلوبة.

٢. مواصفات أنابيب النفط وأقطارها والمادة المصنعة منها: فولاذ كربوني(AISI 1020) بسماكة: (6-12 mm).

٣. مواصفات النفط المنقول:

١) الكثافة: kg/m^2 980-1020.

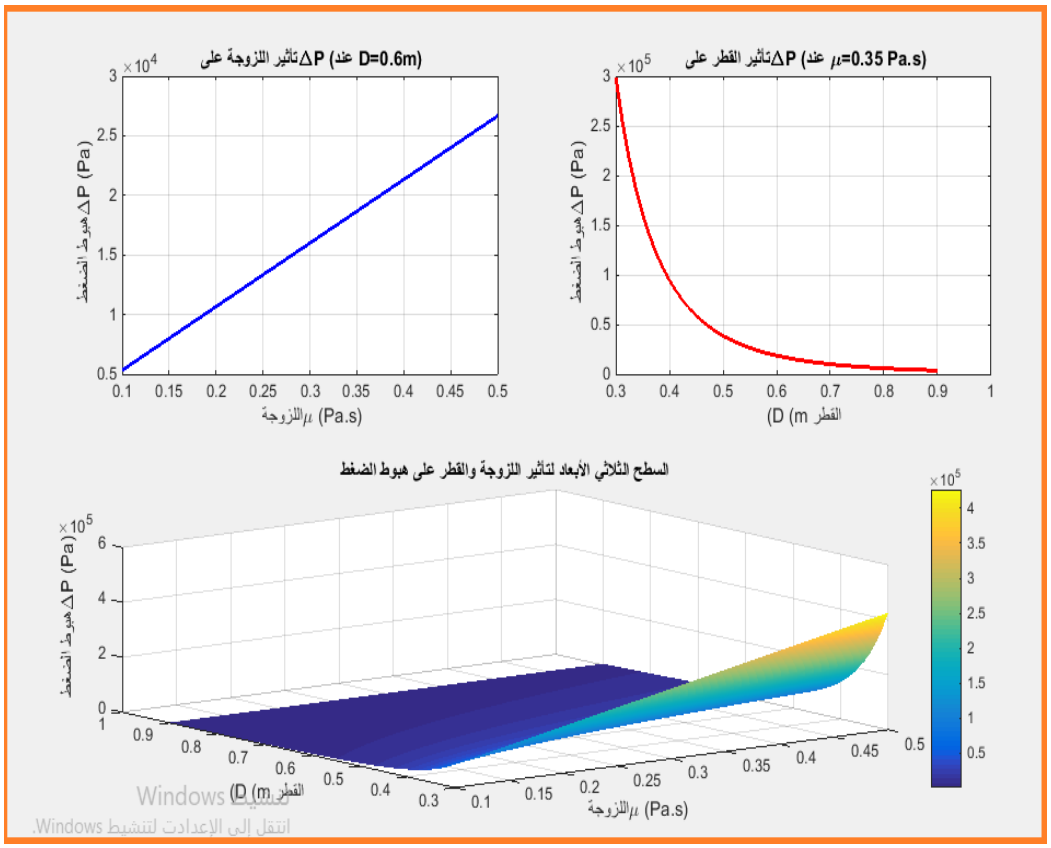
٢) اللزوجة الديناميكية: pa.s 0.85-1.2.

٣) API<22.(مواصفات النفط).

٧. النتائج والمناقشة

١,٧. تأثير اللزوجة والقطر على فقدان الضغط للانبوب الافقي:

يبين الشكل(١)، العلاقة بين قطر انبوب نقل النفط ولزوجته على فقد الضغط للانبوب الأفقي:



الشكل(١)، العلاقة بين قطر انبوب نقل النفط ولزوجته على فقد الضغط للانبوب الأفقي

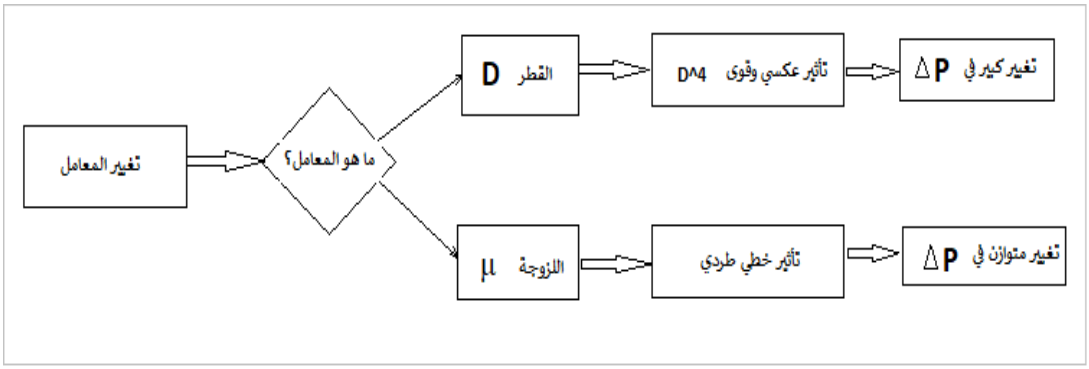
نلاحظ من مخطط النمذجة، الشكل(١)، أن فقدان الضغط يزيد **ضعفين**،إذا نقصت اللزوجة إلى **نصف** (μ→0.5μ):، وفقدان الضغط ينخفض إلى **النصف** ($\Delta P_{new}=0.5\cdot\Delta p_{old}$) .

فقدان الضغط ينخفض إلى **(1/16)** قيمته الأصلية !للقطر إذا نقص القطر إلى **نصف** (D→0.5D): أي:

$$\mathbf{\Delta P}\ \text{new} = \frac{1}{(0.5)^4}\mathbf{\Delta P}\text{old} = 16\cdot\mathbf{\Delta P}\ \text{old} \qquad (5)$$

- المساحة المقطعية ($A=\pi D^2$) تزيد مع زيادة D، مما يقلل السرعة ($v=Q/A$) وبالتالي تقل قوى القص.
- القطر الأكبر يقلل من تأثير اللزوجة بقرب الجدران.

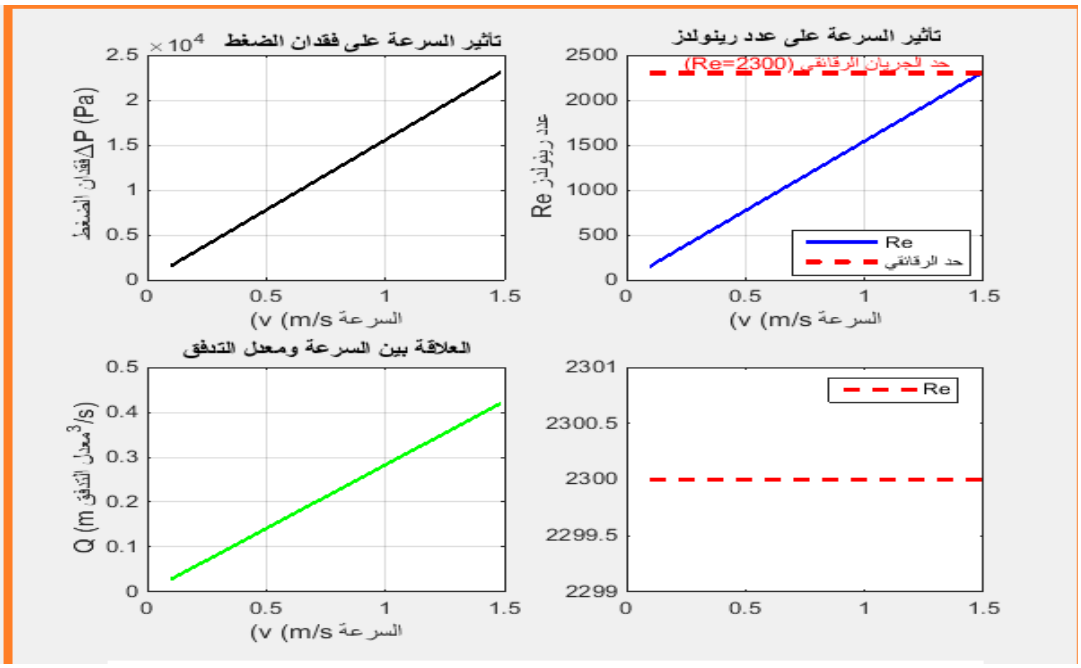
يُفضل استخدام أنابيب ذات أقطار كبيرة في خطوط النفط الرئيسية، والمخطط (١) يُوضح لماذا يتم معالجة النفط الثقيل قبل نقله؟ (لتقليل لزوجته)



المخطط (١)، تأثير القطر واللزوجة على فقدان الضغط

٢,٧. تأثير السرعة على رقم رينولدز وفقدان الضغط ومعدل التدفق للأنبوب الأفقي:

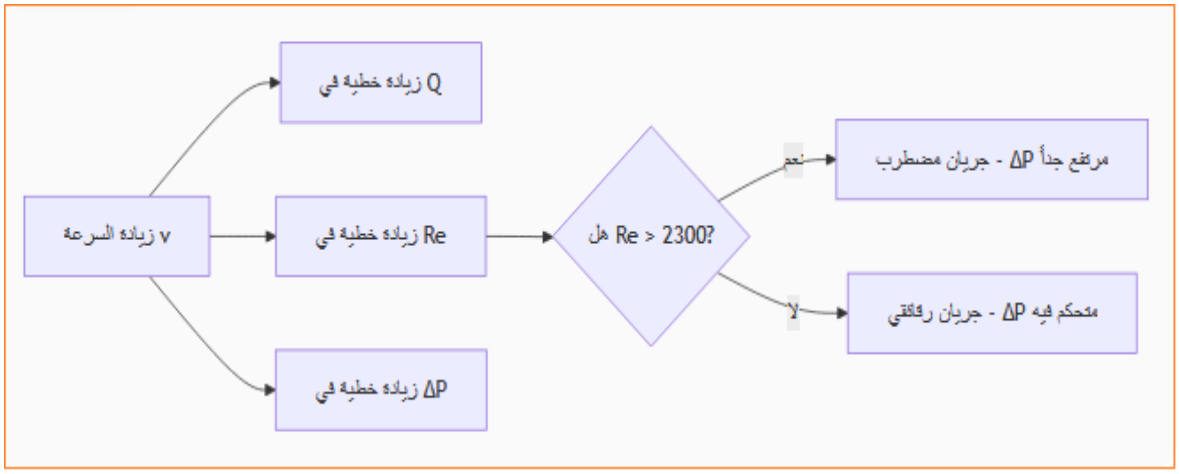
يبين الشكل(٢)، علاقة السرعة بالبارامترات الهيدروديناميكية:



الشكل(٣)، علاقة السرعة برقم رينولدز والتدفق وفقدان الضغط

للجريان الرقائقي(٠,٤٢١m^3/s)، ويكون فقدان الضغط عند السرعة(٢٣١٨٩,٣٠٠ Pa).

والمخطط (٢) يوضح تأثير السرعة على المعاملات الهيدروديناميكية الأساسية:

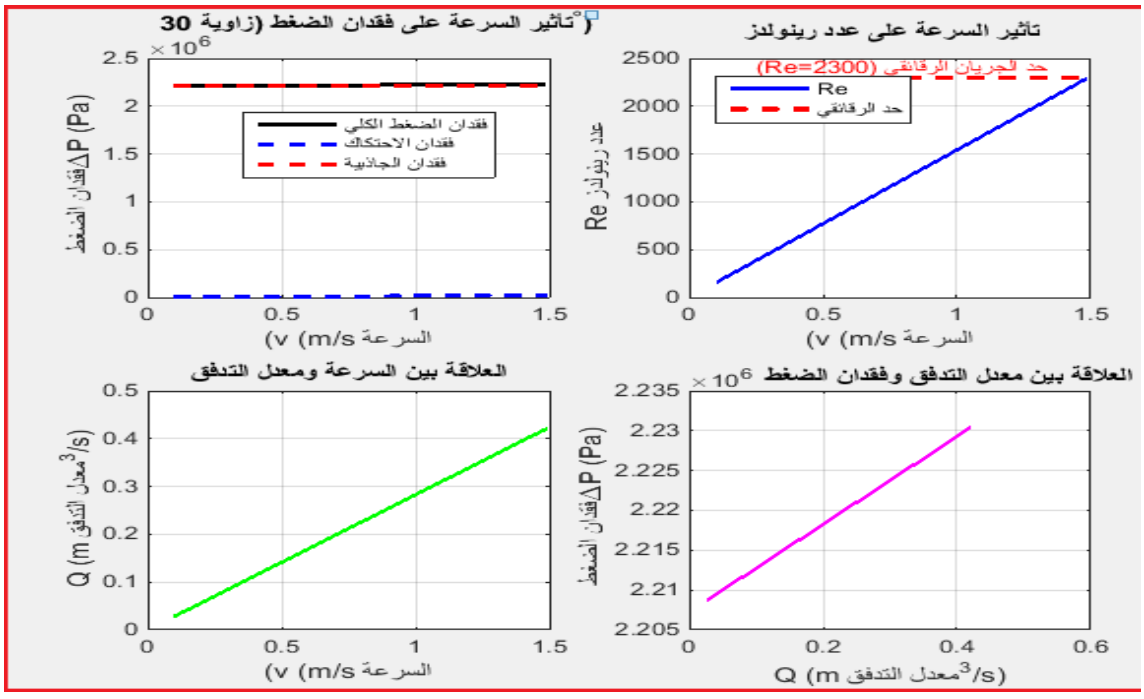


المخطط (٢)، تأثير السرعة على العوامل الأساسية للجريان

في الجريان الرقائقي،عندما يكون(Re<2300) فإن:

- **السرعة المنخفضة:**
  - (Re) منخفض : هيمنة قوى اللزوجة.
  - (ΔP) منخفض : توفير في استطاعة المضخة.
  - (Q) منخفض : إنتاجية أقل.
- **السرعة العالية** (حتى حد ٢٣٠٠):
  - Re : أي يبلغ الحد الحرج.
  - ΔP : يزيد بشكل ملحوظ.
  - Q: يزيد : إنتاجية أعلى.

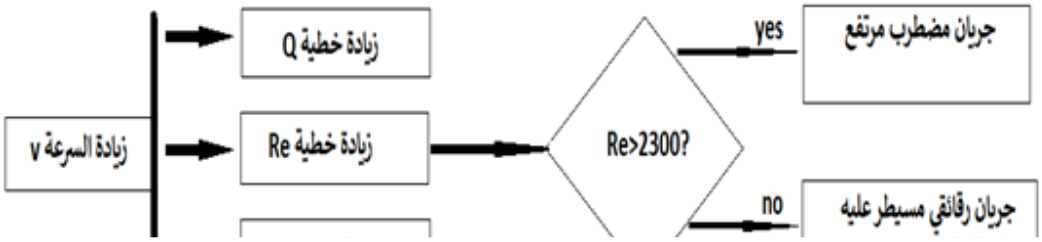
٣,٧. **<u>تأثير السرعة على رينولدز وفقدان الضغط ومعدل التدفق للأنبوب المائل (٣٠ درجة)</u>**:



الشكل(٣)، تأثير السرعة على العوامل الهيدروديناميكية الأساسية للجريان في الانبوب المائل عن الأفق بزاوية (٣٠ درجة)

وفقدان الضغط (due to) الاحتكاك عند السرعة القصوى:(٢٣١٨٩,٣٠٠ Pa)، وفقدان الضغط الكلي عند السرعة القصوى:(٢٢٣٠٤٣٩,٣٠٠ Pa)، التغير في الارتفاع: (٢٥٠,٠٠٠m)، واستطاعة المضخة المطلوبة عند السرعة القصوى: (٩٤٠١٢٣,٥٠٦ W) و استطاعة المضخة المطلوبة عند السرعة القصوى: (٩٤٠,١٢٤ kW).

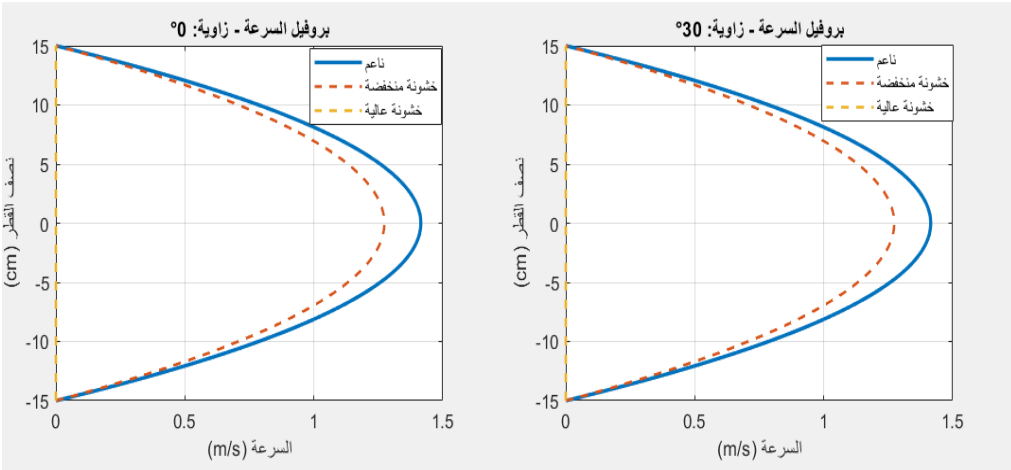
يبين المخطط (٣)، العلاقة المتبادلة بين السرعة والعوامل الهيدروديناميكية للجريان في الانبوب المائل:



مخطط (٣)، العلاقة المتبادلة بين السرعة والعوامل الهيدروديناميكية للجريان في الانبوب المائل

٤,٧. تأثير الميل والخشونة والقطر على بروفيل السرعة:

يوضح الشكل(٤) تأثير كل من الخشونة والقطر والميل على بروفيل السرعة:



الشكل(٤):تأثير الميل والخشونة والقطر على بروفيل السرعة

نلاحظ من الشكل(٤)، ان الخشونة تقلل من السرعة القصوى في مركز الأنبوب، وتزيد من انحدار منحنى السرعة بالقرب من جدار الأنبوب، وكلما زادت الخشونة، زاد تأثيرها على تشويه البروفيل البارابوليكي المثالي.

تغير زاوية الميل من توزيع السرعة بشكل ملحوظ، حيث انه في الأنابيب المائلة، يتغير توازن القوى بين قوى القص والجاذبية، ويؤثر الميل على كفاءة نقل المائع ويزيد من فقدان الطاقة.

٨. الاستنتاجات

١. تُظهر الأنابيب المائلة (٣٠ درجة) فقدان ضغط أعلى بكثير مقارنة بالأنابيب الأفقية (أكثر من ١٢ ضعفاً في المثال المدروس.

٢. زاوية الميل هي العامل الأكثر تأثيراً على فقدان الضغط الكلي في الأنابيب المائلة، حيث مثلت مساهمة الجاذبية (99.2%) من الإجمالي.

٣. الجريان الرقائقي يظل مسيطراً في كلا النوعين عند السرعات المنخفضة إلى المتوسطة(Re<2300) .

٤. في الأنابيب الأفقية :اللزوجة لها تأثير قوي ومباشر على فقدان الضغط.($\Delta P \propto \mu$) ، أما في الأنابيب المائلة، فتأثير اللزوجة أقل أهمية بسبب سيطرة فقدان الجاذبية.

٥. في كلا النوعين، القطر له تأثير هائل على فقدان الضغط($\Delta P \propto 1/D^4$) ، وزيادة القطر تقلل فقدان الضغط بشكل كبير .

٦. في الأنابيب الأفقية :السرعة تؤثر بشكل خطي على فقدان الضغط ومعدل التدفق. أما في الأنابيب المائلة، السرعة لها تأثير محدود على فقدان الضغط الكلي لسيطرة ثابت الجاذبية.

٧. تؤدي زيادة خشونة السطح إلى تسطيح بروفيل السرعة البارابوليكي مع زيادة كبيرة في انحدار المنحنى عند الجدران، ويكون هذا التأثير أكثر حدة في الأنابيب ذات الأقطار الأصغر حيث تصل نسبة الانخفاض في السرعة القصوى إلى ١٥٪ مقارنة بالأسطح الناعمة.

٩. التوصيات

١. دراسة تأثير الموائع غير النيوتونية.

٢. تحليل الجريان المضطرب في الأنابيب المائلة.

٣. بحث تأثير درجة الحرارة على اللزوجة والأداء.

٤. تطوير مواد طلاء داخلية لتقليل الاحتكاك.

١٠. المراجع العربية

١. الكتبي، خالد بن عبدالله، *هندسة نقل النفط والغاز*–الرياض: دار جامعة الملك سعود للنشر، ٢٠١٨.

٢. الغامدي، أحمد بن محمد، *ميكانيكا الموائع التطبيقية في صناعة النفط*.جدة: دار النشر للعلوم الهندسية.٢٠١٥م.

٣.الشمراني، علي بن محمد ،"*تحسين كفاءة أنظمة نقل النفط باستخدام النمذجة الرياضية*."مؤتمر الهندسة الكيميائية والنفطية ,دبي،٢٠٢٠، (٨٨–١٠٢).

١١. المراجع الأجنبية

4. Trench, C. J. (2001). *"How Pipelines Make the Oil Market Work*". Allegro Energy Group.

5. EIA (2020*). "Pipeline Transportation of Crude Oil and Natural Gas*". U.S. Energy Information Administration.

6. API (2019). *"Pipeline Safety Excellence*". American Petroleum Institute.

7. IEA (2021). *"The Role of Pipelines in Energy Security*". International Energy Agency.

8. Nersesian, R. L. (2010). *"Energy for the 21st Century: A Comprehensive Guide to Conventional and Alternative Sources"*. Routledge.

9. Mokhatab, S., & Poe, W. A. (2012). *"Handbook of Natural Gas Transmission and Processing"*. Gulf Professional Publishing.

10. OGJ (2021). "*Worldwide Pipeline Construction Report*". Oil & Gas Journal.