

## التنبؤ التجريبي لهبوط الضغط ومعامل الاحتكاك لجريان مائع غاز - صلب في انبواب دائري

Assistant Lecturer Mohammed Fowzi Mohammed  
University of Technology  
Mechanical Engineering Department

### الخلاصة:-

يتناول هذا البحث دراسة تبين علاقة معامل الاحتكاك والهبوط بالضغط باستخدام ارقام رينولدز تتراوح ما بين (21056-32033) ولمقادير مختلفة لنسب تحميل الصلب (0 - 1.4) لجريان ثنائي الطور (غاز - صلب) داخل انبواب دائري نحاسي بقطر داخلي (63mm) وبطول (2m) . وذلك من خلال بناء جهاز مختبري وحل المعادلات الحاكمة رياضيا . تم الحصول على العلاقات التجريبية بين معامل الاحتكاك والهبوط بالضغط مع عدد رينولدز وسرعة الجريان بالاضافة الى بيان علاقة نسبة التحميل مع معامل الاحتكاك والهبوط بالضغط لمدى معين من ارقام رينولدز .

ومن اهم الاستنتاجات التي تم الحصول عليها هو حدوث زيادة في مقدار معامل الاحتكاك والهبوط بالضغط لجريان ثنائي الطور بزيادة نسبة تحميل الصلب . كما وجد ان العلاقة التي تربط هبوط الضغط مع عدد رينولدز هي علاقة طردية على عكس العلاقة التي تربط معامل الاحتكاك بعدد رينولدز حيث تكون علاقة عكسية .

الكلمات الدلالية : جريان ثنائي الطور ، هبوط الضغط ، عدد رينولدز ، نسبة التحميل ، معامل الاحتكاك

### **Experimental prediction of pressure drop and friction coefficient of Gas –solid fluid flow in a circular tube**

#### **Abstract:-**

This study explains the relationship between friction coefficient and pressure change at a range of Reynolds (21056 - 32033) and (0 -1.4) solid loading ratio of two phase flow (Gas-solid) inside a circular copper pipe of (63mm) inside diameter and (2m) length by using laboratory apparatus and solving the equations mathematically . An experimentally relationships of friction coefficient and pressure change with Reynolds number and flow velocity one obtained also the relationship between the solid loading ratio with friction coefficient and pressure change has been done for a limit range of Reynolds number . It is noticed that the increasing in friction coefficient and pressure change for two phase flow was occurred when solid loading ratio increasing. Also the relationship between pressure change and Reynolds number was direct proportion while the relationship between friction coefficient and Reynolds number were inversely related.

Keywords : two phase flow , pressure drop , Reynolds number , loading ratio , friction coefficient.

**.المقدمة :-**

يحدث الجريان احادي الطور بسبب الاختلاف بالضغط بين منطقة واخرى ونتيجة لذلك تتحرك دقائق الهواء من منطقة الضغط العالي الى منطقة الضغط الواطئ لتمتلك بذلك طاقة حركية معينة لسرعة معينة حيث تتناسب سرعة المائع طرديا مع مقدار هبوط الضغط وتعتمد على ابعاد وشكل الحيز المار من خلاله المائع . اما بالنسبة للجريان ثنائي الطور فالمبدأ يختلف فيما يتعلق بحركة المادة المحمولة حيث تم الاستفادة من الطاقة الحركية للمائع واعطاء جزء منها للمادة المحمولة التي يراد نقلها من مكان الى اخر او اعطائها طاقة حركية للاستفادة منها لاجراض معينة [Graham B ,etal., 1969] . لذلك يستخدم الجريان ثنائي الطور بشكل واسع في معظم الاختصاصات الهندسية ، حيث لاحظ العلماء منذ بداية الصناعة الحديثة هذه الظاهرة ووجدوا لها تطبيقات كثيرة منها مايطبق في مصانع انتاج الطاقة ومصانع انتاج المواد الكيميائية بالاضافة الى الكثير من التطبيقات الاخرى .  
ومن اهم الاعمال التي تطرقت الى هذا المجال :-

كما قدم [Dogen, etal. ,2006] دراسة نظرية لحساب خسائرهبوط الضغط للموائع متعددة الاطوار من خلال استخدام نموذج رياضي تم تطويره عن طريق برنامج حسابي يعمل على حساب الخسائر خلال فوهة في منطقة الجريان تحت الصوتي . النتائج المستحصلة قورنت مع نتائج لنماذج اخرى وكانت اقل بمقدار (9%) .

التحليل العددي المباشر لمعلق الدقائق في قناة لجريان مضطرب تم اختياره من قبل [P.H.Morten ,etal. , 2008] حيث أظهرت المزوجة بين المائع و بين الدقائق انه عند تسليط عزم و قوة كبح هيدروديناميكية على الدقائق الصلبة فانه في المنطقة القريبة من الجدار فان الدقائق تأخذ اتجاه الجريان الرئيسي و هذا التشابه بالاتجاه يزداد كلما كان حجم الدقائق اكبر كما وجد انه بزيادة قوة القصور الذاتي للدقائق تكون دورانية الدقائق حول نفسها بصورة اقل عما هي عليه باتجاه عمودي على الجدار .

كما قدم [Guoliang , etal. 2009] دراسة عملية تبين بيانات الاحتكاك لجريان ثنائي الطور لخليط (R410A-oil) داخل انبوب ذو زعانف لولبية متناهية بالصغر ذو قطر خارجي (5mm) . وظهرت النتائج هبوط الضغط الناجم عن الاحتكاك يعتمد على خواص الخليط .

وفي نفس العام تم دراسة الخسائر لجريان ثنائي الطور(غاز - صلب) تم اختبارها من قبل الباحثين [Jain fan ,etal. , 2009] تم من خلالها دراسة نموذج لخليط (غاز - صلب) يعتمد على (Euler lagrangian) طور باستخدام الكتلة الثابتة بالاضافة الى دراسة تاثيرات

كسر كتلة الطور الصلب والقطر الفعال للجزيئة ودرجة الحرارة الابتدائية كما تم الاخذ بنظر الاعتبار دراسة توزيع السرعة للطور الغازي والجزيئة بالاضافة الى خسارة الضغط . يهدف البحث الحالي دراسة عملية لجريان ثنائي الطور من نوع (غاز - صلب) داخل انبوب دائري المقطع لغرض الوصول الى علاقة معامل الاحتكاك والهبوط بالضغط مع السرعة وعدد رينولدز ونسبة التحميل .

## 2. الجانب العملي :-

تم تجميع مكونات الجهاز وكما مبين في الشكل (1) بدقة وعناية وبما ان الغرض من عمل الجهاز هو اجراء التجارب لجريان ثنائي الطور لذا فمن المهم ان تكون مكونات الجهاز مثبتة بعضها ببعض الاخر باستقامة واحدة وعلى خط افقي لان اي انحراف سيغير من اتجاه حركة المائع . وقد بلغ طول الجهاز من بداية المنفاخ (blower) حتى نهاية وحدة جمع الدقائق الصلبة (4.5m) وبارتفاع (1m) عن مستوى سطح الارض . مقطع جريان الخليط دائري الشكل وقطره الداخلي (63mm) . يتكون الجهاز المختبري من وحدة نفخ (ضخ) الهواء وجهاز حقن الدقائق الصلب والذي يتكون بصورة رئيسية من خزان من مادة البلاستيك توضع فيه دقائق الصلب (مادة الرمل) يحتوي في أعلاه على فتحة لمليء الخزان بالدقائق الصلبة و فتحة أخرى تتصل بأنبوب من المطاط يقوم بتوفير الضغط اللازم لتسهيل انسياب الدقائق الصلبة إلى مجرى الهواء و وحدة قياس معدل تدفق الهواء تتكون من أنبوب من النحاس بقطر داخلي (25.5 mm) مثبت في داخله فوهة (Orifice) . يثبت المانومتر بالانبوب النحاسي حيث يوضع طرفي المانومتر عند طرفي الانبوب اي بمسافة (2m) بصورة شاقولية مع تثبيت انابيب التوصيل البلاستيكية بصورة محكمة لتحاكي تسرب الضغط. كما يتكون الجهاز من وحدة جمع الدقائق الصلبة تقوم باستلام المزيج ثنائي الطور في الأسفل بسبب وجود الجاذبية الأرضية و طور غازي يخرج للأعلى عن طريق وجود آلية أشبه ما تكون بفرع على شكل حرف T ذات تصميم دائري لا مركزي لتخفيف الضغط ولتسهيل عملية جمع الدقائق الصلبة لإعادة استخدامها مرة أخرى. ويوضح الشكل رقم (2) الأجهزة المستخدمة واللازمة لعملية القياس باستثناء جهاز الانيموميتر حيث تم استخدامه للتحقق من كمية الطور الغازي المتدفقة المحسوبة من قراءة المانومتر .

## 3 . الحسابات المختبرية :

يملك الطور الصلب كتلة صغيرة حيث لا يتعدى قطر أكبر دقيقة صلبة 1 ملم ، كما ان الحجم المحجوز من قبل الجسيمات الصلبة يشكل 1.6 من قطر الانبوب لذلك للسببين السابقين يمكن إهمال كثافة الطور الصلب في الحسابات .

تم حساب معدل تدفق الهواء الكتلتي  $m_a$  بعد قياس الضغط الكلي *total pressure* عبر الفوهة بواسطة جهاز المانومتر بوحدات mmH<sub>2</sub>O و كما يلي :

لحساب سرعة الهواء عبر الفوهة :

$$U_o = \sqrt{\frac{2g \Delta h_{Oa}}{1 - \left(\frac{A_o}{A}\right)^2}} \quad (1)$$

لحساب معدل تدفق الهواء الحجمي Q بوحدات m<sup>3</sup>/sec. نستعمل المعادلة التالية

$$Q = A_o U_o = A_p U_p \quad (2)$$

$$m_a \dot{=} \rho_a Q \quad (3)$$

رقم رينولدز للمائع ثنائي الطور يحسب كالآتي :-

$$Re = \frac{\rho_a U_p d_p}{\mu_a} \quad (4)$$

يتم احتساب كمية الدقائق الصلبة المارة كما يلي

$$m \dot{=}_{solid} = \frac{m_{solid}}{t_{solid}} \quad (5)$$

يمكن إيجاد نسبة التحميل X

$$X = \frac{m \dot{=}_{solid}}{m_a \dot{=}} \quad (6)$$

يحسب مقدار انخفاض الضغط نتيجة لاحتكاك الخليط مع جدران الانبوب [Frank , , 2000] **etal.**

كالآتي :-

$$\Delta P = \rho_a g \Delta h_a \quad (7)$$

بتطبيق معادلة دارسي (Darcy equation) يمكن حساب معامل الاحتكاك [Yunus , **etal.** , 2003]

$$\Delta P = C_F \frac{L}{d_p} \rho_a \frac{U_p^2}{2} \quad (8)$$

وبما ان

$$\Delta h_a = \frac{\Delta P}{\rho g} = C_F \frac{LU_p^2}{2d_p g} \quad (9)$$

ومن معادلة (8 و 9) يمكن كتابة معامل الاحتكاك كالآتي

$$C_F = \Delta h_a \frac{2d_p g}{LU_p^2} \quad (10)$$

#### 4. خطوات اجراء التجارب العملية :-

يتم تسجيل القراءات ادناه حسب تسلسل العمل وذلك للحصول على الدقة في الحسابات وكمايلي :-

- قياس الظروف الجوية من ضغط ودرجة حرارة وذلك لما لها من تاثير على كثافة الهواء (الطور الغازي) .
- يتم تشغيل الجهاز ومن ثم يتم تغير مقدار فتحة دخول الهواء لتحديد مقدار معدل سرعة جريان الهواء ومايقابلها من فرق في ارتفاع عمودي الماء في المانومتر وتسجيل ذلك .
- قياس الخسائر نتيجة الاحتكاك :- يتم قياس الخسائر نتيجة احتكاك الخليط ثنائي الطور بالجدار الداخلي للانبوب بصورة غير مباشرة وذلك عن طريق قراءة فرق عمود الماء الموجود في المانومتر
- قياس نسبة التحميل (Loading ratio) :- يتم قياس نسبة التحميل حيث يتم امرار الدقائق الصلبة والحصول على الخليط ثنائي الطور وبعد فترة وجيزة من الزمن بعد ان نصل الى حالة الاستقرار يتم قياس الزمن اللازم لجمع كتلة معينة من دقائق المادة الصلبة عن طريق بدء ساعة توقيت عند نفس اللحظة التي نضع فيها وعاء جمع الدقائق الصلبة وبعد مضي فترة زمنية نقوم بسحب وعاء الجمع متزامنا مع ايقاف ساعة التوقيت ، عندها نقوم بوزن الكتلة المتجمعة من الدقائق عند نفس الزمن فنحصل على معدل تدفق الدقائق الكتلتي ، عند ذلك يصبح بإمكاننا حساب نسبة تحميل الصلب.
- بعد الانتهاء من المراحل المذكورة اعلاه ، نكرر هذه التجارب لجميع السرع لغرض تسجيل كافة القراءات لمختلف كميات التدفق للمادة الصلبة ومعدلات السرعة .

#### 5. النتائج والمناقشة:-

بعد اجراء التجارب وتسجيل القياسات المطلوبة والمتمثلة بمعدل الجريان الكتلتي للصلب ومقدار فرق الضغط على طول الانبوب النحاسي ومن معرفة ابعاد المنظومة من قطر وطول الانبوب النحاسي وكذلك كثافة الهواء يمكن استخراج المقادير التالية (  $Re, C_f, U, \Delta P$  ) .

الشكل (3) يمثل العلاقة بين هبوط الضغط مع سرعة الجريان لجريان مضطرب ثنائي الطور حيث يلاحظ من خلال الرسم البياني ان العلاقة بينهما طردية وذلك لان مقدار هبوط الضغط

في الانبوب يعتمد على سرعة جريان المائع بداخله وكذلك على مقدار احتوائه على الجسيمات الصلبة في حالة الجريان ثنائي الطور ويزداد هذا التأثير بزيادة سرعة الجريان.

في الشكل (4) يوضح العلاقة بين عدد رينولدز وهبوط الضغط حيث يلاحظ ان الهبوط بالضغط يزداد كلما زاد رقم رينولدز وذلك نتيجة لزيادة سرعة الجريان بداخل الانبوب .

الشكل (5، 6) يوضحان العلاقة بين معامل الاحتكاك مع سرعة الجريان وعدد رينولدز حيث ان العلاقة عكسية ويعود السبب الى ان هنالك قوتين تؤثران على حركة الجسيمات وهي قوة الزخم وقوة القص وكلاهما يمثلان طاقة تنتقل من المائع الى الجسيمات الصلبة ويتمثلان في قوة واحدة وهي قوة الاعاققة وتكون اعلى قيمة لها قبل ان تبدأ الجسيمات بالحركة اي بمعنى اخران قوة الاعاققة تقل تدريجيا بزيادة سرعة الجريان [Barnard Massey ,etal. , 2006

]. وكذلك نفس السبب السابق فيما يتعلق بعدد رينولدز ان مقدار الاعاققة بين المائع والجسيمات الصلبة والجدران الداخلية للانبوب النحاسي تتخفف عند زيادة عدد رينولدز .

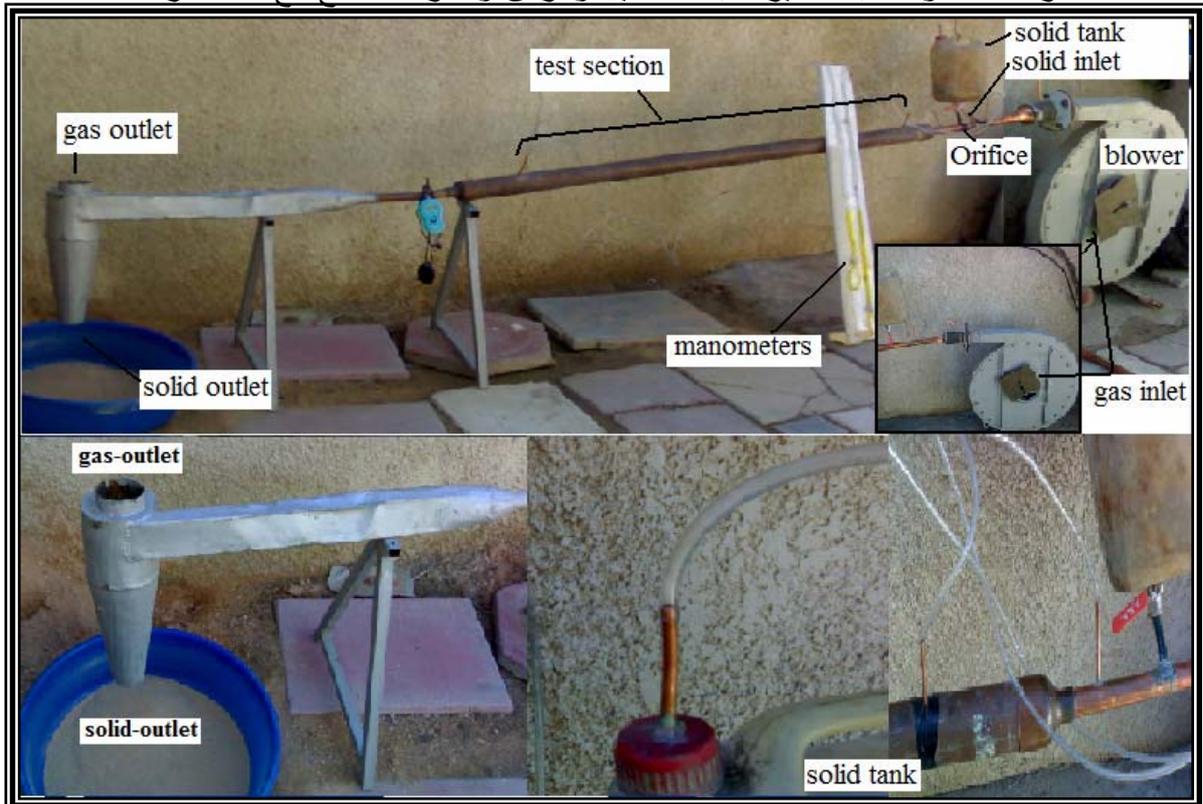
الشكل (7) يوضح العلاقة بين معامل الاحتكاك ونسب التحميل لجريان ثنائي الطور حيث تم استخدام معدلات عدة لتدفق الهواء (ارقام رينولدز) تتراوح ما بين (21056-32033) وتم تغيير النسب الوزنية لتحميل المادة الصلبة من (0-1.4) لبيان التغير الحاصل بالهبوط بالضغط ومعامل الاحتكاك . حيث يزداد معامل الاحتكاك مع زيادة نسبة التحميل وذلك لان زيادة نسبة التحميل تعني زيادة كمية الطور الصلب في الخليط اي زيادة الاعاققة وبالتالي زيادة معامل الاحتكاك نتيجة حركة الجزيئات داخل الانبوب ، كما يلاحظ عند زيادة عدد رينولدز يقل الاحتكاك لان زيادة سرعة الجريان تتسبب بزيادة الزخم الموجود في الدقائق الصلبة وبالتالي صعوبة تغيير مسارها لذلك تقل التصادمات فيما بينها وبين جدار الانبوب لذلك يقل الاحتكاك وبالتالي يقل معامل الاحتكاك .

من ملاحظة الشكل رقم (8) والذي يمثل علاقة هبوط الضغط من جهة ونسبة تحميل الصلب من جهة اخرى ولقيم مختلفة لعدد رينولدز نلاحظ ان قيمة الانخفاض بالضغط تزداد كلما ازدادت نسبة تحميل الصلب لكون المادة الصلبة المضافة تعني تباطؤ واعاققة اضافية لجريان الخليط مما يؤدي الى زيادة الخسارة بالضغط او ما يسمى بانخفاض الضغط ، وعند ملاحظة منحنيات عدة لقيم رينولدز مختلفة نلاحظ ان كلما ازداد رقم رينولدز فان قيمة الانخفاض بالضغط سوف تزداد عند نفس نسبة التحميل الصلب ، وهذا يعود الى ان الجريان يصبح اضطرابي بصورة اكبر كلما ازداد رقم رينولدز وهذا الاضطراب بالجريان يسبب زيادة في التصادمات بين الدقائق الصلبة وبالتالي زيادة الخسارة بالضغط (هبوط الضغط) .

## 6. الاستنتاجات والتوصيات :-

في ضوء النتائج التي تم التوصل اليها في هذا البحث والتي تتضمن دراسة عملية لجريان ثنائي الطور داخل انبوب نحاسي وباستخدام مختلف معدلات مختلفة لتدفق الهواء (ارقام رينولدز) ومقادير مختلفة لنسب التحميل تم استنتاج مايلي :-

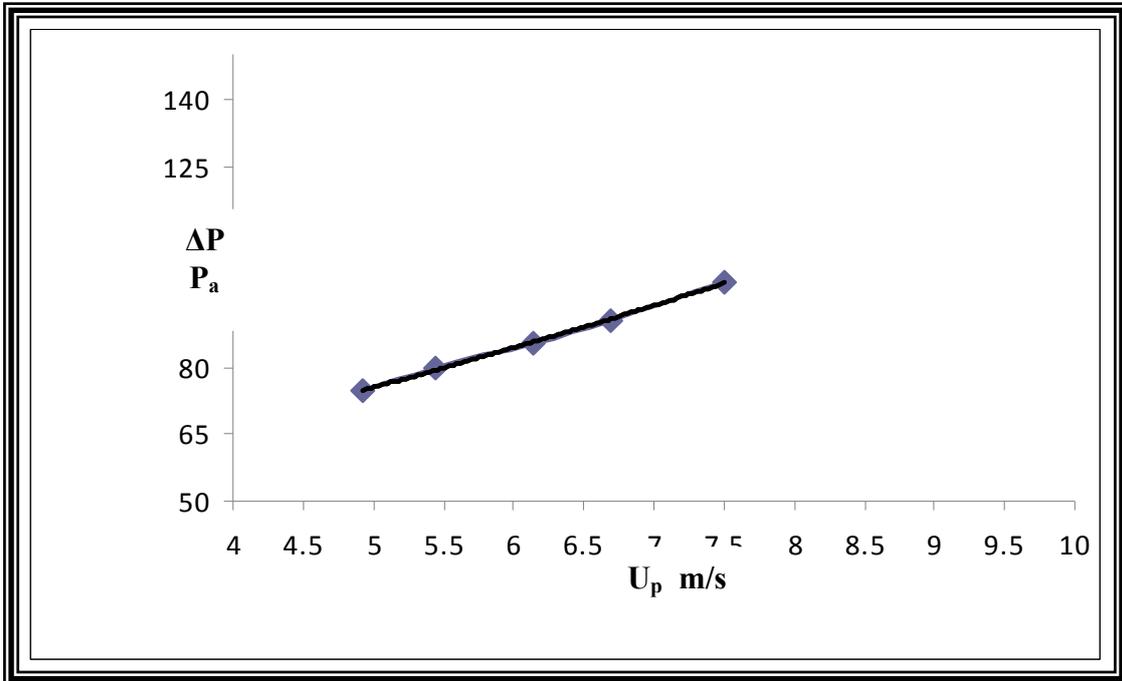
- 1- ان العلاقة بين الهبوط بالضغط وسرعة الجريان ورقم رينولدز هي علاقة طردية
- 2- عند زيادة مقدار رقم رينولدز او سرعة الجريان يؤدي الى ذلك الى انخفاض معامل الاحتكاك للجريان ثنائي الطور .
- 3- حدوث زيادة في مقدار معامل الاحتكاك والهبوط بالضغط لجريان ثنائي الطور بزيادة نسبة تحميل الصلب .
- 4- من خلال علاقة معامل الاحتكاك والهبوط بالضغط مع نسبة التحميل نلاحظ انخفاض مقدار نسبة التحميل القصوى بارتفاع رقم رينولدز .  
(مقدار نسبة التحميل القصوى :- وهي القيمة التي عندها لايمكن زيادة كمية المادة الصلبة في الخليط)
- 5- يمكن اجراء عدة تغيرات لتطوير الجهاز والحصول على حالات دراسية اخرى :-
  - اختبار مقطع اختبار اخر كأن يكون مربع .
  - اختبار نوع اخر من الدقائق الصلبة .
  - اجراء الدراسة باستخدام أنابيب ذات درجات خشونه متباينه وتسجيل مقدار تغير درجة الخشونة طبقاً لتغير نسبة التحميل والزمن ومقارنة النتائج مع هذه الدراسة.



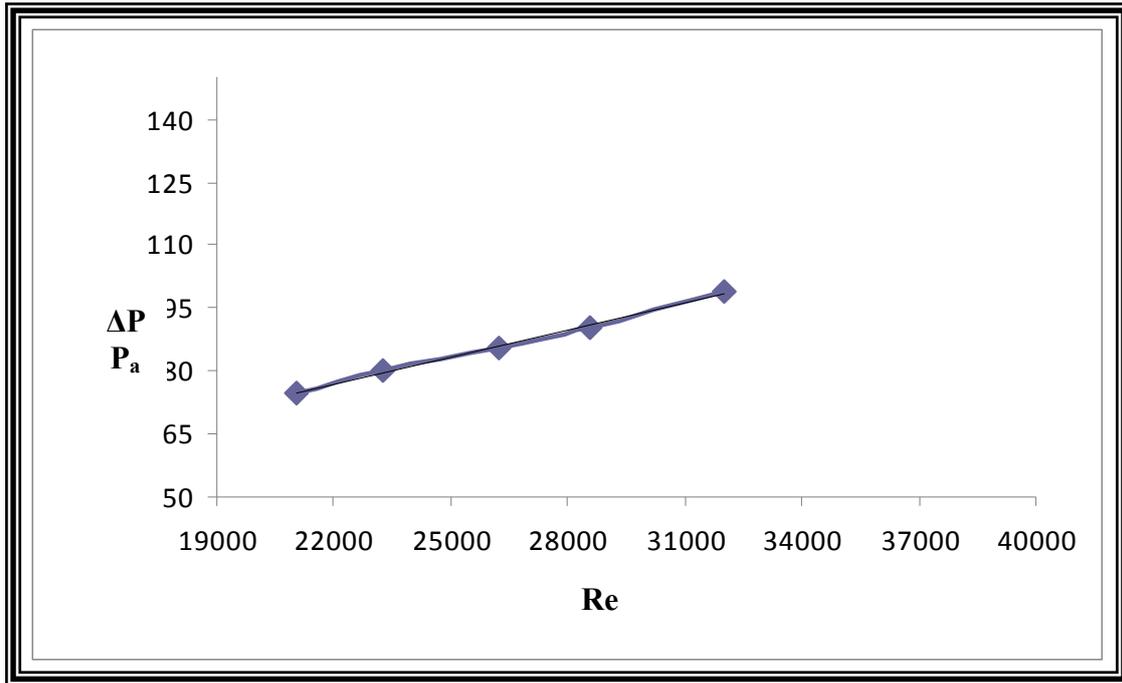
شكل ( 1 ) الجهاز المستخدم في البحث



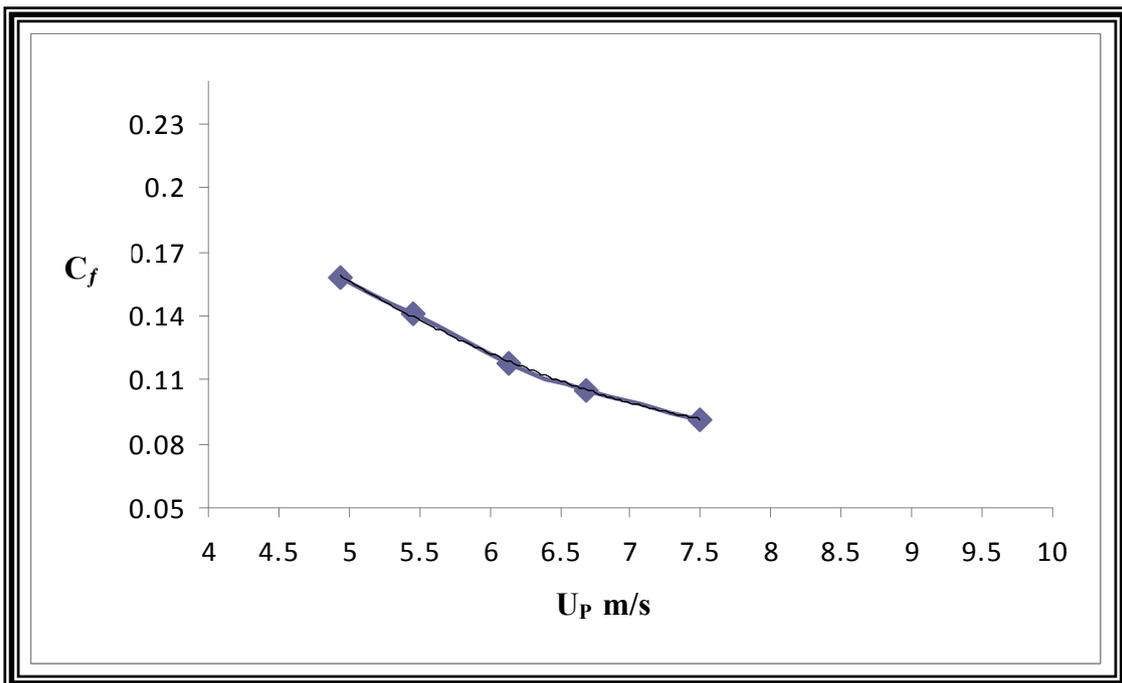
شكل ( 2 ) الأجهزة المساعدة اللازمة لإتمام البحث



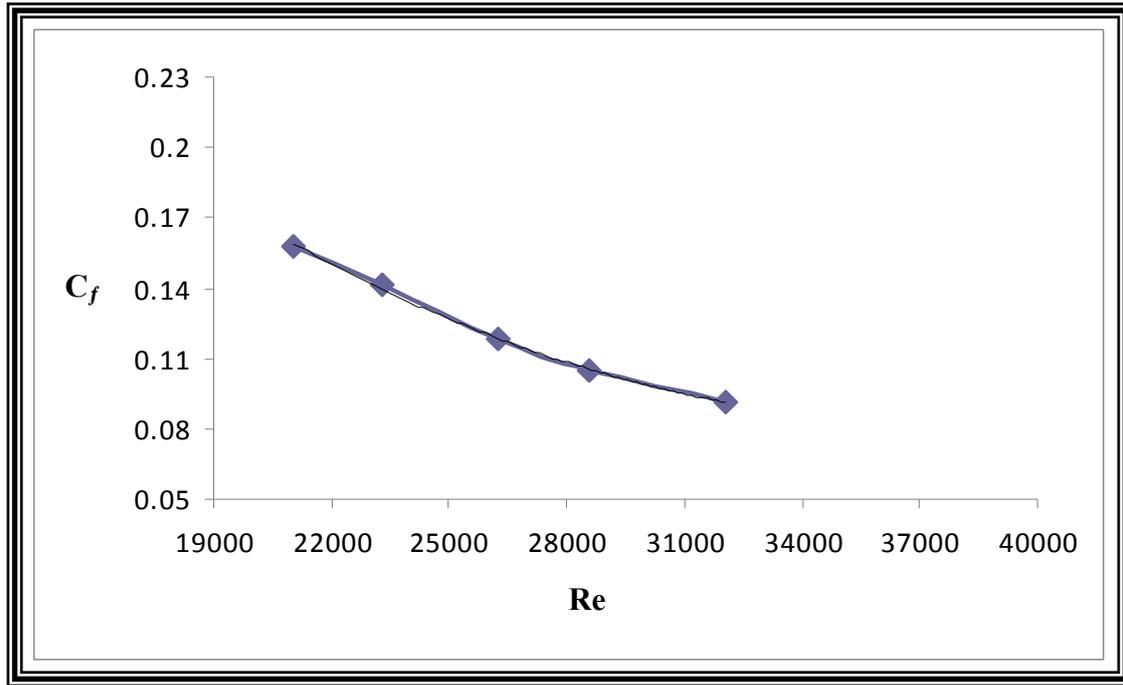
شكل (3) يمثل علاقة هبوط الضغط مع سرعة الجريان لجريان مضطرب ثنائي الطور



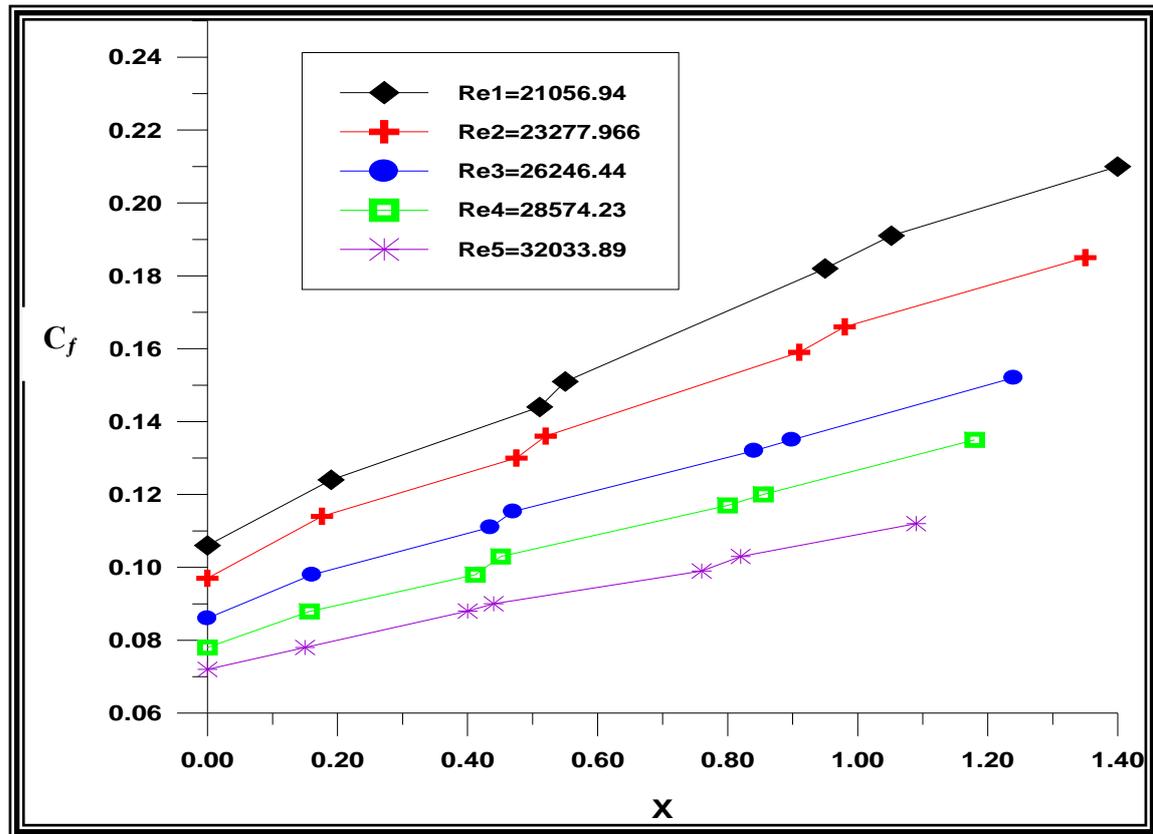
شكل (4) يمثل علاقة هبوط الضغط مع عدد رينولدز لجريان مضطرب ثنائي الطور



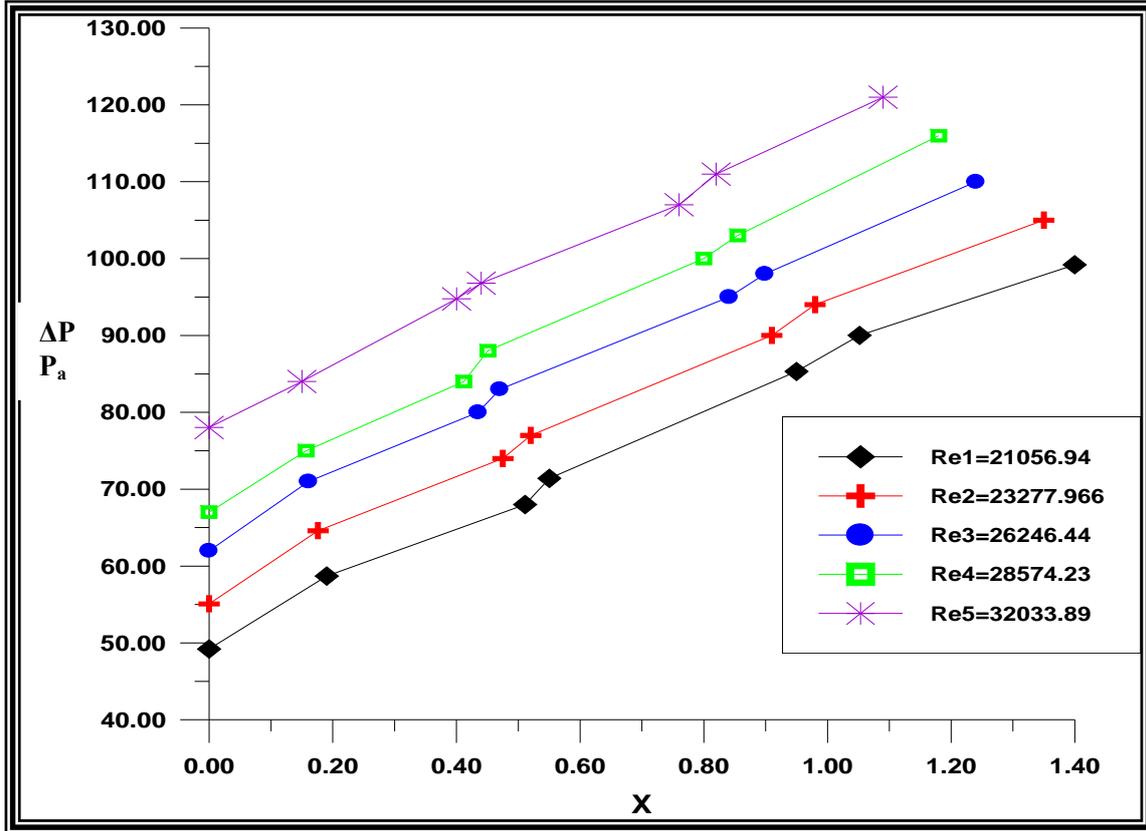
شكل (5) يمثل علاقة معامل الاحتكاك مع سرعة الجريان لجريان مضطرب ثنائي الطور



شكل (6) يمثل علاقة معامل الاحتكاك مع عدد رينولدز لجريان مضطرب ثنائي الطور



شكل (7) يمثل علاقة معامل الاحتكاك مع نسبة التحميل لقيم مختلفة لعدد رينولدز



شكل (8) يمثل علاقة هبوط الضغط مع نسبة التحميل لقيم مختلفة لعدد رينولدز

المصادر

Bernord Massey and John ward - Smith "Mechanics of fluids" , 8<sup>th</sup> edition . 2006 .

Dogen , Huseyin Ali, Turkish Petroleum Co., and Ankara-Turkey "A Comprehensive Bit Hydraulics Model for Gasified Drilling Fluids" 2006 .

Frank . M , White "Fluid Mechanics" fourth edition , 2000

Graham B ,Wallis , " one-dimensional two-phase flow" , 1969 .

Guoliang Dinga,\* , Haitao Hua, Xiangchao Huanga, Bin Dengb, Yifeng Gaoc .“ Experimental investigation and correlation of two-phase frictional pressure drop of R410A–oil mixture flow boiling in a 5 mm microfin tube “ international journal of refrigeration 32 ( 2009) 150–161.

Jain fan , and Chunbo “Study of Two-Phase Loss in Gas-Solid Flow”<sup>45th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit , 2 - 5 August 2009 .

P.H.Morten Sen, H.I.Andersson, J.J.J.Gillissen & B.J.Boersma , “On the orientation of ellipsoidal particles in a turbulent shear flow ” , [http:// www . sciencedirect . com](http://www.sciencedirect.com) , Int. J. multiphase flow , 2008 .

Yunus A. Cengel Robert H. Turner “Fundamentals of thermal-fluid sciences ” 2003

### قائمة الرموز

$m^2$	مساحة مقطع الفوهة	$A_o$
$m^2$	مساحة مقطع الأنبوب بعد الفوهة	$A$
$m^2$	مساحة مقطع الأنبوب الذي تم فيه الاختبار	$A_P$
-	معامل الاحتكاك	$C_f$
$m$	قطر الأنبوب الذي تم فيه الاختبار	$d_p$
$m/s^2$	التعجيل الأرضي	$g$
$m$	طول مقطع الاختبار	$L$
$kg/sec$	معدل تدفق الهواء ألكتلي	$\dot{m}_a$
$kg$	كتلة الدقائق الصلبة	$m_{solid}$
$kg/sec$	معدل تدفق الدقائق الصلبة ألكتلي	$\dot{m}_{solid}$
$m^3/sec$	معدل تدفق الهواء ألكمي	$Q$
-	رقم رينولدز	$Re$
$sec.$	الزمن اللازم لجمع الدقائق الصلبة	$t_{solid}$
$m/sec.$	سرعة الخليط ثنائي الطور عبر الفوهة	$U_o$
$m/sec.$	سرعة الخليط ثنائي الطور في الأنبوب الذي تم فيه الاختبار	$U_p$
$kg solid / kg gas$	نسبة تحميل الصلب	$X$
$kg/m^3$	كثافة الهواء	$\rho_a$
$kg/m.sec.$	اللزوجة الديناميكية للهواء عند درجة حرارة المحيط	$\mu_a$

m	خسائر الأرتفاع نتيجة الأحتكاك من جريان المائع	$\Delta h_a$
m	فرق عمود الهواء عبر طرفي الفوهة	$\Delta h_{oa}$
p <sub>a</sub>	هبوط الضغط على طول الانبوب	$\Delta p$