

## تأثير السرعة الكتلية، الحمل الحراري، وإنتالبي الدخول للجريان القسري ثنائي الطور لأنبوب شاقولي متجانس التسخين في هبوط الضغط

الدكتور حسان حلواني\*

الدكتور فاروق العبود\*\*

(تاريخ الإيداع 18 / 9 / 2012. قُبل للنشر في 16 / 4 / 2013)

### ▽ ملخص ▽

تم في هذا البحث استخدام معادلات تجريبية لحساب هبوط الضغط لأنظمة الغليان والجريان، للتيار ثنائي الطور، آخذين بالحسبان تطور هذه الأنظمة. تم إنشاء لوغاريتم يصف نظام الغليان والجريان باستخدام برنامج الـ Matlab . تبين أن علاقة هبوط الضغط بالسرعة الكتلية من الدرجة الثانية، حيث تؤدي زيادة السرعة الكتلية إلى زيادة هبوط الضغط لكل الأنظمة، باستثناء النظام ذي الجزء السائل عند مدخل الأنبوب، كما أظهرت علاقة هبوط الضغط بالسرعة الكتلية في بعض المنحنيات وجود جزء هابط "منحني من الدرجة الثالثة"، ووجود نقطة بداية تحول الجريان من حلقي مشتمت إلى مشتمت، يؤدي إلى ارتفاع حاد في هبوط الضغط. أظهرت النتائج أن وجود الجزء السائل عند مدخل الأنبوب، يسبب تزايد هبوط الضغط مع زيادة الحمل الحراري وفق علاقة شبه خطية ، ولدى ظهور الجريان المشتمت يثبت هبوط الضغط ، ويختلف الأمر بغياب الجزء السائل عند مدخل الأنبوب. يزداد هبوط الضغط مع زيادة إنتالبي الدخول من أجل معظم الأنظمة، بينما يتناقص من أجل نظام الغليان التوازني. علاقة هبوط الضغط الناجم عن الاحتكاك بمحتوى البخار الكتلي هي منحني من الدرجة الثالثة، يزداد خلالها هبوط الضغط بالاحتكاك بزيادة محتوى البخار الكتلي.

**الكلمات المفتاحية:** ثنائي الطور، أنظمة الغليان والجريان، الغليان السطحي، محتوى البخار الحجمي الحقيقي، محتوى البخار الكتلي، السرعة الكتلية، هبوط الضغط، الحمل الحراري.

\* مدرس - قسم الهندسة النووية - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة حلب - سورية.  
\*\*أستاذ مساعد - قسم هندسة الطاقة - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة حلب - سورية.

## Impact of Mass Velocity, Heat Flux, and Inlet Enthalpy of two Phase Forced Flow of Homogenous Heated Vertical Tube on Pressure Drop

Dr. Hassan Halwani\*  
Dr. Farouk Alaboud\*\*

(Received 18 / 9 / 2012. Accepted 16 / 4 / 2013)

### ▽ ABSTRACT ▽

In this paper we have used empirical equations to calculate pressure drop for boiling and flow systems of two-phase flow, taking into account the evolution of these systems. We established an Algorithm to describe boiling and flow systems, by using Matlab program. The results Show that :the relation between pressure drop and mass velocity is of the second degree, since an increase of mass velocity leads to an increasing of pressure drop for all systems, except for the system with a liquid portion at the tube entrance, also in some curves the relationship mass velocity with pressure drop, showed that there is a downside part (the curve of the third degree), there is a starting point of transition from dispersed annular flow to dispersed, leading to a sharp rise in pressure drop. The results showed that the presence of the liquid portion at the tube entrance, cause an increase of pressure drop with increasing heat flux according to quasi-linear relationship, and with dispersed flow presence, pressure drop is proofed, and it differs from the absence of the liquid at the entrance of the tube. Pressure drop increases with increasing inlet Enthalpy for most systems, while decreasing for the equilibrium boiling. Relationship with the pressure drop caused by friction with the mass steam content is of third-degree curve, where increasing of mass steam content lead to increase the friction pressure drop.

**Keywords:** Two phase, flow and boiling systems, surface boiling, the actual volumetric steam content, mass steam content, mass velocity, pressure drop, heat flux.

---

\*Assistant Professor, Nuclear Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Aleppo University , Syria.

\*\*Associate Professor, Power Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Aleppo University , Syria

**مقدمة:**

تعد أنظمة الجريان ثنائي الطور من أكثر المواضيع غموضاً وصعوبة، وقد استمرت دراستها لعدة عقود، ولا تصف طرق التنبؤ الحالية بدقة أنظمة الجريان [1]، وتتبع الصعوبة من ظهور تغيرات متنوعة للغاية في بنية وتشكيل مزيج السائل- البخار تقود إلى تغيرات بنيوية .

لذا فإن معرفة أنظمة الجريان ثنائي الطور هي بالغة الأهمية، فهي تختلف عن قرينتها في الجريان أحادي الطور، وهي السبب الأهم لحل أية مشكلة تحصل في هذا النوع من الجريان [2].

من أجل النمذجة الأكثر دقة للظواهر الفيزيائية في الجريانات ثنائية الطور، من الضروري معرفة أنظمة هذه الجريانات، فلا يمكن على سبيل المثال وصف الجريان الفقاعي والحلقي بدقة جيدة بمساعدة النموذج نفسه، ومن الأفضل استعمال نماذج مختلفة، إلا أن الحصول على هذه النماذج يتعد بوجود المنطقة الانتقالية بين النظامين والمعرفة غير الكافية لفيزيائية هذه المناطق الانتقالية [1]. تتعد السمة العشوائية لكل بنية، كون الجريانات ثنائية الطور لا تعدّ بالكامل متطورة. ان انتشار الطور الغازي مرتبط عملياً بهبوط الضغط في الأنبوب، ويمكن أن يؤدي الى تغير نظام الجريان، على سبيل المثال: انتقال الجريان الفقاعي الى قذافي .

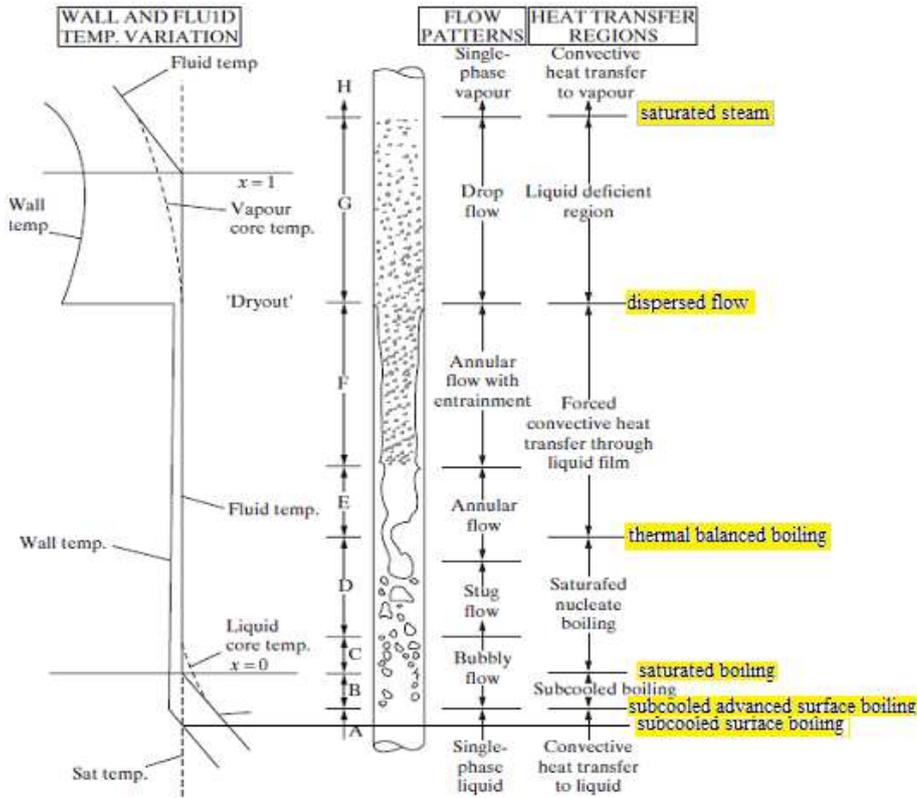
يتعلق هبوط ضغط الاحتكاك بكل من : السرعة الكتلية الوسطية للجريان، نظام الجريان، محتوى البخار الحجمي الحقيقي، نسبة كثافة الأطوار، لزوجة السائل والبخار، خشونة الجدار. لم يدرس التأثير المشترك لهذه العوامل على مقاومة الاحتكاك بشكل كامل كفايةً [3]، وبغض النظر عن نجاحات الأبحاث النظرية المسخرة لحل هذه المسألة، فإن ضياعات الضغط على الاحتكاك عادة تدرس بمساعدة علاقات تجريبية ومخططات مبنية على أسس تجريبية، علماً أنه في غالبية الدراسات المرتبطة بهبوط الضغط، فإن مساهمة ضياعات الاحتكاك هي المهيمنة، وتكون مساهمة ضياعات التسارع والضياعات الهيدروليكية صغيرة [4].

**أنظمة الغليان في الجريان ذي الحركة القسرية باتجاه الأعلى:**

تعدّ عملية الغليان للجريان ثنائي الطور القسري في الأنابيب أكثر صعوبة من الغليان الحر، نظراً للعلاقة الوثيقة بين العمليات الهيدروديناميكية وعمليات انتقال الحرارة بالغليان.

تحدث العلاقة بين الطورين و أنظمة انتقال الحرارة بالغليان، على طول القنوات المسخنة خلال الغليان القسري كنتيجة لارتفاع نسبة البخار. تتطور أنظمة الغليان ثنائي الطور من حيث البنية على امتداد قنوات التسخين بشكل مختلف عما هو في نظام الجريان ثنائي الطور الأديباتي، والشكل المفضل للغليان في الأنابيب هو الغليان في القنوات الشاقولية ذات الجريان للأعلى. وفقاً لهذا الشكل من القنوات، تساعد قوة الطفو على جريان المزيج، وتحسن فعلياً السرعة النسبية بين الطورين، الناتجة عن فرق الكثافة، عملية انتقال الحرارة.

يظهر الشكل (1) تفصيلاً للجريان ولأنظمة انتقال الحرارة في أنبوب شاقولي منتظم التسخين ذي جريان للأعلى، ومعرض لحمل حراري معتدل، حيث المائع على المدخل سائل غير مشبع [2]. كذلك يبين الشكل نفسه تغيرات درجات الحرارة لكل من الجدار والسائل بالقرب من مدخل الأنبوب، حيث السائل غير مشبع بدرجة كافية لا يسمح بنشوء فقاعات، حيث نظام الجريان سائل أحادي الطور ونظام انتقال الحرارة بالحمل القسري. بمنابعة التسخين تتسلسل أنظمة الجريان، التي تشمل الفقاعي، القذافي، والحلقي، ويليه نظام جريان القطري المشتت، وأخيراً نظام جريان أحادي الطور لبخار فقط. يختلف نظام الجريان ثنائي الطور بعض الشيء من حيث الشكل عن نظيره في الجريان ثنائي الطور الأديباتي.



الشكل (1) - أنظمة الغليان والجريان ثنائي الطور في أنبوب شاقولي ذي حمل حراري على الجدران معتدل (Collier & Thome, 1994) [2]

يعدّ الغليان في قلب التيار هو السائد في نظامي الجريان الفقاعي والقذافي ويتبع بعملية تبخر بالحمل القسري، حيث نظام الجريان الحلقي هو السائد. هذا نظام فعال للغاية لانتقال الحرارة حيث يغطي السطح الداخلي المسخن لأنبوب طبقة رقيقة من السائل. تبرد طبقة السائل بالتبخّر من سطحها، مما يجعلها غير قادرة على تحمل درجة تحميص مرتفعة بشكل كافٍ للفقاكات. يمكن أن يحصل حمل للفقاكات عندما يكون معدل تدفق البخار مرتفعاً بشكل كافٍ مما يقود إلى جريان قطري مشتت.

إن معامل انتقال الحرارة في منطقة تشوه السائل أخفض بكثير مما هي في نظامي الغليان في قلب التيار والتبخّر بالحمل القسري، كنتيجة لحدوث الجفاف، المترافق بارتفاع كبير في درجة حرارة السطح المسخن، وبذلك فإن ظاهرة الجفاف تشبه الحمل الحراري الحرجة التي تحصل في الغليان الحر.

### أهمية البحث وأهدافه:

يستخدم الجريان ثنائي الطور في مجالات متعددة منها (مفاعلات الماء المغلي الهيكلية BWR وذات القنوات RBMK، مولدات البخار لمحطات توليد الطاقة، المبادلات الحرارية في مجالي التبريد والتسخين إضافة للمجالات الصناعية). يتميز الجريان ثنائي الطور، على الرغم من تعقيده، بأنظمة غليان وجريان متعددة يتغير فيها كل من عامل انتقال الحرارة ومقدار هبوط الضغط، نظراً لظهور الطور البخاري، ومن المفيد جداً الاستفادة من الميزات

الإيجابية لبعض أنظمة الغليان والجريان، التي يزداد فيها عامل انتقال الحرارة ويقل هبوط الضغط، وفي الوقت نفسه، يمكن تقادي الأنظمة التي ينخفض فيها عامل انتقال الحرارة ويحدث فيها عدم استقرار الجريان ثنائي الطور، المميز بعلاقة من الدرجة الثالثة بين هبوط الضغط والسرعة الكتلية، بالإضافة إلى ضرورة حساب هبوط الضغط في مختلف هذه الأنظمة.

من هنا تأتي أهمية تحديد تأثير المتحولات (الحمل الحراري، السرعة الكتلية، إنتالبي الدخول) في هبوط الضغط للجريان ثنائي الطور في الأنابيب الشاقولية لجريان صاعد ورسم علاقة كل منها بهبوط الضغط، وهو ما يهدف إليه البحث .

### طرائق البحث ومواده:

يعتمد البحث على إجراء حسابات هبوط الضغط والاستفادة من المعادلات التجريبية [5,6]، التي يمكن من خلالها معرفة خصائص الجريان في الأنظمة المختلفة لتحديد نظام الغليان والجريان على طول الأنابيب الشاقولي ذي الجريان للأعلى، ومن أجل ذلك تم إنشاء لوغاريتم باستخدام برنامج الـ Matlab، الذي يقوم بتحديد هذه الأنظمة المختلفة وكذلك مختلف المتحولات المؤثرة فيها (الضغط، إنتالبي الدخول، الحمل الحراري، السرعة الكتلية، طول الأنبوب، قطر الأنبوب) ويرسم العلاقات المختلفة فيما بينها.

#### 5- حساب هبوط الضغط لأنظمة الغليان والجريان باستخدام العلاقات التجريبية:

يختصر حساب المقاومات الهيدروليكية في شروط الجريان الأديباتي للتيار ثنائي الطور في الأنابيب إلى حساب مجموع هبوط الضغط الناتج عن كل من التسارع  $\Delta p_{acc}$  والاحتكاك  $\Delta p_f$  وتغير هبوط الضغط الهيدروليكي  $\Delta p_h$ . يحسب هبوط الضغط الناتج عن التسارع في القنوات ثابتة المقطع [7] بالعلاقة :

$$\Delta p_{acc} = \frac{G^2}{S^2} [v^*(z) - v_0] \quad (1)$$

حيث:

$$v^*(z) = \frac{(1-x)^2}{\rho_l(1-\phi)} + \frac{x^2}{\rho_v \times \phi} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{S_{steam}}{S_{steam} + S_{water}} \quad \text{محتوى البخار الحقيقي}$$

$$x = \frac{G_{steam}}{G_{steam} + G_{water}} \quad \text{محتوى البخار الكتلي الفعلي}$$

$$S \quad \text{مساحة مقطع العبور } m^2$$

$$v_0 \quad \text{الحجم النوعي على مدخل الأنبوب } (m^3/kg)$$

$$G \quad \text{التدفق الكتلي على } (kg/s)$$

- الدليل  $v$  ,  $l$  يشير إلى البخار والسائل على الترتيب

يمكن بعد تحقيق التوازن الترموديناميكي للمزيج في قسم الغليان الحجمي من الجريان في القناة، أن تتساوى قيم الكتل النوعية والانتالبي النوعي للأطوار أي:  $h_{sv} = h_v$  ،  $h_{sl} = h_l$  ،  $\rho_{sv} = \rho_v$  ،  $\rho_{sl} = \rho_l$  ، حيث الدليل  $sl$  السائل المشبع ،  $sv$  البخار المشبع

يحدد هبوط الضغط الناتج عن الاحتكاك والمقاومات الموضعية  $\Delta p_f$  [7] بالعلاقة:

$$\Delta p_f = \frac{G^2}{2 \times S^2} \left[ \frac{\xi \times z}{d_h} \bar{v} + \sum \xi_{(loc)_i} \times v(z_i) \right] \quad (3)$$

حيث  $\bar{v}$  الحجم النوعي الوسطي  $m^3 / kg$  ،  $\sum \xi_{(loc)_i}$  - مجموع المقاومات الموضعية،  $v(z_i)$  - الحجم النوعي الموافق للطول  $z_i$  . مع استبدال معامل الاحتكاك الهيدروليكي  $\xi$  بمعامل الاحتكاك للجريان ثنائي الطور  $\xi_{t,ph}$  ، تحسب المقاومة الهيدروليكية للقناة في حالة الجريان ثنائي الطور للتيار بالعلاقة :

$$\xi_{t,ph} = \psi \times \xi \quad (4)$$

يأخذ العامل  $\psi$  (معامل عدم تجانس المزيج) بالحسبان تأثير أنظمة الجريان على قانون الاحتكاك ويمكن حسابه من العلاقة:

$$\psi = \left[ 1 + x \left( \frac{\mu_{sl}}{\mu_{sv}} - 1 \right)^{-0.2x} \right] \left\{ 1 + 0.57 x^{0.125} (1-x)^2 \times \left[ \frac{I}{0.2 + Fr^{0.5} \frac{\rho_{sv}}{\rho_{sl}}} - 5.2 \times x^2 \right] \right\} \quad (5)$$

حيث:  $Fr$  - رقم فرود المحسوب بدلالة سرعة التدوير

يحسب الحجم النوعي الوسطي  $\bar{v}$  الداخل في العلاقة (3) بالعلاقة:

$$\bar{v} = v_{sl} (1-x) + v_{sv} x \quad (6)$$

يحدد هبوط الضغط الناتج عن فرق الارتفاع في الأنبوب الشاقولي بالعلاقة:

$$\Delta p_h = \rho g z \quad (7)$$

يحدد معامل الاحتكاك بالعلاقة:

$$\xi = \xi_o C_w C_T C_G C_\phi \quad (8)$$

حيث  $\xi_o$  معامل احتكاك الأنابيب الملساء، ويحدد بالعلاقة:

$$\xi_o = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2} \quad (9)$$

المعامل  $C_w$  يأخذ بالحسبان خشونة السطح ويحسب من العلاقة:

$$C_w = (1 + 0.146 \frac{\Delta}{d} Re^{0.8})^{0.25} \quad (10)$$

حيث  $\Delta$  - معامل الخشونة المطلقة،  $d$  - قطر الأنبوب،  $Re$  - رقم رينولدز للجريان القسري في

الأنابيب.

المعامل  $C_T$  يأخذ بالحسبان اختلاف درجة حرارة التيار، ويحدد بالعلاقة:

$$C_T = \left( \frac{\mu_w}{\mu} \right)^n \quad (11)$$

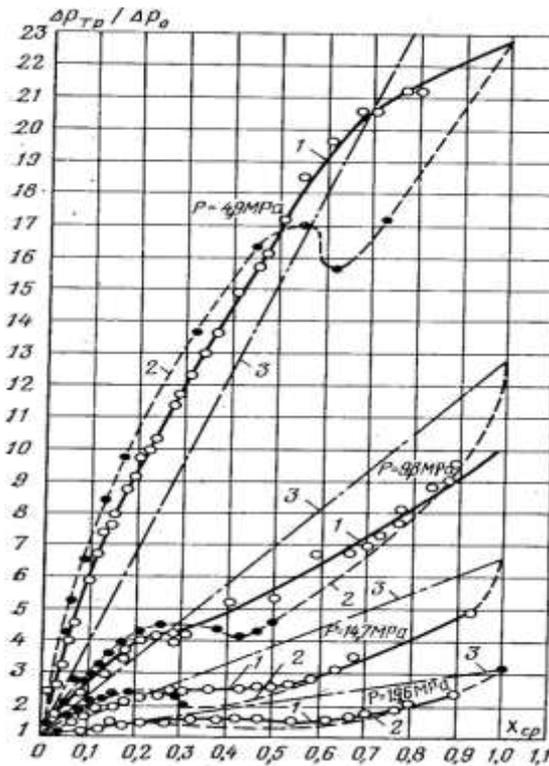
حيث  $n = 0.11$  عند التسخين و  $n = 0.25$  عند التبريد.

المعامل  $C_e$  يعكس الفرق بين الأنابيب والقنوات غير الدائرية، حيث يعدّ من أجل الأنابيب  $C_e = 1$ ، أما للقنوات غير الدائرية فتستخدم قيم أخرى.  
 $C_e = 1$  - معامل الشكل.

يتضمن هبوط الضغط في القنوات لدى غليان ناقل حراري، تلك المركبات الموجودة في حالة الناقل الحراري أحادي الطور، إلا أن كل واحدة من هذه المركبات تتعلق بكل من محتوى البخار، بنية التيار ثنائي الطور، ومجموعة من العوامل الأخرى المتعلقة بصعوبة وضع قوانين ناظمة لهيدروديناميك التيار (بخار-سائل).

ينسب هذا بشكل خاص إلى تحديد الضياعات الناتجة عن الاحتكاك. منحنيات ضياع الضغط في علاقتها بمحتوى البخار عند ضغوط مختلفة مبينة على الشكل (2)، [5].

تتميز ضياعات الضغط هنا بنسبة ضياعات الاحتكاك عند حركة المزيج ثنائي الطور (بخار-سائل) منسوبة إلى ضياعات الضغط الناتجة عن الاحتكاك "عند الحركة بالسرعة الكتلية نفسها للماء عند درجة حرارة الإشباع". يبين الشكل (2) المعطيات التجريبية، التي تم الحصول عليها [5] عند الجريان الأديباتي للمزيج (بخار-سائل) دون تسخين، ومع التسخين، وباستخدام العلاقات الحسابية على افتراض أن تيار المزيج (بخار-سائل) متجانس.



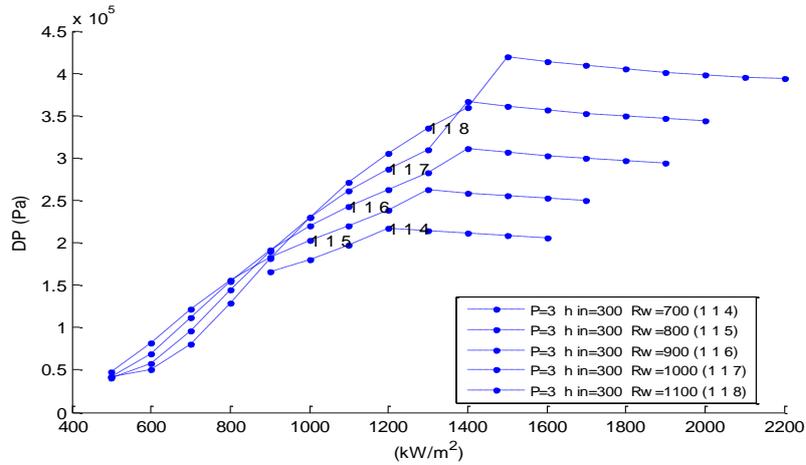
الشكل (2) - علاقة نسبة هبوط الضغط بالاحتكاك في الجريان ثنائي الطور إلى هبوط الضغط للسائل عند درجة حرارة الإشباع و السرعة الكتلية نفسها مع محتوى البخار الكلي من أجل ضغوط مختلفة: 1- دون تسخين، 2- مع تسخين، 3- علاقات حسابية لجريان متجانس [5]

## النتائج والمناقشة:

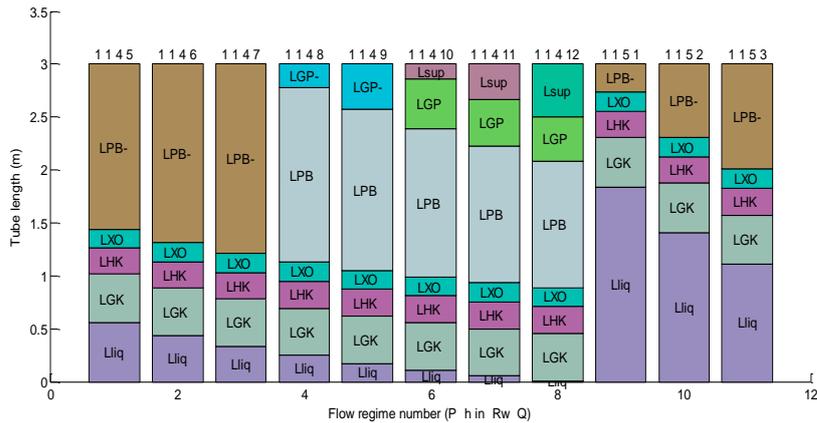
### 1- تأثير الحمل الحراري على هبوط الضغط من أجل سرعات كتلية متغيرة:

#### 1-1- النظام (O-LI):

من ملاحظة تأثير الحمل الحراري في هبوط الضغط من أجل سرعة كتلية ثابتة الشكل (3) نجد أنه بزيادة الحمل الحراري يزداد هبوط الضغط حتى قيمة معينة بعد ذلك لا يلاحظ أي تأثير ملحوظ على هبوط الضغط بزيادة الحمل الحراري، ونقطة بداية ثابت انخفاض هبوط الضغط مع زيادة الحمل الحراري يوافق حالة دخول الجريان ثنائي الطور "الجريان المشتت GP"، حيث محتوى البخار مرتفع. نشير إلى أن البحث تم من أجل ضغط دخول للأنبوب  $P = 3$  MPa.



الشكل (3)- تأثير الحمل الحراري على هبوط الضغط للجريان ثنائي الطور للسائل عند سرعات كتلية (  $R w$  ) متغيرة (O-LI) حيث إنتالبي الدخول  $h_{in}$  تقدر بـ (  $kJ/kg$  ). الأرقام المبينة على المنحنيات في الشكل تمثل المتغيرات (  $p, h_{in}, R w$  )

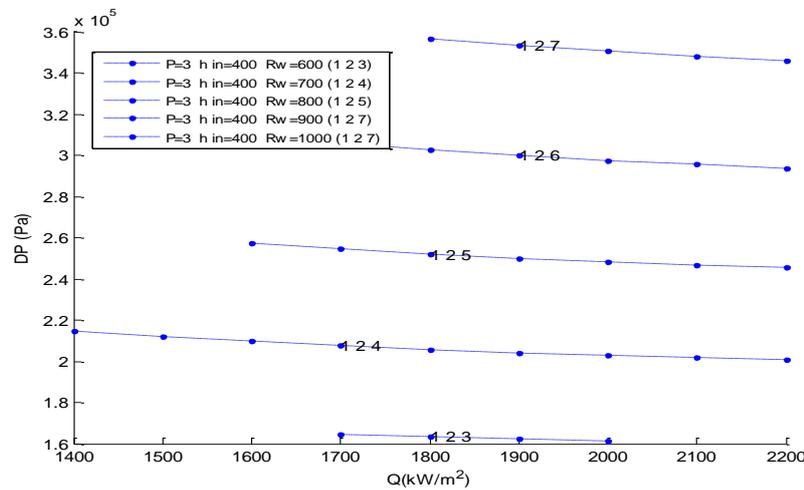


الشكل (4)- تغير أنظمة الجريان على طول الأنبوب -كل أنبوب يمثل نقطة من المنحنيات المبينة على الشكل (3)، الأرقام المبينة على الأنابيب في الشكل تمثل المتغيرات (  $p, h_{in}, R w, Q$  )

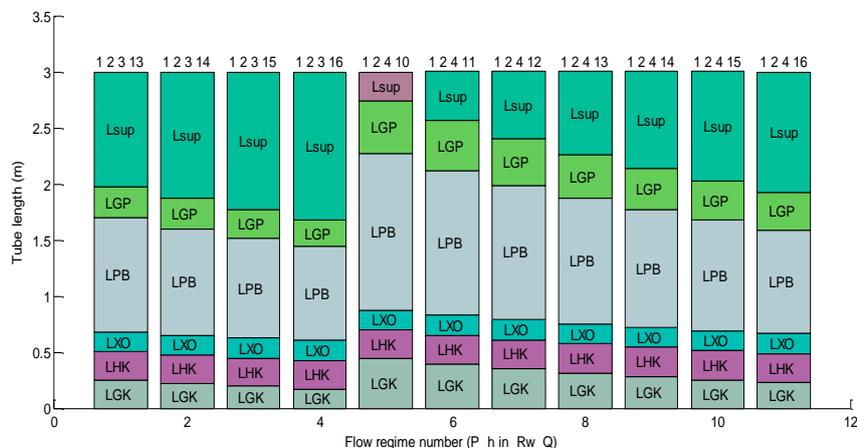
من الشكل ذاته يلاحظ أنه من أجل حمل حراري ثابت، يزداد هبوط الضغط مع زيادة السرعة الكتلية. على الشكل (4) مجموعة الأنابيب " (1 1 4 5)، (1 1 4 6)، (1 1 4 7)، (1 1 4 8)، (1 1 4 9)، (1 1 4 10)، (1 1 4 11)، (1 1 4 12)" تمثل المنحني (1 1 4)، وتختلف بالحمل الحراري بثبات الضغط وإنتالبي الدخول والسرعة الكتلية وابتداءً من الأنبوب الرابع وحتى الثامن، أي بظهور الجريان المشتت "GP" في هذه الأنابيب يثبت هبوط الضغط، انظر الشكل (4) وكذلك الشكل (3) المنحني (1 1 4)، حيث الأنابيب " (1 1 4 8)، (1 1 4 9)، (1 1 4 10)، (1 1 4 11)، (1 1 4 12)" تمثل النقاط الخمسة الأخيرة (كل أنبوب يمثل نقطة) من المنحني (1 1 4).

### 2-1- النظام (O-GK):

يوضح الشكل (5) علاقة هبوط الضغط بالحمل الحراري عند سرع كتلية مختلفة بثبات إنتالبي الدخول والضغط، المنحنيات " (1 2 3)، (1 2 4)، (1 2 5)، (1 2 6)، (1 2 7)" تشير إلى تناقص ضئيل للغاية للضغط مع زيادة الحمل الحراري من أجل سرعة كتلية محددة بثبات الضغط وإنتالبي الدخول.



الشكل (5) - تأثير الحمل الحراري على هبوط الضغط للجريان ثنائي الطور للسائل عند سرعات كتلية متغيرة (Rw) متغيرة (O-GK)، الأرقام المبينة على المنحنيات في الشكل تمثل المتغيرات (p, h<sub>in</sub>, Rw)

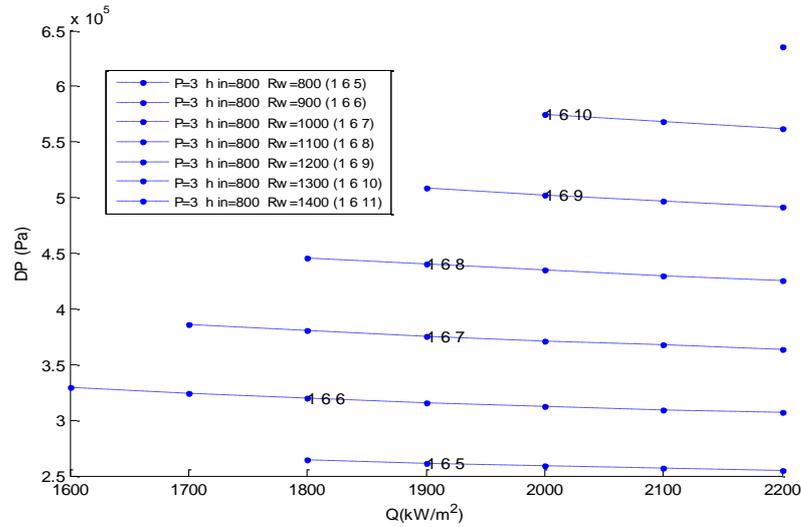


الشكل (6) - تغير أنظمة الجريان على طول الأنبوب - كل أنبوب يمثل نقطة من المنحنيات المبينة على الشكل (5)، الأرقام المبينة على الأنابيب في الشكل تمثل المتغيرات (p, h<sub>in</sub>, Rw, O)

تشير الأنابيب شكل (6) إلى عدم وجود طول للجزء السائل في بداية الأنبوب (L<sub>liq</sub>) ووجود الجريان المشتت (LGP)، الذي يترافق بارتفاع حاد في درجة حرارة الجدار لانخفاض معامل انتقال الحرارة بسبب زوال الجريان الحلقي السائل عند الجدران (تمثل النقطة GP تحول الجريان الحلقي المشتت إلى جريان مشتت) .  
تمثل الأنابيب على الشكل (6) المنحنيين "(1 2 3)،(1 2 4)" الشكل(5).

### 3-1- النظام (O-HK):

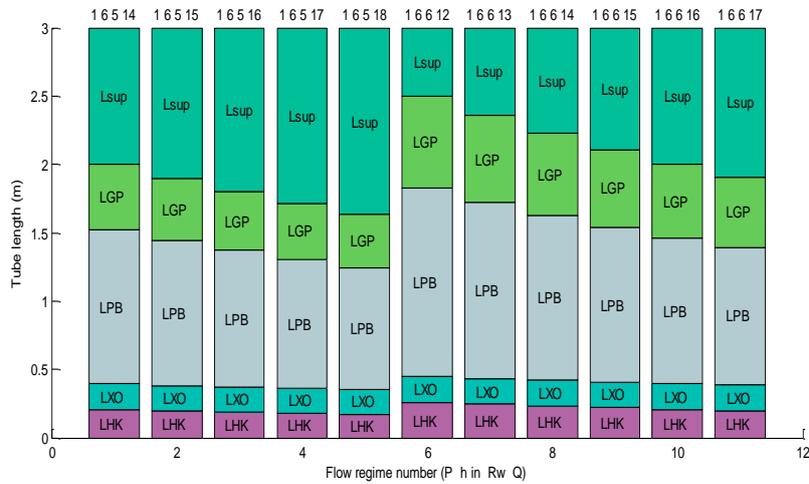
يوضح الشكل (7) علاقة هبوط الضغط بالحمل الحراري من أجل قيم للسرعة الكتلية مختلفة بثبات الضغط وإنتالبي الدخول، سلوك المنحنيات يشابه سلوك المنحنيات في النظام السابق (O-GK) ، ويلاحظ غياب طول الجزئين للسائل (L<sub>liq</sub>) ، (L<sub>GK</sub>) على الشكل (8).



الشكل (7) - تأثير الحمل الحراري على هبوط الضغط للجريان ثنائي الطور للسائل عند سرعات كتلية (R w)

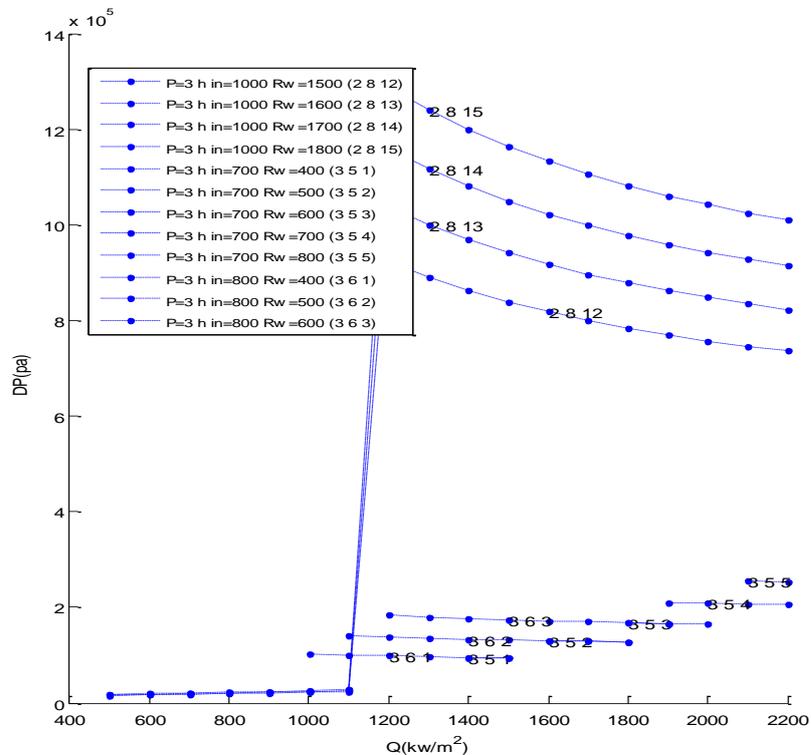
متغيرة (O-HK) ، الأرقام المبينة على المنحنيات في الشكل تمثل المتغيرات ( p ,h<sub>in</sub> , R<sub>w</sub> )

تمثل الأنابيب على الشكل (8) المنحنيين (1 6 5)، (1 6 6) على الشكل (7).



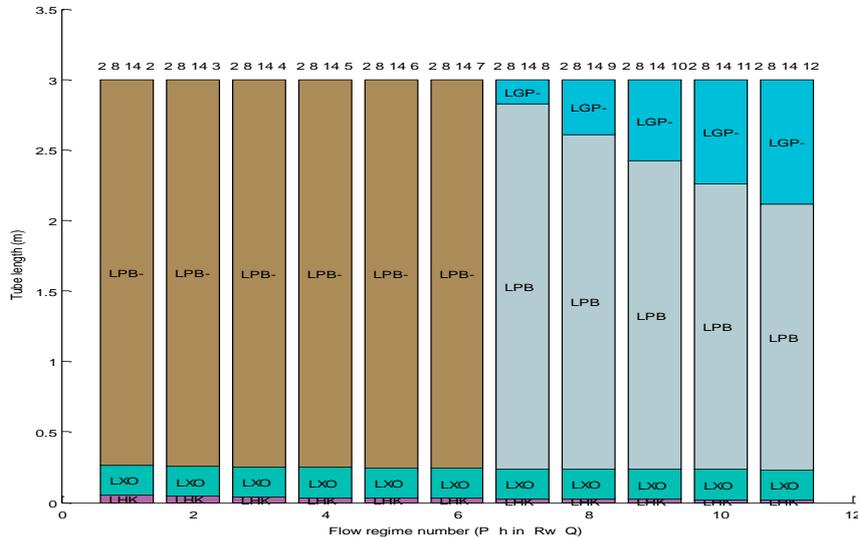
الشكل (8)- تغير أنظمة الجريان على طول الأنابيب - كل أنبوب يمثل نقطة من المنحنيات المبينة على الشكل (7) ، الأرقام المبينة على الأنابيب في الشكل تمثل المتغيرات ( p , h<sub>in</sub> , Rw , Q )

يشير الشكل (9) إلى علاقة هبوط الضغط بالحمل الحراري من أجل سرع كتلية مختلفة بثبات الضغط وإنتالبي الدخول.



الشكل (9)- تأثير الحمل الحراري على هبوط الضغط للجريان ثنائي الطور للسائل عند سرعات كتلية (R w) متغيرة (O-HK) ، الأرقام المبينة على المنحنيات في الشكل تمثل المتغيرات ( p , h<sub>in</sub> , Rw )

يلاحظ أن بعض المنحنيات "(2 8 12)، (2 8 13)، (2 8 14)، (2 8 15)" يزداد فيها هبوط الضغط بشكل حاد من أجل حمل حراري يوافق ظهور الجريان المشتت الأنابيب "(2 8 14 8)، (2 8 14 9)، (2 8 14 10)، (2 8 14 11)، (2 8 14 12)" نتيجة الانخفاض الحاد في عامل انتقال الحرارة مما يسبب ارتفاع درجة حرارة الجدار.



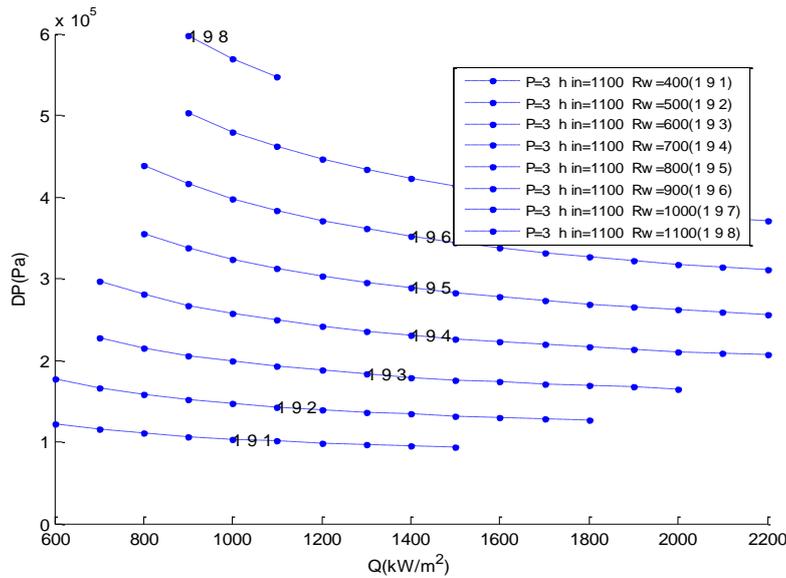
الشكل (10)- تغير أنظمة الجريان على طول الأنبوب - كل أنبوب يمثل نقطة من المنحنيات المبينة على الشكل (9)، الأرقام المبينة على الأنابيب في الشكل تمثل المتغيرات (p, h<sub>in</sub>, R<sub>w</sub>, Q)

بالنسبة للمنحنيات الأخرى "(3 5 1)، (3 5 2)، (3 5 3)، (3 5 4)، (3 5 5)" شكل (9) يبقى هبوط الضغط ثابتاً تقريباً مع زيادة الحمل الحراري، ويعمل ذلك بأن بعض المنحنيات الممثلة لها شكل خط مستقيم تقريباً، وبعضها الآخر تحتوي على جزئين بينهما تزايد حاد في هبوط الضغط، الجزء العلوي من المنحنيات، تحتوي الأنابيب فيه على جريان مشتت، أما الجزء السفلي من المنحنيات، فلا تحتوي الأنابيب فيه على جريان مشتت (GP). هذا يعني أن هبوط الضغط إذا كان خطأ مستقيماً، فقد يحتوي على جريان مشتت إذا كان مستقيماً علوياً كما في المنحنيات "(3 5 1)، (3 5 2)، (3 5 3)، (3 5 4)، (3 5 5)" وهي جزء علوي" وقد لا يحتوي على جريان مشتت إذا كان مستقيماً سفلياً الشكل (9)، الجزء السفلي من المنحني "(2 8 14)، (2 8 14 8)، (2 8 14 9)، (2 8 14 10)" شكل (10).

يلاحظ أيضاً أن زيادة السرعة الكتلية تؤدي إلى زيادة هبوط الضغط بثبات الحمل الحراري. نشير هنا إلى أن كل أنبوب على الشكل (10) يمثل نقطة من المنحني على الشكل (9).

#### 4-1- النظام (O-PB):

يوضح الشكل (11) علاقة هبوط الضغط بالحمل الحراري من أجل قيم مختلفة للسرعة الكتلية بثبات الضغط وإنتالبي الدخول. مع زيادة الحمل الحراري يتناقص هبوط الضغط بثبات السرعة الكتلية وإنتالبي الدخول، وبأخذ قيم ثابتة عند قيم مرتفعة للحمل الحراري. من أجل قيمة ثابتة للحمل الحراري، يزداد هبوط الضغط بزيادة السرعة الكتلية كما تشير المنحنيات "(1 9 1)، (1 9 2)، (1 9 3)، (1 9 4)، (1 9 5)..."



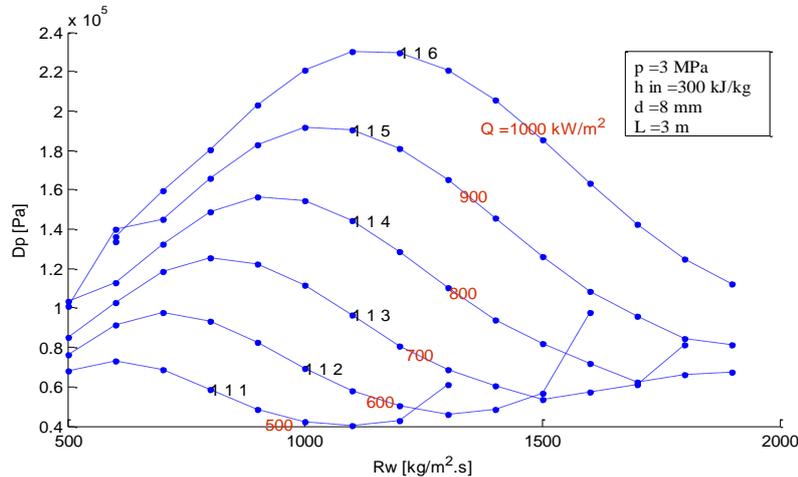
الشكل (11)- تأثير الحمل الحراري على هبوط الضغط للجريان ثنائي الطور للسائل عند سرعات كتلية

متغيرة (R w) (O-PB) ، الأرقام المبينة على المنحنيات في الشكل تمثل المتغيرات ( p ,h<sub>in</sub> , R w )

## 2- تأثير السرعة الكتلية في هبوط الضغط من أجل أحمال حرارية متغيرة:

### 1-2- النظام ( O-LI ):

يوضح الشكل (12) ، علاقة هبوط الضغط بالسرعة الكتلية عند أحمال حرارية متغيرة . يلاحظ أن العلاقة من الدرجة الثالثة، و يعدّ هذا النوع من الجريان غير مستقر [6,8]، حيث إنه بزيادة السرعة الكتلية، يزداد هبوط الضغط في البداية حتى يصل إلى قيمة عظمى، يعود بعدها للتناقص ليصل إلى قيمة دنيا، ثم يزداد من جديد .

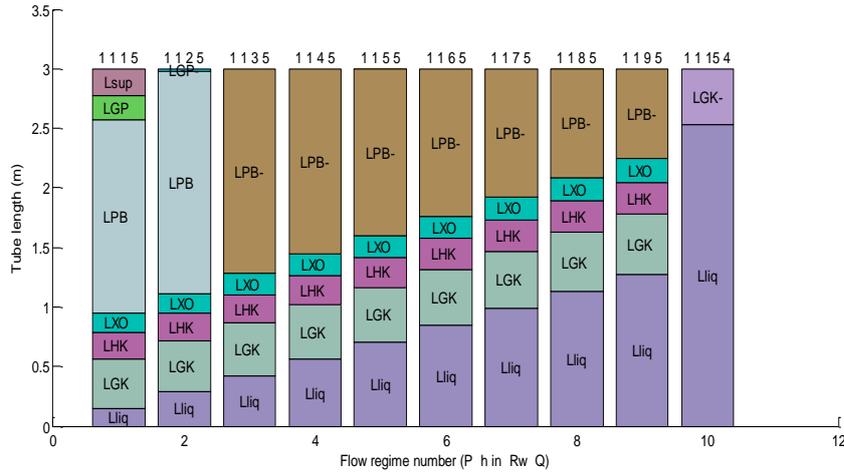


الشكل (12)- تأثير السرعة الكتلية على هبوط الضغط للجريان ثنائي الطور للسائل عند أحمال حرارية

متغيرة (Q) (O-LI) ، الأرقام المبينة على المنحنيات في الشكل تمثل المتغيرات ( p ,h<sub>in</sub> , Q )

من أجل سرعة كتلية ثابتة يزداد هبوط الضغط بزيادة الحمل الحراري .

في الشكل (13) تختلف الأنابيب " (1 1 1 5) ، ( 1 1 2 5) ، ( 1 1 3 5) ، ( 1 1 4 5) ، ( 1 1 5 5) ، ( 1 1 6 5) ، ( 1 1 7 5) ، ( 1 1 8 5) ، ( 1 1 9 5) " بالسرعة الكتلية فقط ويمثل هذه الأنابيب المنحني " (1 1 5) " شكل (12) ، بثبات ( p , h<sub>in</sub> , Q) .



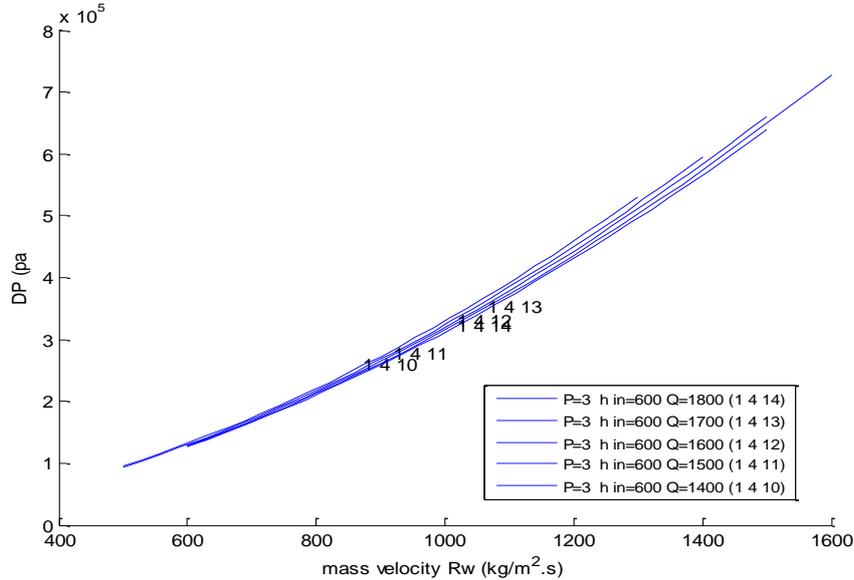
الشكل(13)- تغير أنظمة الجريان على طول الأنابيب - كل أنبوب يمثل نقطة من المنحنيات المبينة ،

الأرقام المبينة على الأنايب في الشكل تمثل المتغيرات ( p , h<sub>in</sub> , Rw , Q )

## 2-2- النظام ( O-GK ) :

يوضح الشكل (14) علاقة هبوط الضغط بالسرعة الكتلية، المنحني من الدرجة الثانية". يزداد هبوط الضغط بزيادة السرعة الكتلية بثبات قيم الضغط وإنتالبي الدخول والحمل الحراري، المنحنيات " (1 4 11)، (1 4 10)، (1 4 12)، (1 4 13)، (1 4 14)". عند قيمة ثابتة للسرعة الكتلية ، يزداد هبوط الضغط بثبات بقية البارامترات ولكن مقدار الزيادة في الضغط ضئيل للغاية ، خاصة عند قيم منخفضة للسرعة الكتلية .

نشير إلى أن النظام O-HK يشابه تماماً النظام O-GK

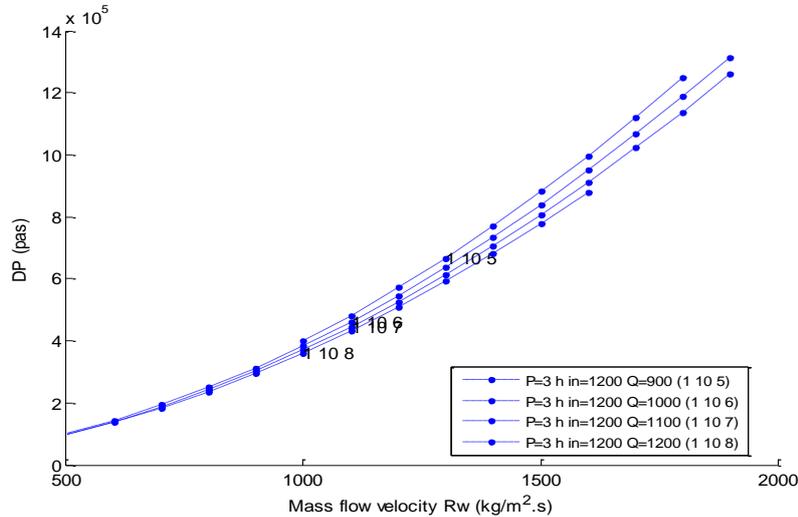


الشكل (14) - تأثير السرعة الكتلية على هبوط الضغط للجريان ثنائي الطور للسائل عند أحمال حرارية ( Q )

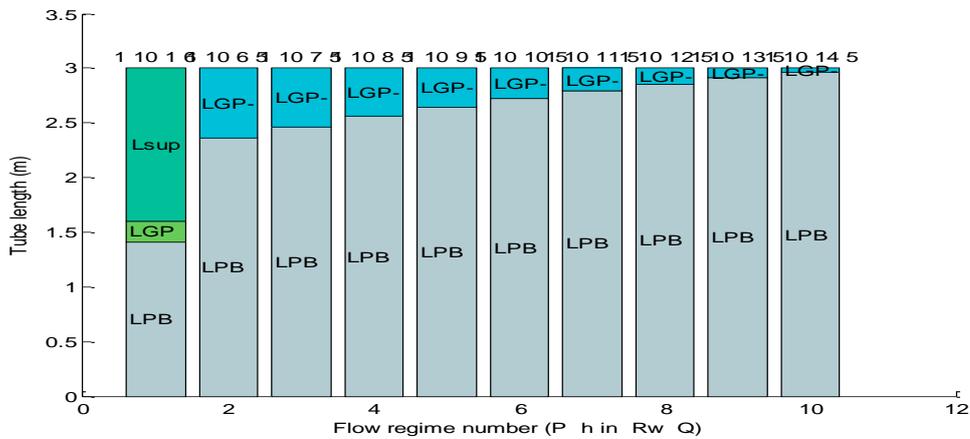
متغيرة (O-GK)، الأرقام المبينة على المنحنيات في الشكل تمثل المتغيرات ( p , h<sub>in</sub> , Q )

### 3-2- النظام ( O-PB ) :

يوضح الشكل (15) علاقة هبوط الضغط بالسرعة الكتلية، ولا يلاحظ اختلاف في هذه العلاقة عما وجدناه في النظام (O-GK).



الشكل (15) - تأثير السرعة الكتلية على هبوط الضغط للجريان ثنائي الطور للسائل عند أحمال حرارية ( Q ) متغيرة (O-PB) ، الأرقام المبينة على المنحنيات في الشكل تمثل المتغيرات ( p , h<sub>in</sub> , Q )

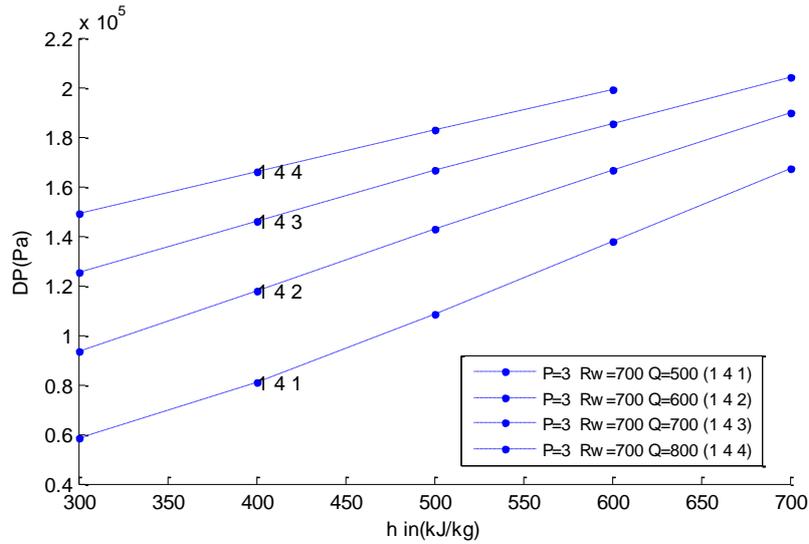


الشكل (16) - تغير أنظمة الجريان على طول الأنابيب - كل أنبوب يمثل نقطة من المنحنيات المبينة على الشكل (15) ، الأرقام المبينة على الأنابيب في الشكل تمثل المتغيرات ( p , h<sub>in</sub> , Rw , Q )

### 3- تأثير إنتالبي الدخول في هبوط الضغط بثبات المتغيرات الأخرى :

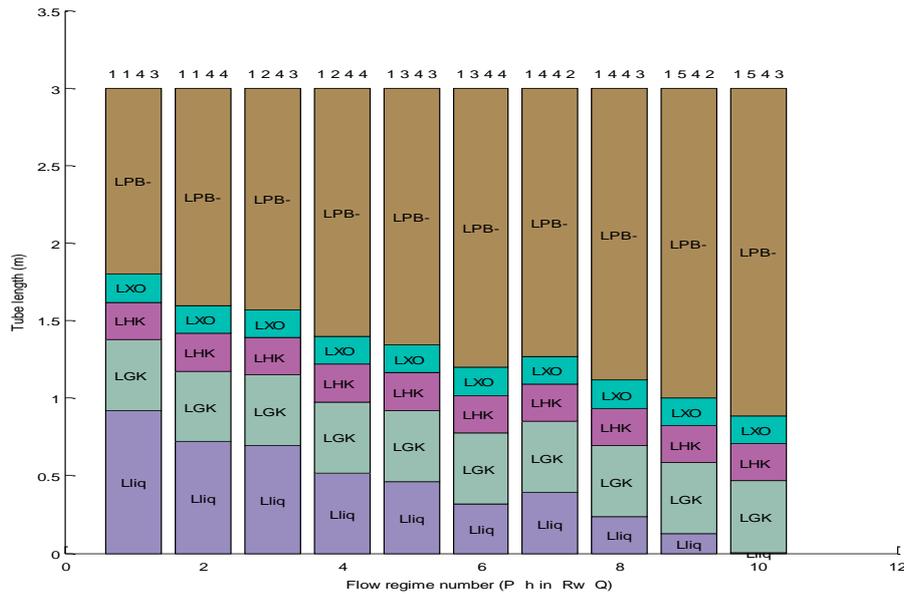
#### 1-3- النظام ( O-LI ) :

يوضح الشكل (17) ، علاقة هبوط الضغط بإنتالبي الدخول من أجل أحمال حرارية مختلفة ، يتضح أن العلاقة بينهما خطية ، حيث يزداد هبوط الضغط بزيادة إنتالبي الدخول، المنحنيات (1 4 1)، (1 4 2)، (1 4 3)، (1 4 4) " من أجل إنتالبي دخول ثابت يزداد هبوط الضغط بزيادة الحمل الحراري .وللحصول على هبوط ضغط ثابت مع زيادة إنتالبي الدخول يجب تخفيض الحمل الحراري. تتقارب المستقيمات مع زيادة إنتالبي الدخول.



الشكل (17)- تأثير إنتالبي الدخول على هبوط الضغط عند أحمال حرارية متغيرة من أجل النظام (O-LI) ، الأرقام المبيّنة على المنحنيات في الشكل تمثل المتغيرات ( p ,Rw , Q )

الأنابيب على الشكل (18) ، ممثلة بالمستقيمات " (1 4 2) ، (1 4 3) ، (1 4 4) " على الشكل (17)

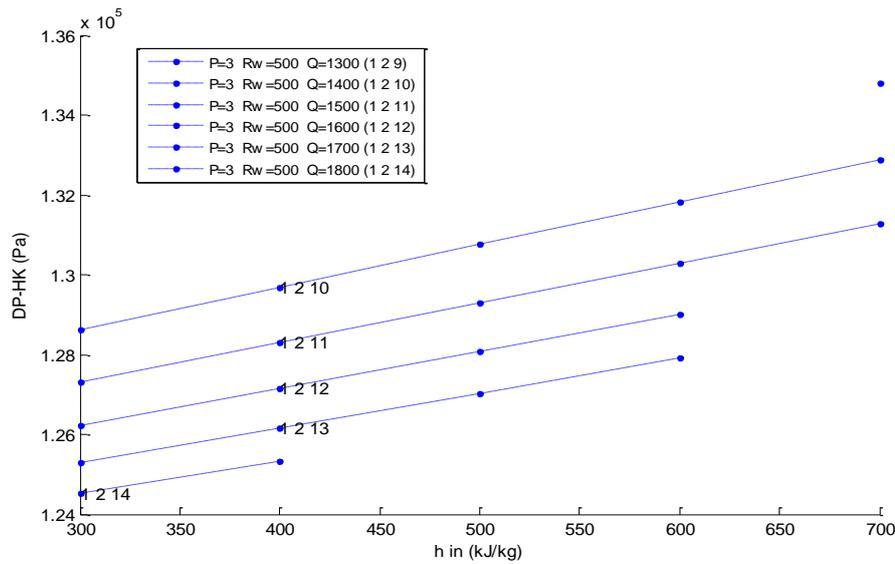


الشكل (18)- تغير أنظمة الجريان على طول الأنابيب كل أنبوب يمثل نقطة من المنحنيات المبيّنة على

الشكل (17) ، الأرقام المبيّنة على الأنابيب في الشكل تمثل المتغيرات ( p ,h<sub>in</sub> , Rw , Q )

### 2-3- النظام (O-GK) :

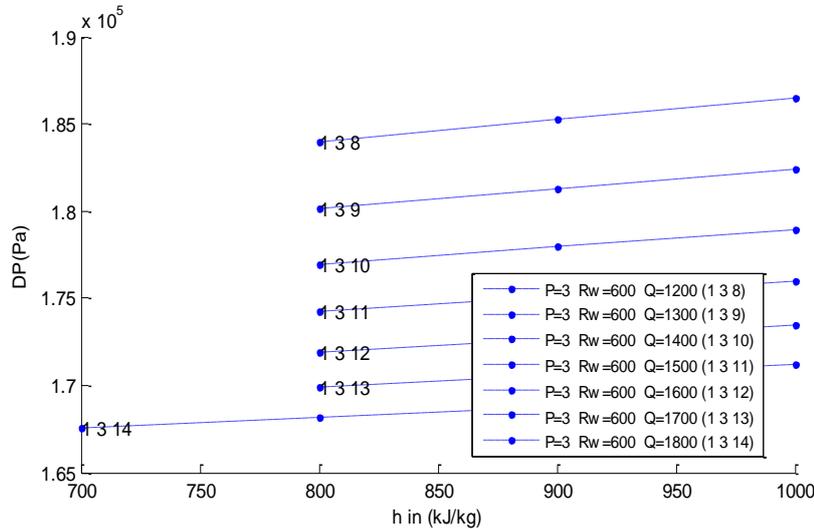
يوضح الشكل (19) ، علاقة هبوط الضغط بإنتالبي الدخول من أجل أحمال حرارية مختلفة ، واضح أن العلاقة خطية ، حيث يزداد هبوط الضغط بزيادة إنتالبي الدخول المستقيمات " (1 2 10) ، (1 2 11) ، (1 2 12) ، (1 2 13) ، (1 2 14) ". من أجل إنتالبي دخول ثابت يزداد هبوط الضغط بتناقص الحمل الحراري .



الشكل (19)- تأثير إنتالبي الدخول على هبوط الضغط عند أحمال حرارية متغيرة من أجل النظام (O-GK) ، الأرقام المبينة على المنحنيات في الشكل تمثل المتغيرات ( p , Rw , Q )

### 3-3- النظام ( O-HK ) :

يوضح الشكل (20) ، علاقة هبوط الضغط بإنتالبي الدخول من أجل أحمال حرارية مختلفة خطية، حيث يزداد هبوط الضغط بزيادة إنتالبي الدخول " (1 3 8) ، (1 3 9) ، (1 3 10) ، (1 3 11) ، (1 3 12) ، (1 3 13) ، (1 3 14) ". من أجل إنتالبي دخول ثابت، يتناقص هبوط الضغط بزيادة الحمل الحراري.

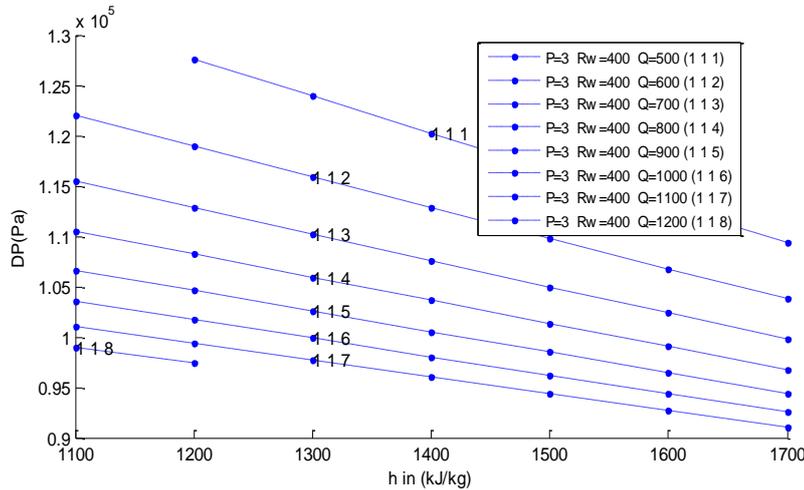


الشكل (20)- تأثير إنتالبي الدخول على هبوط الضغط عند أحمال حرارية متغيرة من أجل النظام (O-HK) ، الأرقام المبينة على المنحنيات في الشكل تمثل المتغيرات ( p , Rw , Q )

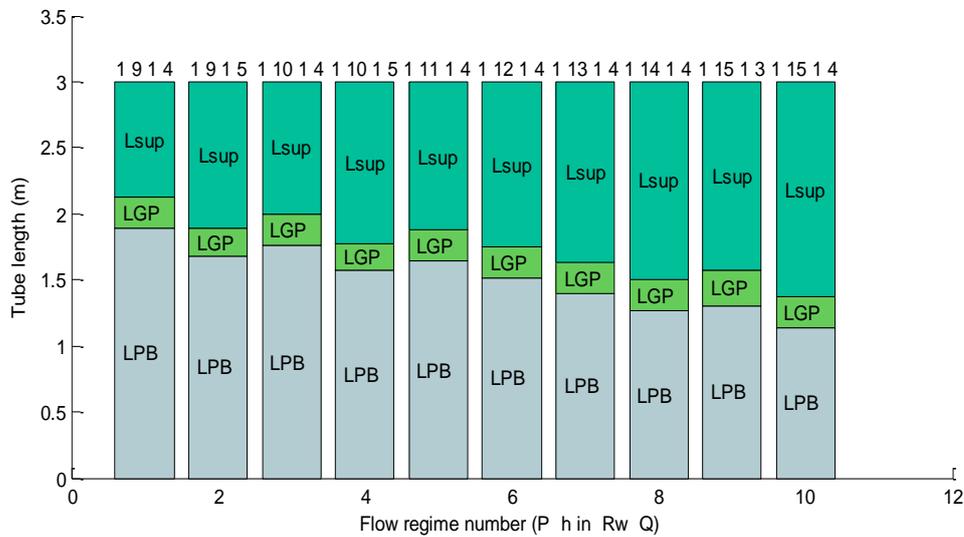
### 4-3- النظام ( O-PB ) :

يوضح الشكل (21) ، علاقة هبوط الضغط بإنتالبي الدخول من أجل أحمال حرارية مختلفة. ينضح أن العلاقة خطية ، حيث يتناقص هبوط الضغط بزيادة إنتالبي الدخول " (1 1 1) ، (1 1 2) ، (1 1 3) ، (1 1 4) ، (1 1 5) ، (1 1 6) ، (1 1 7) ، (1 1 8) " خلافاً لما هو الحال عليه في الأنظمة السابقة . من أجل إنتالبي دخول ثابت

يتناقص هبوط الضغط بزيادة الحمل الحراري، كما يتناقص الحمل الحراري مع زيادة إنتالبي الدخول بثبات هبوط الضغط، ويعزى تناقص هبوط الضغط في هذا النظام مع زيادة إنتالبي الدخول إلى وجود الأطوال: الجزء المتوازن  $L_{PB}$ ، الجزء المشتت  $L_{GP}$ ، والجزء المحمص  $L_{SUP}$ ، حيث نسبة البخار مرتفعة وتترايد باتجاه مخرج الأنبوب لتصل أخيراً حالة الطور البخاري الواحد، منتقلة من النظام ثنائي الطور، مما يسبب تناقصاً في هبوط الضغط الشكل (22).



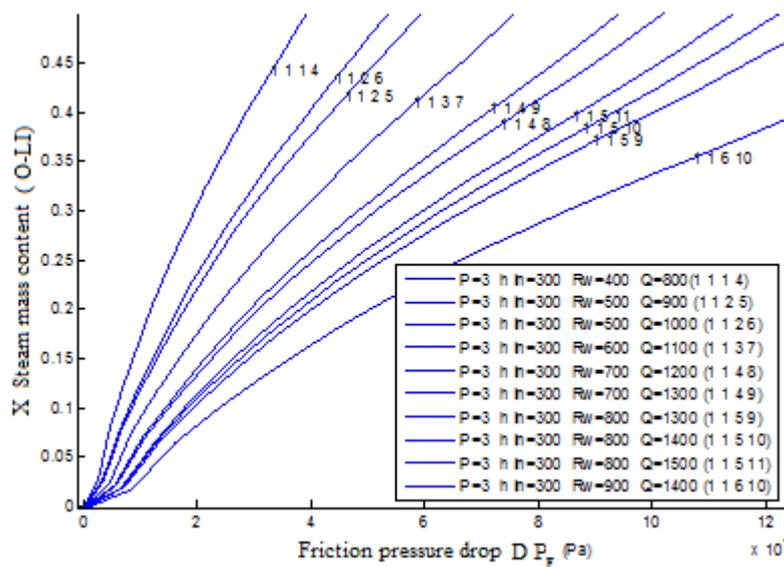
الشكل (21)- تأثير إنتالبي الدخول على هبوط الضغط عند أحمال حرارية متغيرة من أجل النظام (O-PB)، الأرقام المبينة على المنحنيات في الشكل تمثل المتغيرات (p, Rw, Q)



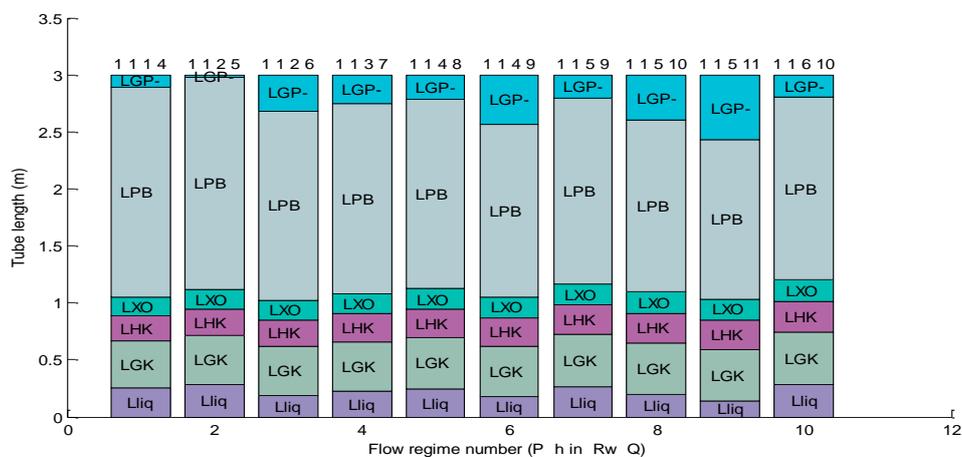
الشكل (22)- تغير أنظمة الجريان على طول الأنبوب - كل أنبوب يمثل نقطة من المنحنيات المبينة على الشكل (21)، الأرقام المبينة على الأنابيب في الشكل تمثل المتغيرات (p, h<sub>in</sub>, Rw, Q)

#### 4- تأثير محتوى البخار الكتلي $x$ على هبوط الضغط بالاحتكاك $\Delta p_T$ :

يبين الشكل (23) علاقة هبوط الضغط الناتج عن الاحتكاك بمحتوى البخار الكتلي على طول الأنبوب بثبات إنتالبي الدخول والضغط وذلك من أجل سرعات كتلية مختلفة" (1 1 4 9)،(1 1 5 9) " وكذلك من أجل أحمال حرارية مختلفة" (1 1 5 9)،(1 1 5 10)،(1 1 5 11) ، ، يلاحظ ازدياد هبوط الضغط بالاحتكاك، بزيادة محتوى البخار الكتلي بثبات السرعة الكتلية والحمل الحراري وإنتالبي الدخول . من أجل قيمة معينة لمحتوى البخار الكتلي التدفقي يلاحظ ازدياد هبوط الضغط بالاحتكاك بتناقص الحمل الحراري (من أجل محتوى ضئيل للبخار يكون التغير في هبوط الضغط صغيراً، ومع زيادة محتوى البخار الكتلي يزداد التغير في هبوط الضغط ) . الشكل العام للمنحني مشابه للمنحنيات المعروفة [5] .



الشكل(23)- تأثير محتوى البخار في هبوط الضغط من أجل قيم مختلفة للسرعة الكتلية والحمل الحراري، الأرقام المبينة على المنحنيات في الشكل تمثل المتغيرات (  $p$  ,  $h_{in}$  ,  $Rw$  )



الشكل(24)- تغير أنظمة الجريان على طول الأنابيب كل أنبوب يمثل نقطة من المنحنيات المبينة على الشكل (23)

، الأرقام المبينة على الأنابيب في الشكل تمثل المتغيرات (  $p$  ,  $h_{in}$  ,  $Rw$  ,  $Q$  )

يلاحظ أنه عند قيمة معينة لمحتوى البخار الكتلي ازدياد هبوط الضغط بالاحتكاك بتزايد السرعة الكتلية .  
تمثل الأنابيب " (1 1 5 9)، (1 1 5 10)، (1 1 5 11) " على الشكل (24) المنحنيات الموافقة على الشكل (23) وكذلك الأنابيب الأخرى.

### النتائج:

1- علاقة هبوط الضغط بالسرعة الكتلية من الدرجة الثانية. تؤدي زيادة السرعة الكتلية إلى زيادة هبوط الضغط من أجل جميع الأنظمة (GK, HK, PB)، باستثناء النظام LI بسبب وجود الجزء السائل في بداية الأنبوب.

2- علاقة هبوط الضغط بإنتالبي الدخول خطية، يزداد هبوط الضغط بزيادة إنتالبي الدخول من أجل الأنظمة (LI, GK, HK)، بينما يتناقص هبوط الضغط مع زيادة إنتالبي الدخول من أجل النظام PB، وتكون منحنيات هبوط الضغط مستقيمات متقاربة مع زيادة إنتالبي الدخول من أجل النظام LI، بينما تكون متوازية من أجل الأنظمة (GK, HK, PB).

3- علاقة هبوط الضغط الناشئ عن الاحتكاك بمحتوى البخار الكتلي ، من الدرجة الثالثة من أجل النظام O-LI ، الشكل (23)، حيث يلاحظ ازدياد هبوط الضغط بالاحتكاك بزيادة محتوى البخار الكتلي بثبات السرعة الكتلية والحمل الحراري وإنتالبي الدخول . من أجل قيمة معينة لمحتوى البخار الكتلي، يلاحظ ازدياد هبوط الضغط بالاحتكاك بتناقص الحمل الحراري (من أجل محتوى ضئيل للبخار ، يكون التغير في هبوط الضغط صغيراً، ويزداد مع زيادة محتوى البخار الكتلي)، كما يلاحظ أنه من أجل قيمة معينة لمحتوى البخار الكتلي، ازدياد هبوط الضغط بالاحتكاك بتزايد السرعة الكتلية .

4- تم في هذا البحث الاستفادة من المعادلات التجريبية للجريان ثنائي الطور في تحديد أنظمة الغليان والجريان في الأنبوب المولد للبخار .

5- تم إنشاء برنامج بلغة Matlab لتحديد أنظمة الغليان والجريان لثنائي الطور في الأنابيب، ومن ثم حساب هبوط الضغط في الأنابيب الناتج عن الاحتكاك، فرق الارتفاع، التسارع . لم تؤخذ بالحسبان الضياعات الموضعية للضغط لعدم وجود ضياعات موضعية في الأنبوب المولد للبخار المدروس (يمكن أخذه بالحسبان حين وجوده).

### الاستنتاجات والتوصيات:

بإلقاء نظرة تحليلية على ما ورد آنفاً يتبين:

1- أظهرت علاقة هبوط الضغط بالسرعة الكتلية في بعض المنحنيات وجود جزء هابط (منحني من الدرجة الثالثة)، مرتبط في الغالب بوجود الجزء السائل في بداية الأنبوب، حيث الجريان غير مستقر ستاتيكياً وهو غير مسموح به في الجريانات ثنائية الطور، مما يدل على مساهمة الجزء السائل الموجود في بداية الأنبوب  $L_{iq}$ ، بالإضافة إلى التأثيرات المتبادلة للمتغيرات ( $P, h_{in}, R_w, Q, D, L$ ) في عدم الاستقرار .

2- يؤدي وجود بداية المنطقة GP، التي تدل على بداية تحول الجريان من حلقي مشنت إلى مشنت، إلى ارتفاع حاد في هبوط الضغط، ويعود سبب ذلك إلى تلاشي الحلقة السائلة الملامسة لجدار الأنبوب وتحولها

إلى بخار، مما يؤدي إلى انخفاض معامل انتقال الحرارة وارتفاع درجة حرارة الأنبوب بشكل حاد عند هذه النقطة، مما يتسبب في الزيادة الحادة في هبوط الضغط.

3- يدل وجود الجزء  $L_{liq}$  في علاقة هبوط الضغط بالحمل الحراري، على تزايد هبوط الضغط مع زيادة الحمل الحراري وفق خط شبه مستقيم، وعند ظهور الجريان المشتمت، يثبت مقدار هبوط الضغط حتى مخرج الأنبوب، في حين أنه بغياب الجزء  $L_{liq}$  يكون تزايد هبوط الضغط مع زيادة الحمل الحراري حاداً (قفزة) بوجود الجزء  $L_{GP}$ ، في هذه الحالة المنحني يحتوي على جزأين بينهما تزايد حاد مرتبط بوجود  $L_{GP}$ ، في الجزء السفلي من المنحني يكون تزايد هبوط الضغط طفيفاً، وفي الجزء العلوي يحدث تناقص في هبوط الضغط، ويكون هذا التناقص أكبر بوجود طول الجزء المحمص  $L_{SUP}$ ، وهذا يفسر بانتقال الجريان من ثنائي الطور إلى أحادي الطور (بخار)، حيث هبوط الضغط أقل.

هذه الظاهرة، مرتبطة بتغير بنية الجريان ثنائي الطور [1].

مما ورد أعلاه نبين ضرورة تطوير الأبحاث في هذا الاتجاه لإظهار حدود عدم الاستقرار، الممكنة في الجريان ثنائي الطور في الأنابيب الشاقولية باتجاه الأعلى، المرتبطة بظهور علاقة من الدرجة الثالثة بين هبوط الضغط والسرعة الكتلية، عن طريق فهم آلية ظهور عدم الاستقرار، ليتسنى إمكانية التحكم في الجريان لتفادي الجريانات غير المستقرة، على الرغم من أن عدم الاستقرار هذا، يمكن تفاديه، بحسب المراجع المختلفة [6,7]، بوضع مقاومة هيدروليكية عند مخرج الأنبوب، لكننا نعتقد أن هذا التدبير، الذي قد تكون له آثار جانبية سلبية خاصة في حالة الأعطال في المفاعلات النووية (انقطاع التيار الكهربائي عن المضخة الرئيسية وأعطال أخرى)، حيث من الضروري الانتقال إلى الجريان الطبيعي الحر (فرق الكثافة)، وفي هذه الحالة يعيق وجود المقاومة الهيدروليكية عند مخرج الأنبوب الانتقال إلى الجريان الحر في وقت حرج، لذا يفضل الوقاية من حدوث الجريان غير المستقر وتفاديه.

### المراجع:

1. DELHAYE J.M.,GIOT M.,RIETHMULLER M.L.; Thermohydraulics of Two-Phase Systems for Industrial Design and Nuclear Engineering- Hemisphere publishing corporation, McGraw-Hill Book Company. 1981,421.
2. GHIAASIAAN, M. S. *Two-Phase Flow, Boiling and Condensation in conventional and miniature systems*. First ed., Cambridge University Press-2008, 613.
3. PETUKHOV B.C.; GENIN L.G.; KOVALEOV S.A.; *Heat Transfer in Nuclear Power Units*, Power Atom Press Moscow, 1986,470.
4. SAITOH, S., DYGUJI, H. and HIHARA, E., Effect of tube diameter on boiling heat transfer of R-134a in horizontal small-diameter tubes, Int. J. H and M Trans., 2005,Vol. 48, pp. 4973 -4984
5. DEMENTEV, B. A. *Nuclear Power Reactors*, Power Atom Press-Moscow 1984, 279 .
6. KERELOV, P. L.; YOURYVE Y.S.; BOBKOV B.P. *Handbook in Thermo-Hydraulic Calculations (Nuclear Reactors; Heat Exchangers; Steam Generators)*, Power Atom Press Moscow. 1984,296.
7. GRIGORIEV, V.A.; ZORIN V.M. *Atomic Thermal Electric Stations; Handbook*, Energy Press, Moscow, 1982,624.
8. FEODOROV L. N.; RASSOKHIN G. *Steam Generation Processes in Atomic*
9. *Electro Stations*, Power Atom Press, Moscow. 1985,287.

### الرموز والمصطلحات:

- GK - غليان سطحي  
HK - غليان سطحي متقدم  
XO - غليان حجمي  
PB - غليان متوازن  
GP - جريان مشتت (تحول الجريان الحلقي المشتت إلى مشتت)  
X<sub>1</sub> - بخار مشبع  
sup - بخار محمص  
O-LI نظام يبدأ فيه الأنبوب بالسائل  $L_{liq}$   
O-GK نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء  $L_{GK}$ ، "الغليان السطحي".  
O-HK نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء  $L_{HK}$  "الغليان السطحي المتقدم".  
O-XO نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء  $L_{XO}$  "الغليان الحجمي"  
O-PB نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء  $L_{PB}$  "الغليان المتوازن".  
O-GP نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء  $L_{GP}$  "نقطة تحول الجريان الحلقي المشتت إلى مشتت".  
O-XI نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء  $L_{SUP}$  "البخار المحمص".