

تأثير الكثافة الحرارية في تحديد أطوال أنظمة الغليان والجريان ثنائي الطور لأنبوب شاقولي مسخن

حسان حلواني

قسم الهندسة النووية، كلية الهندسة الميكانيكية، جامعة حلب

الملخص

تمت دراسة تأثير تغير الكثافة الحرارية في أطوال أنظمة الغليان والجريان ثنائي الطور على طول الأنبوب المولد للبخر لجريان قسري ثنائي الطور منتظم التسخين باتجاه الأعلى عند سرعة كتلية ثابتة، وذلك بعد تحديد أنظمة الغليان والجريان السائدة فيه، باستخدام معادلات تجريبية، وإنشاء خوارزمية توصف نظام الجريان وتحسب المتغيرات على طول الأنبوب لمختلف أنظمة الغليان والجريان السائدة فيه باستخدام لغة الـ Matlab وتُساعد في التنبؤ بهذه الأنظمة. أظهرت النتائج تناقص في طول الجزء المائي وطول الغليان السطحي مع زيادة الكثافة الحرارية عند سرعة كتلية ثابتة وبثبات الضغط وانتالبي الدخول وفق علاقة من الدرجة الثانية، بينما يلاحظ تزايد في طول جزء الغليان السطحي المتطور، أيضاً وفق علاقة من الدرجة الثانية، في حين يبقى طول الغليان الحجمي ثابتاً، كما يلاحظ تزايد طول جزء الغليان المتوازن مع زيادة السرعة الكتلية وفق علاقة من الدرجة الثانية، ومن أجل المجالات المرتفعة لقيم الكثافة الحرارية والسرعات الكتلية، يلاحظ انخفاض مقدار الزيادة في الكثافة الحرارية والسرعة الكتلية اللازمين لتحقيق نفس طول الغليان المتوازن مقارنة مع مجال القيم المنخفضة. تم صياغة التطور اللاحق للأبحاث، التي تمكن من وضع نموذج للجريان ثنائي الطور مناسب يعتمد على الدراسات التجريبية.

الكلمات المفتاحية: ثنائي الطور، الكثافة الحرارية، السرعة الكتلية، الغليان السطحي، الغليان السطحي المتطور، الغليان الحجمي، الغليان المتوازن.

ورد البحث للمجلة بتاريخ 2021/5/18

قبل للنشر بتاريخ 2021/9/7

The Effect of Thermal Density in Determining the Lengths of the Two-Phase Boiling and Flow Systems of a Heated Vertical Tube

Hassan Halwani

Dept. of Nuclear Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Aleppo.

Abstract:

In this paper, the effect of thermal density change on the lengths of boiling and two-phase flow systems along the steam-generating tube of a uniformly heated two-phase forced flow upward at a constant mass velocity was studied. This was done after determining the predominant boiling and flowing systems in it, using empirical equations, and creating an algorithm describing flow system and calculating the variables along the tube for the different boiling and flowing systems predominant in it using Matlab language to help predict these systems. The results showed that the decrease in the lengths of the water fraction and the surface boiling fraction with increasing the thermal density at a constant mass velocity with the constant of the pressure and entrance enthalpy is according to second-order curves. The increase in the length of the advanced surface boiling is also according to second-order curves, while the length of volumetric boiling stayed constant. It is also noted that the length of the balanced boiling fraction increases with increasing the thermal density according to a second-order relationship. The subsequent development of the research has been formulated, enabling the selection of suitable lengths of different systems to meet the different needs in the industry that uses two-phase flow to benefit from their advantages in terms of heat transfer intensity, pressure drop, and critical thermal current reserves.

Key words: two-phase, mass velocity, surface boiling, advanced surface boiling, volumetric boiling, balanced boiling.

Received 18/5/2021

Accepted 7/9/2021

الرموز والمصطلحات:

GK - نقطة بداية الغليان السطحي HK - نقطة بداية الغليان السطحي المتقدم

XO - نقطة بداية الغليان الحجمي PB - نقطة بداية الغليان المتوازن

GP - نقطة بداية الجريان المشتت (تحول الجريان الحلقي المشتت إلى مشتت).

X₁ - نقطة بداية البخار المشبع.

أطوال أنظمة الغليان والجريان في الأنابيب:

L_{GK} - طول الجزء المائي من مدخل الأنبوب حتى نقطة بداية الغليان السطحي GK .

L_{HK} - طول جزء الغليان السطحي في الأنبوب يبدأ من النقطة GK حتى HK .

L_{XO} - طول جزء الغليان السطحي المتقدم في الأنبوب يبدأ من النقطة HK حتى

XO .

L_{PB} - طول جزء الغليان الحجمي في الأنبوب يبدأ من النقطة XO حتى PB .

L_{GP} - طول جزء الغليان المتوازن في الأنبوب يبدأ من النقطة XO حتى PB .

L_{X1} - طول جزء الجريان المشتت في الأنبوب يبدأ من النقطة GP حتى X₁ .

الأرقام المبينة ضمن أقواس فوق الأنابيب وعلى المنحنيات في النتائج للأشكال تمثل

(P h_{in} R_w Q)، حيث:

الرقم الأول (1): ضغط الدخول وقيمته ثابتة $P = 3 \text{ MPa}$ في البرنامج.

الرقم الثاني (1÷15): إنتالبي الدخول وقيمته $h_{in} = (300 - 1700) \text{ kJ/kg}$ ،
بقفزة 100.

الرقم الثالث (1÷15): السرعة الكتلية وقيمته $\rho w = (400 - 1800) \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ ،
بقفزة 100.

الرقم الرابع (1÷20): الكثافة الحرارية وقيمته $Q \cdot = (500 - 2400) \text{ kW / m}^2$ ،
بقفزة 100.

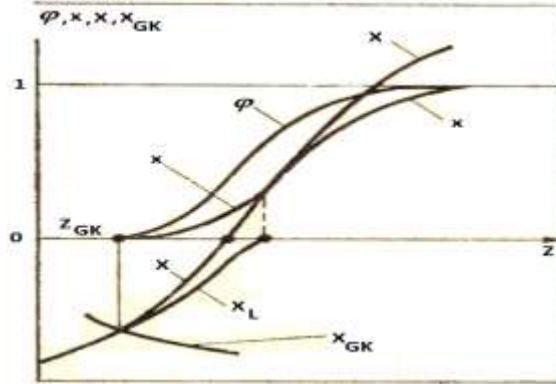
1. المقدمة:

تعتبر أنظمة الجريان ثنائي الطور من أكثر المواضيع غموضاً وصعوبة، وقد

استمرت دراستها لعدة عقود، ولا تصف طرق التنبؤ الحالية بدقة أنظمة الجريان [1,2] ، وتتبع الصعوبة من ظهور تغيرات متنوعة للغاية في بنية وتشكيل مزيج السائل- البخار تقود إلى تغيرات بنيوية . لذا فان معرفة أنظمة الجريان ثنائي الطور هي بالغة الأهمية، فهي تختلف عن قرينتها في الجريان أحادي الطور، وهي السبب الأهم لحل أي مشكلة تحصل في هذا النوع من الجريان [3]. من أجل النمذجة الأكثر دقةً للظواهر الفيزيائية في الجريانات ثنائية الطور، من الضروري معرفة أنظمة هذه الجريانات، فلا يمكن على سبيل المثال وصف الجريان الفقاعي والحلقي بدقة جيدة بمساعدة نفس النموذج، ومن الأفضل استعمال نماذج مختلفة، الا أن الحصول على هذه النماذج يتعقد بوجود المنطقة الانتقالية بين النظامين والمعرفة غير الكافية لفيزيائية هذه المناطق الانتقالية [1]. تتعقد السمة العشوائية لكل بنية، كون الجريانات ثنائية الطور لا تعتبر بالكامل متطورة. ان انتشار الطور البخاري مرتبط عملياً بهبوط الضغط في الأنبوب، ويمكن أن يؤدي الى تغير نظام الجريان، على سبيل المثال: انتقال الجريان الفقاعي الى قذائفي. يضاف إلى هذا التعقيد مجموعة البارامترات المؤثرة في أنظمة الجريان مثل الضغط، انتالبي الدخول، السرعة الكتلية، الكثافة الحرارية، قطر الأنبوب، طول الأنبوب، نوعية السائل، وضعية الأنبوب...إلخ. إن وجود هذه المتغيرات يؤدي إلى تغير في ظهور أو غياب بعض هذه الأنظمة، إلى تغير التسلسل، تغير أطوال هذه الأنظمة، وجود أنظمة سائدة [4,5,6,7]. كل ما ذكر يصعب من وضع حتى نماذج للجريان بعينها، لذا كان لابد لحل المسائل المتعلقة بهذه الجريانات من اللجوء إلى التجارب العملية والتي بطبيعة الحال تملك صعوبات مرتبطة بمحدودية تطبيقها إلا في المجالات من البارامترات التي أجريت فيها، وكثرة هذه التجارب، والمرتبطة بكثرة المتحولات سواء للجريان ثنائي الطور، أو للعوامل المؤثرة في الجريان. أحد الحلول المساعدة هو إنشاء برمجية في بيئة الـ Matlab للاستفادة من المعادلات التجريبية عن طريق تغيير المتحولات برمجياً، ضمن حدود تطبيق هذه المعادلات لدراسة تغير هذه المتحولات وتأثيرها في صياغة أنظمة الجريان، وهو ما تم اللجوء إليه في هذا البحث. الكثافة الحرارية هي أحد العوامل

المؤثرة والهامة في صياغة أنظمة الجريان والغليان، وهي تؤثر في ظهور الطور البخاري وتطوره، والذي بدوره يحدد نظام الجريان والغليان، وبالتالي فإن دراسة تأثير الكثافة الحرارية في تحديد أطوال أنظمة الجريان والغليان هو موضوع جوهري. إن محتوى البخار x عند مدخل قناة التبخير يكون مساوياً للصفر، حيث الناقل الحراري غير مسخن حتى درجة حرارة الاشباع، وعند وصول درجة حرارة الجدار إلى درجة حرارة تتجاوز بعض الشيء درجة حرارة الاشباع، يبدأ الغليان السطحي. تتشكل فقاعات البخار على سطح جدار التسخين والتي، عندما تتفصل عن سطح التسخين، تتكاثف في تيار الناقل الحراري غير المسخن حتى درجة حرارة الاشباع تزداد درجة حرارة الجدار المسخن تبعاً لحركة الناقل الحراري عبر القناة، تزداد نتيجة لذلك شدة الغليان السطحي ويزداد محتوى البخار.

يبين الشكل (1) تغير الانتالبي النسبي للتيار X ، الانتالبي النسبي للطور السائل X_L ، الانتالبي النسبي للماء على حدود الغليان السطحي X_{GK} ، المحتوى البخاري الحقيقي ϕ ، المحتوى البخاري الكتلي للتيار x كتابع لارتفاع قناة التسخين Z [8].



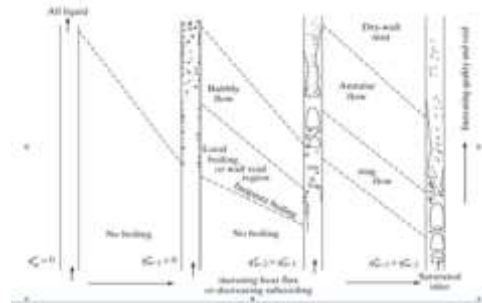
الشكل (1) - تغير بارامترات التيار ثنائي الطور على طول قناة التسخين [8]

يتميز جريان المزيج ثنائي الطور في الأنبوب ببنى مختلفة على شكل فقاعات، قذائف وأغشية، التي لا يُعطى شكلها دائماً تحديد واضح، مما يعيق الوصف الدقيق والموضوعي لأنظمة الجريان. تُعطى للجريانات الصفحية والمضطربة في التيارات أحادية الطور، نماذج متنوعة [1]. يمكن أن توصف التيارات الصفحية بقيم لحظية، بإيجاد حلول لمعادلات نافي - ستوكس، في حين أن التيارات المضطربة

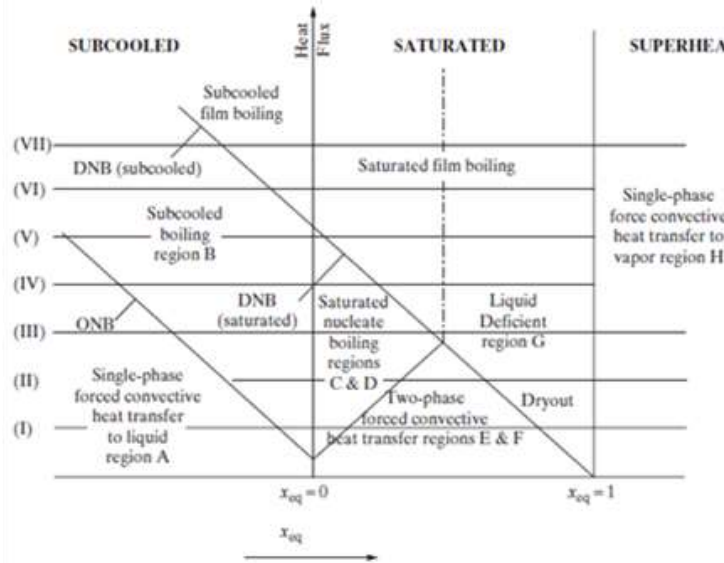
توصّف بقيم متوسطة مع الزمن أو إحصائياً بقيم متوسطة، تُمثّل مع بعضها حل لجملة معادلات رينولدز بحيث تصبح قابلة للحل. بطريقة مشابهة من أجل النمذجة الأدق للظاهرة الفيزيائية في التيارات ثنائية الطور، يلزم معرفة أنظمة هذه الجريانات. لا يمكن وصف الجريانات الفقاعية والحلقية بدقة جيدة بمساعدة نفس النموذج، لذلك الأفضل استخدام نماذج مختلفة، إلا أن الحصول عليها يصعب في المنطقة الانتقالية بين نظامين للجريان وعدم كفاية التحليل الفيزيائي لوصف المناطق الانتقالية. تتعدّد الصفة العشوائية لكل بنية لأن التيارات ثنائية الطور تعتبر بشكل عام غير متطورة بالكامل [1]، ويرتبط انتشار الطور الغازي بهبوط الضغط عبر الأنبوب، ويمكن أن يؤدي إلى تغيير نظام الجريان، كما هو في حال انتقال الجريان الفقاعي إلى قذافي.

2. أنظمة الغليان في الجريان ذو الحركة الموجهة:

تعتبر عملية الغليان في الأنابيب بالجريان الموجه أكثر صعوبة من الغليان الحر، نظراً للعلاقة الوثيقة بين العمليات الهيدروديناميكية وعمليات انتقال الحرارة بالغليان. العلاقة بين الطورين وأنظمة انتقال الحرارة بالغليان، تحدث على طول القنوات المسخنة خلال الغليان الموجه 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. الشكل المفضل للغليان في الأنابيب، هو الغليان في القنوات الشاقولية ذات الجريان للأعلى. في هذا الشكل من القنوات تساعد قوة الطفو على جريان المزيج، والسرعة النسبية بين الطورين، الناتجة عن فرق الكثافة، تحسن فعلياً عملية انتقال الحرارة. الشكل (2) يبين تخطيطاً لانتقال الحرارة، الجريان ثنائي الطور وأنظمة الغليان في الأنابيب الشاقولية للجريان نحو الأعلى،



الشكل (2) - تطور أشكال الجريان ثنائي الطور للغليان، الترتيب من اليسار إلى اليمين a - b - c - d العامل في حالة الاستقرار والمعرضة لكثافة تسخين حراري منتظمة ومعتدلة. يفترض أن يكون معدل التدفق الكتلي ثابتاً. عندما يكون السائل على المدخل غير مشبع بدرجة كبيرة (مبرد تحتياً)، وذلك عند كثافات حرارية منخفضة جداً، بحيث يبقى الجريان على مدخل القناة غير مشبع بدرجة كبيرة، الشكل (2-a). بزيادة الكثافة الحرارية يحدث الغليان في جزء من الأنبوب ويعتمد نظام الجريان عند المخرج على كثافة التسخين الحراري، الشكلين (2-b)، (2-c)، وعند كثافات حرارية كافية أو (عدم إشباع عند المدخل منخفض) يحدث تسلسل كامل للغليان ولأنظمة الجريان ثنائي الطور المرتبطة في القناة شكل (2-c). يبدأ الغليان عند نقطة بداية الغليان النووي (ONB). إذا كان المائع عند مدخل الأنبوب مزيج (سائل - بخار) مشبع، فإن أشكال الجريان ثنائي الطور ستكون مشابهة لتلك المبينة على الشكل (2-d). من أجل أي قناة شاقولية متعادلة التسخين ذات جريان للأعلى، تشكل مختلف أنظمة انتقال الحرارة



الشكل (3)-مخطط أنظمة الغليان من أجل $G = const$ كتابع لكل من x_{eq} و q_w'' [2]

سطح توازن محاور إحداثيات المتغيرات (التدفق الكتلي- الكثافة الحرارية- نسبة

البخار) (G, q, x_{eq}) المبينة نوعياً على الشكل (3) وذلك من أجل $G = const$. يظهر الشكل (3) أنظمة انتقال الحرارة كحدود على طول القناة الشاقولية متماثلة التسخين من أجل تدفق كتلي ثابت $G = const$ [2]. يتعلق تسلسل أنظمة انتقال الحرارة بقوة بقيمة الكثافة الحرارية q_w'' . عند كثافة حرارية معتدلة، فإن تسلسل الأنظمة سيتبع الخط الأفقي (II) الذي يتضمن، بالترتيب، حمل قسري خلال السائل، غليان غير مشبع، غليان مشبع، تبخر بالحمل القسري، انتقال الحرارة لحالة الجفاف، وانتقال الحرارة لحالة الجفاف المسبق (أزمة تبادل حراري، تشوه طبقة السائل). عندما يكون التيار الحراري مرتفعاً جداً فإن تسلسل الأنظمة سيتبع الخط (IV). يحدث الغليان النووي، بينما قلب التيار السائل بعيداً دون الإشباع، وبدلاً من الجفاف يحدث الابتعاد عن الغليان النووي. عند قيمة كثافة حرارية أعلى، يتبع تسلسل الأنظمة الخط (VI) أو (VII) حيث يحدث كل من بداية الغليان النووي والانفصال عن الغليان النووي وقلب. الشكل (8) -مخطط أنظمة الغليان من أجل $G = const$ كتابع لكل من x_{eq} و q_w'' عة دراسة تأثير الكثافة الحرارية والمتغيرات الأخرى [9] في ظهور أو غياب أنظمة الجريان وفي تحديد أطوالها وهي لا تقدم حلول فعلية وعددية، لذا فإن هذا البحث يقدم حلول هامة وعملية.

3. دراسة التحليلية لأنظمة الجريان والغليان باستخدام العلاقات التجريبية

تعتمد دراسة أنظمة الجريان والغليان ثنائي الطور في الأنابيب الشاقولية على تقسيم قناة الجريان إلى ثلاث مناطق [2,10] وفق الآتي:

A. منطقة الجريان أحادي الطور(سائل):

$$h < h_{sl}' ; \quad T_w < T_s$$

حيث: T_w - درجة حرارة جدار الأنبوب، T_s - درجة حرارة الإشباع للسائل، h_{sl} - إنتالبي السائل المشبع، h - الإنتالبي للجريان ثنائي الطور في المقطع المدروس من القناة.

$$h < h_{sl}' ; \quad T_w \geq T_s$$

B. منطقة غليان السائل غير المشبع (منطقة الغليان السطحي):

وتنقسم هذه المنطقة إلى قسمين:

(a) يبدأ هذا القسم من النقطة X_{GK} (الانتالي النسبي)، أي من نهاية منطقة الجريان أحادي الطور (حيث $T_w = T_s$ بداية الغليان السطحي غير المتطور) وينتهي عند النقطة X_{HK} التي توافق نقطة بداية الغليان السطحي المتطور.

(b) يبدأ هذا القسم من النقطة الموافقة لبداية الغليان السطحي المتطور X_{HK} وينتهي (c) عند النقطة الموافقة لقيمة انتالي نسبي $X_0 = 0$ (بداية الغليان الحجمي).

C. منطقة الغليان الحجمي للسائل:

تقسم هذه المنطقة إلى أربعة أقسام:

(a) يبدأ من $X_0 = 0$ وينتهي عند النقطة X_{PB} الموافقة للنقطة، حيث يمكن اعتبار التيار ترموديناميكياً متوازناً.

(b) يبدأ من النقطة X_{PB} وينتهي بالنقطة X_{GP} حيث X_{GP} تمثل الانتالي النسبي عند نقطة الانتقال من نظام الجريان الحلقي المشتت إلى نظام الجريان المشتت.

(c) يبدأ من النقطة X_{GP} وينتهي بالنقطة $X_1 = 1$ ، حيث $X_1 = 1$ تمثل الإنتالي النسبي للبخار المشبع.

(d) يبدأ من النقطة X_1 وينتهي بمخرج الأنبوب حيث البخار محمضاً sup .

يحدد الإنتالي النسبي لنقطة بداية الغليان للتيار غير المشبع أو بداية الغليان الغير متطور [11] بالعلاقة التالية:

$$X_{Gk} = \frac{-q \times 43.5 \times Re^{0.2} \times Pr^{0.6}}{\rho \times W \times r} \quad (1)$$

من أجل تحديد نقطة حدوث بداية الغليان المتطور للسائل غير المشبع (الإنتالي النسبي

النسبي X_{HK}) تستخدم العلاقة التالية [11]:

$$X_{Hk} = -7.5 \times \frac{q}{\rho \times W \times r} \times \left(\frac{q \times d_G}{r \times \rho_{sg} \times v_{sL}} \right)^{0.08} \left(\frac{W_0 \times d}{v_{sL}} \right)^{0.2} \quad (2)$$

Re - رقم رينولدز، Pr - رقم برانتل، v_{sL} - الحجم النوعي للسائل المشبع (m^3/kg)

ρ_{sg} - الكتلة النوعية للبخار المشبع (kg/m^3)، W_0 - سرعة تدوير التيار ثنائي

الطور (m/s)، r - الحرارة الكامنة للتبخير (kJ/kg)، ρw - السرعة الكتلية للجريان

ثنائي الطور $(\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s}))$ ، q - الكثافة الحرارية (kW/m^2) .

من أجل الجريان ثنائي الطور المتوازن [8] عندما يكون:

$$h_{SL} = h_L \quad ; \quad h_{sg} = h_g \Rightarrow x = X$$

حيث: h_g ، h_L - إنتالبي البخار وإنتالبي السائل

h_{sg} ، h_{SL} - إنتالبي البخار المشبع وإنتالبي السائل المشبع

x - محتوى البخار الكتلي، X - الإنتالبي النسبي للجريان ثنائي الطور لتحديد x ،

اقترحت العلاقة التجريبية التالية [10]:

$$\frac{x - X}{(-X_{HV})} = \exp \left[-(Y - \lambda Y^3) \right] \quad (3)$$

$$Y = 1 + \frac{X}{(-X_{HV})} \quad ; \quad \lambda = 1 - \ln \frac{x_0}{(-X_{HV})}$$

X_{HV} - الإنتالبي النسبي، الموافق لبداية التبخر الفعال. X - الإنتالبي النسبي.

x_0 - محتوى البخار الكتلي عند المقطع حيث $X = 0$ ، المحددة بواسطة العلاقة:

$$X_{HV} = -17 \times \frac{q}{\bar{\rho W} \times r} \times \left(\frac{\bar{\rho W} \times d}{\mu_{sL}} \right)^{0.2} \quad (4)$$

$$x_{0R} = -0.2 X_{HV}$$

مع استمرار حركة التيار عبر القناة المسخنة، يسخن السائل وتتساوى درجة حرارة

الأنوار في مقطع القناة، وتقترب قيم x و X_{HV} معادلة الإنتالبي النسبي:

$$X = \frac{h - h_{sL}}{r} \quad (5)$$

حيث: h - إنتالبي الجريان ثنائي الطور في المقطع المدروس من القناة.

عند غليان الماء غير المشبع ضمن مجال الضغوط $P = 3 - 15 \text{ MPa}$ ، ،

السرعة الكتلية $pw = 400 - 3000 \text{ kg}/(\text{m}^2.\text{s})$ والكثافة الحرارية

$q = 0.4 - 2.4 \text{ MW}/\text{m}^2$ ، تحدد قيمة محتوى البخار، التي يمكن عندها اعتبار

التيار ترموديناميكياً متوازناً ($X_{pB} \cong x$) بالاستعانة بالعلاقة:

$$\frac{X_{pB}}{(-X_{HV})} = \frac{1.6}{\sqrt[3]{\lambda}} - \frac{1}{4.8 \times \sqrt[3]{\lambda^2}} - 1 \quad (6)$$

هذه الطريقة وذلك صالحة من أجل القنوات ذات التسخين المتماثل عبر طول القناة،
محتوى البخار عند مدخل الأنبوب $x_{in} < X_{HV}$ عند الشرط:

حيث: $\bar{\rho} \bar{w}$ - السرعة الوسطية الكتلية $(kg/m^2.s)$ ، q - الكثافة الحرارية (kW/m^2)
 X - الانتالبي النسبي. لتحديد المحتوى الحدي للبخار x_{GP} المقاس عند نقطة
التحول من نظام الحلقي المشتت إلى نظام المشتت، تستخدم الصيغة [12]:

$$x_{GP} = 1 - 0.86 \times \exp \left(- \frac{19}{\rho W} \times \sqrt{\frac{\sigma \times \rho_{sL}}{d_{eq}}} \right) \quad (7)$$

حيث: σ - معامل الشد السطحي (N/m) .

إن تحديد أطوال أنظمة الغليان والجريان تتم وفق ما يلي:

كمية الحرارة المعطاة إلى الناقل الحراري في الأنبوب بين المدخل والمخرج:

$$Q(kw) = (I_2 - I_1) (kj/kg) * m(kg/s) = (I_2 - I_1) * \rho w * \pi d^2 / 4$$

كمية الحرارة المنتقلة عبر السطح الخارجي للأنبوب المسخن إلى الناقل الحراري:

$$Q(kw) = (I_2 - I_1) (kj/kg) * m(kg/s) = (I_2 - I_1) * \rho w * \pi d^2 / 4$$

حيث I_1, I_2 انتالبي الناقل الحراري عند مدخل الأنبوب ومخرجه $(I_1, q, \rho w)$ معطيات.

4. أهمية البحث وأهدافه:

إن تغيرات أنظمة الغليان والجريان ثنائي الطور في الأنابيب الشاقولية المرتبطة مع تغير كل من الكثافة الحرارية، السرعة الكتلية، قطر الأنبوب، طول الأنبوب، انتالبي الدخول، الضغط تلعب دوراً هاماً في المنشآت التي تستخدم ميزات ثنائي الطور مثل مولدات البخار، مفاعلات الماء المغلي، أجهزة التبريد الإلكترونية، حيث أن تغير نظام الغليان والجريان وتواجد بعض الأنظمة وغياب بعضها الآخر يعتبر حاسماً من حيث استقرار الجريان، شدة انتقال الحرارة، هبوط الضغط، ظهور أزمة انتقال الحرارة الأولى والثانية، تحديد التيارات الحرارية الحرجة، احتياطي التيار الحراري الحرج، الانتقال من الجريان القسري إلى الطبيعي الهام في المفاعلات النووية في حال حدوث عطل، لذلك فإن دراسة تأثير الكثافة الحرارية، كونه أحد البارامترات

المؤثرة، في تغير أطوال أنظمة الغليان والجريان تعتبر مهمة للغاية.

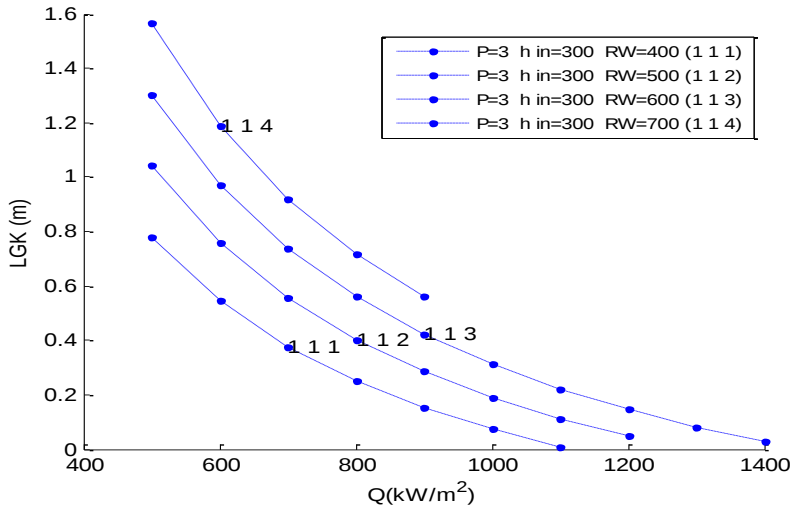
5. طريقة البحث:

يعتمد البحث على إنشاء برمجية في بيئة الـ Matlab لتحديد أنظمة الغليان والجريان لثنائي الطور الماء- البخار وذلك بالاستعانة بمعادلات تجريبية لتحديد بدايات الغليان السطحي، الغليان السطحي المتطور، الغليان الحجمي، الغليان المتوازن، والاستفادة من هذه المعادلات التجريبية في دراسة تأثير الكثافة الحرارية في تحديد أطوال أنظمة الغليان والجريان في أنبوب شاقولي منتظم التسخين، ومن ثم إجراء دراسة تحليلية.

6. النتائج وتحليلها:

1) علاقة طول الجزء L_{GK} بالكثافة الحرارية:

يوضح الشكل (4) علاقة طول الجزء المائي L_{GK} بالكثافة الحرارية عند سرع كتلية مختلفة، حيث تختلف المنحنيات "(1 1 1)"، "(1 1 2)"، "(1 1 3)"، "(1 1 4)" فيما بينها

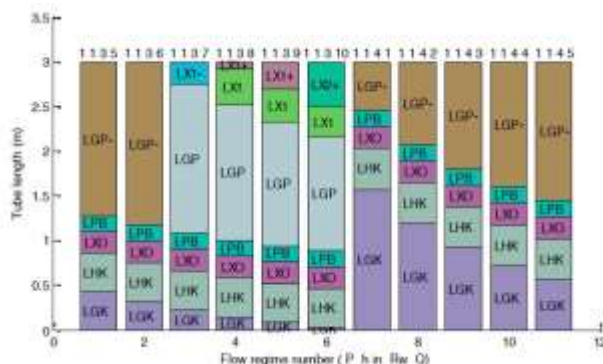


الشكل (4)- تأثير الكثافة الحرارية Q على طول الجزء المائي L_{GK} بثبات قيم (P, h_{in}) عند قيم ثابتة

مختلفة لـ pw الأرقام على المنحني (p, h_{in}, RW)

بالسرعة الكتلية، العلاقة هي من الدرجة الثانية، يلاحظ تناقص طول الجزء

المائي L_{GK} مع زيادة الكثافة الحرارية عند سرعة كتلية ثابتة، بثبات إنتالبي الدخول والضغط. تُمثل الأنابيب في الشكل (5) "(1 1 4 1)، (1 1 4 2)، (1 1 4 3)، (1 1 4 4)، (1 1 4 5)" بالمنحني (1 1 4) في الشكل (4)، تختلف هذه الأنابيب عن بعضها بالكثافة الحرارية، واضح أنه مع زيادة الكثافة الحرارية يتناقص طول الجزء L_{GK} . بينما توضح الأنابيب في الشكل (5) "(1 1 3 10)، (1 1 3 9)، (1 1 3 8)، (1 1 3 7)، (1 1 3 6)، (1 1 3 5)" والتي تختلف فقط بالكثافة الحرارية، تتناقص طول الجزء المائي L_{GK} مع زيادة الكثافة الحرارية حتى ينعدم تقريبا في الأنبوب (1 1 3 10).

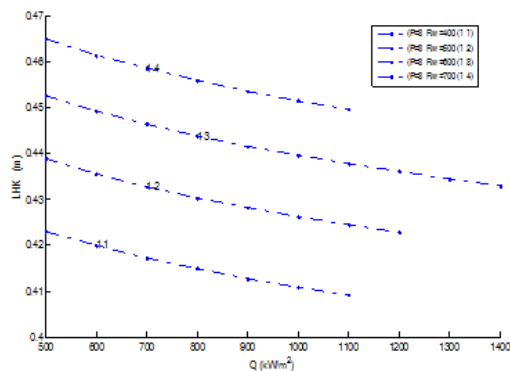


الشكل (5) - تغير أنظمة الجريان على طول الأنبوب

(2) علاقة طول جزء الغليان السطحي L_{HK} بالكثافة الحرارية:

يوضح الشكل (6) علاقة طول جزء الغليان السطحي L_{HK} بالكثافة الحرارية

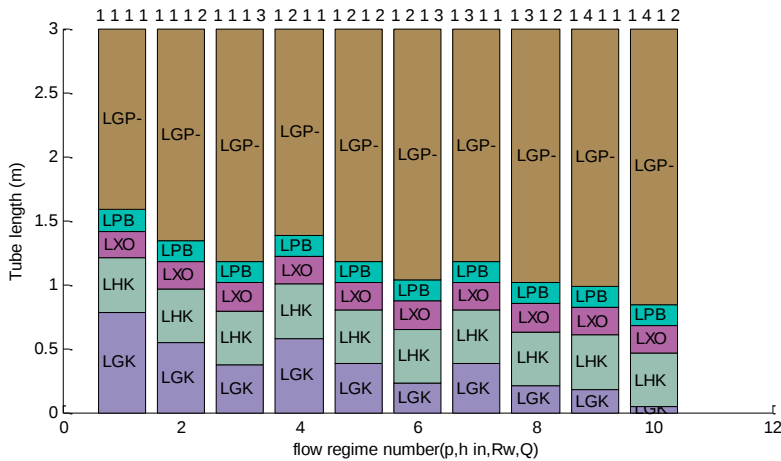
عند سرعة كتلية مختلفة، حيث تختلف المنحنيات "(1 1)، (1 2)، (1 3)، (1 4)"



الشكل (6) - تأثير الكثافة الحرارية Q على طول جزء الغليان السطحي L_{HK} بثبات قيم (P, h_{in}) عند قيم ثابتة مختلفة لـ pw الأرقام على المنحنيات (p, R_w)

بالسرعة الكتلية، يتناقص الطول L_{HK} بزيادة الكثافة الحرارية (علاقة من الدرجة الثانية) عند سرعة كتلية ثابتة، بثبات الضغط وانتالبي الدخول، أي أن زيادة الكثافة الحرارية تختصر طول جزء الغليان السطحي، وبالمقارنة مع المنحنيات السابقة شكل (5) نجد أن التناقص في طول الجزء L_{HK} أقل مقارنة مع التناقص في L_{GK} من أجل تغير في قيمة الكثافة الحرارية واحدة، حيث أن طول جزء الغليان السطحي مرتبط ببداية نقطة الغليان السطحي التي سرعان ما تظهر عند زيادة الكثافة الحرارية (بينما بداية الغليان السطحي تظهر عندما درجة حرارة الأنبوب تصل إلى درجة حرارة الإشباع للسائل المار عند الضغط المعطى)، وعند كثافة حرارية ثابتة يزداد الطول L_{HK} مع زيادة السرعة الكتلية.

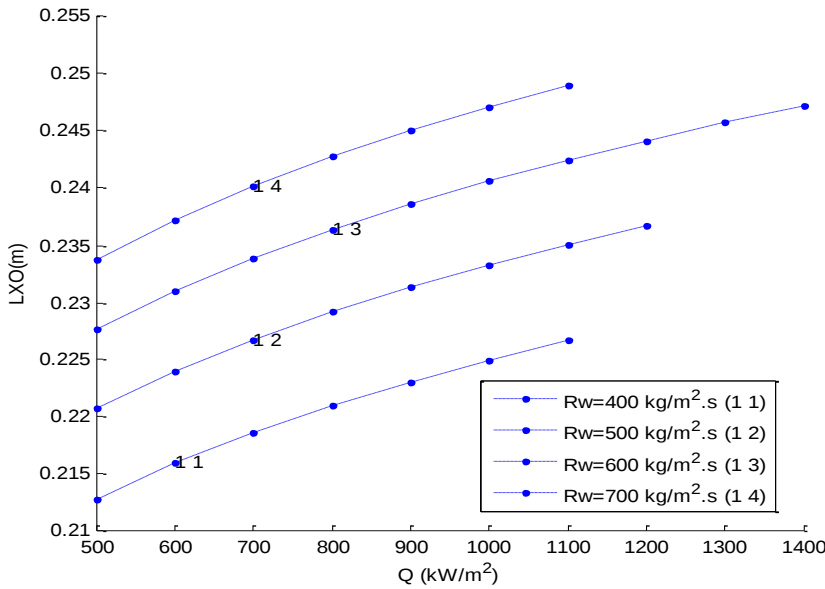
على الشكل (7) تمثل الأنابيب "(1 1 1 1)"، "(1 1 1 2)"، "(1 1 1 3)" جزء من المنحني (1 1) شكل (6)، تختلف بالكثافة الحرارية بثبات الضغط وانتالبي الدخول والسرعة الكتلية، من الواضح أنه مع زيادة الكثافة الحرارية يتناقص الطول L_{HK} ، كما تمثل الأنابيب "(1 2 1 3)"، "(1 2 1 2)"، "(1 2 1 1)" مجموعة أنابيب تختلف بالكثافة الحرارية فقط، وأنه مع زيادتها يتناقص طول جزء الغليان السطحي L_{HK} .



الشكل (7) - تغير أنظمة الجريان على طول الأنبوب

(3) علاقة طول جزء الغليان السطحي المتطور L_{XO} بالكثافة الحرارية:

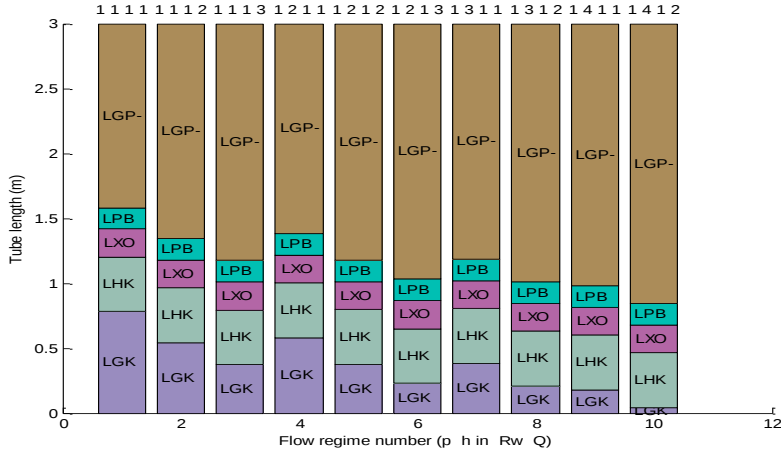
يبين الشكل (8) العلاقة بين طول جزء الغليان السطحي المتطور L_{XO} والكثافة الحرارية لمجموعة من المنحنيات عند قيم ثابتة مختلفة للسرعة الكتلية بثبات الضغط وانتالبي الدخول "(1 1)، (1 2)، (1 3)، (1 4)"، يزداد طول الجزء L_{XO} مع زيادة الكثافة الحرارية وفق علاقة من الدرجة الثانية، ويلاحظ تزايد L_{XO} بينما L_{GK} و L_{HK} ، تتناقصان مع زيادة الكثافة الحرارية، والسبب في ذلك أن تحديد النقطتين X_{GK} (نهاية الطول L_{GK})، X_{HK} (نهاية الطول L_{HK}) مرتبط بظهور الطور



الشكل (8) - تأثير الكثافة الحرارية Q على طول جزء الغليان السطحي المتطور L_{XO} بثبات قيم (P, h_{in}) عند قيم ثابتة مختلفة لـ pw الأرقام على المنحنيات (p, Rw)

البخاري في الطبقة الملامسة لجدران الأنبوب وبالتالي بمقدار تسخين الأنبوب بينما تحديد النقطة X_O (نهاية الجزء L_{XO}) مرتبط بغليان كل كتلة السائل في الأنبوب (لها علاقة بضغط الإشباع ودرجة حرارة الإشباع للسائل) أي أن الأمر مرتبط بعطالة انتقال الحرارة من سطح التسخين إلى كتلة السائل في مركز الأنبوب. تمثل الأنابيب الشكل (9) "(1 1 1 1)، (1 1 1 2)، (1 1 1 3)" جزء من المنحني (1 1) شكل

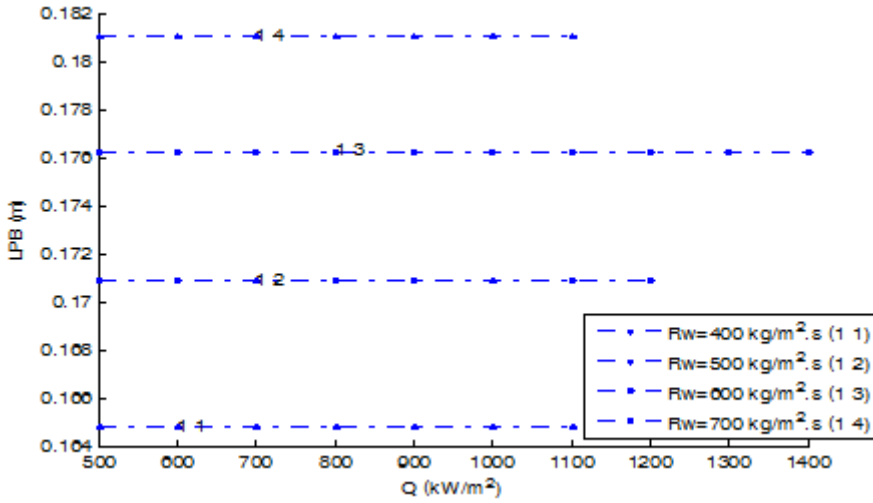
(8) تختلف بالكثافة الحرارية مع ثبات بقية البارامترات، لاحظ تناقص الطول L_{HK} والطول L_{GK} مع زيادة الكثافة الحرارية، وتزايد الطول L_{XO} ، من الصعب التمييز في هذا الشكل لأن الفروقات صغيرة ولكن يمكن ملاحظة ذلك من الشكل (8).



الشكل (9) - تغير أنظمة الجريان على طول الأنابيب

4) علاقة طول جزء الغليان الحجمي L_{PB} بالكثافة الحرارية:

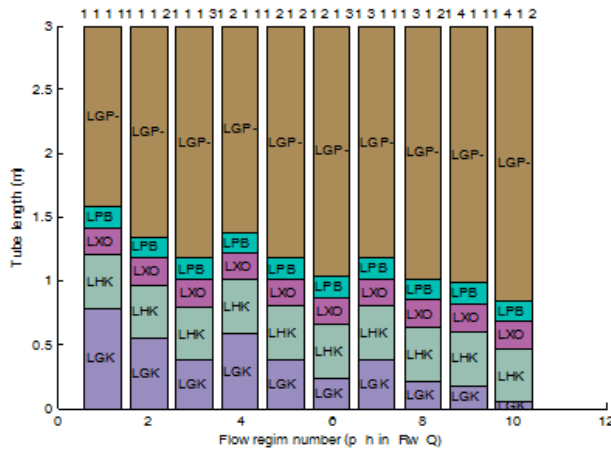
يبين الشكل (10) العلاقة بين طول جزء الغليان الحجمي L_{PB} والكثافة الحرارية عند قيم ثابتة مختلفة للسرعة الكتلية بثبات الضغط وانتالبي الدخول، يتضح من الشكل أن طول الجزء L_{PB} يبقى ثابتاً مع زيادة الكثافة الحرارية وهذا منطقي حيث أنه في بداية هذا الجزء تبدأ عملية التبخر الحجمية والتي تتم عند درجة حرارة اشباع ثابتة وفي نهاية الجزء L_{PB} يبدأ الغليان المتوازن (ينعدم التبادل الحراري بين الطورين من جهة وبين الجدار والمزيج الملامس له من جهة أخرى)، أي أنه في بداية الطول L_{PB} الحرارة تصرف على تبخير السائل الواصل إلى درجة حرارة الاشباع وتستمر إلى أن يحدث التوازن الحراري في نهاية هذا الطول، وبما أن هذا الطول صغير فسوف يظهر التوازن الحراري بسرعة وبالتالي لا تأثير في زيادة الكثافة الحرارية على طول L_{PB} . يلاحظ أنه من أجل كثافة حرارية ثابتة يزداد الطول L_{PB} مع زيادة السرعة الكتلية (1) (12)، (13)، (14) بثبات الضغط وانتالبي الدخول.



الشكل (10) - تأثير الكثافة الحرارية Q على طول جزء الغليان الحجمي L_{PB} بثبات قيم

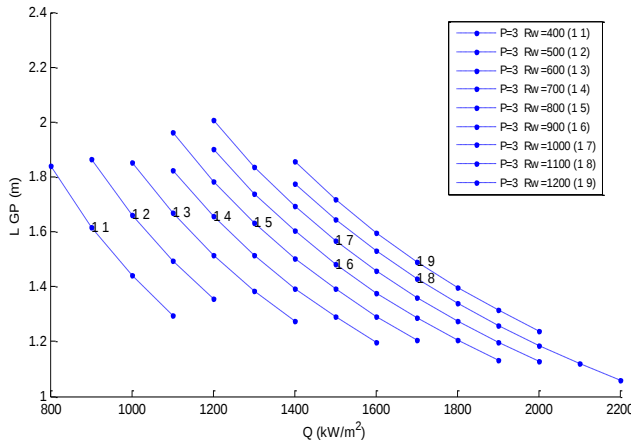
(P h_{in}) عند قيم ثابتة مختلفة لـ R_w الأرقام على المنحنيات (p R_w)

في الشكل (11) مجموعة الأنابيب "(1 1 1 1)"، "(1 1 1 2)"، "(1 1 1 3)"، "(1 1 1 4)" تختلف بالكثافة الحرارية، مع زيادة الكثافة الحرارية يبقى الطول L_{PB} ثابتاً، وهذه الأنابيب تمثل جزء من المنحني (1 1)، كما أن مجموعات الأنابيب "(1 2 1 3)"، "(1 2 1 2)"، "(1 2 1 1)"، "(1 3 1 2)"، "(1 3 1 1)"، "(1 4 1 2)"، "(1 4 1 1)" تختلف كل مجموعة فيما بينها بالكثافة الحرارية بثبات باقي البارامترات، واضح أن أطوال الجزء L_{PB} لكل مجموعة يبقى ثابت رغم تغير الكثافة الحرارية .



الشكل (11) - تغير أنظمة الجريان على طول الأنبوب

(5) علاقة طول جزء الغليان المتوازن L_{GP} بالكثافة الحرارية:



الشكل (12) - علاقة طول جزء الغليان المتوازن L_{GP} بالكثافة الحرارية Q بثبات قيم (P, h_{in})

عند قيم ثابتة مختلفة لـ pw الأرقام على المنحنيات (p, Rw)

يبين الشكل (12) علاقة طول جزء الغليان المتوازن L_{GP} بالكثافة الحرارية عند سرعات كتلية ثابتة مختلفة، تختلف المنحنيات "(1 1)، (1 2)، (1 3)، (1 4)، (1 5)، (1 6)، (1 7)، (1 8)، (1 9)" بالسرعة الكتلية بثبات الضغط وانتالبي الدخول، يلاحظ أن طول الجزء L_{GP} يتناقص مع زيادة الكثافة الحرارية عند سرعة كتلية ثابتة وفق علاقة

7. النتائج والتوصيات:

- تتناقص طول الجزء المائي L_{GK} مع زيادة الكثافة الحرارية عند سرعة كتلية ثابتة، في علاقة من الدرجة الثانية.
- تتناقص طول الغليان السطحي L_{HK} مع زيادة الكثافة الحرارية عند سرعة كتلية ثابتة في علاقة من الدرجة الثانية.
- تزايد طول جزء الغليان السطحي المتطور L_{XO} مع زيادة الكثافة الحرارية طول عند قيم ثابتة مختلفة للسرعة الكتلية في علاقة من الدرجة الثانية.
- ثبات طول جزء الغليان الحجمي L_{PB} مع زيادة الكثافة الحرارية عند قيم ثابتة مختلفة للسرعة الكتلية.
- يتناقص طول جزء الغليان المتوازن L_{GP} مع زيادة الكثافة الحرارية عند سرعة كتلية ثابتة وفق علاقة من الدرجة الثانية.
- من أجل المجالات المرتفعة لقيم الكثافة الحرارية أكبر من $Q = 1600 \text{ kW/m}^2$ وقيم السرعات الكتلية $s \geq 900 \text{ kg/m}^2$ ، يلاحظ انخفاض مقدار الزيادة في الكثافة الحرارية والسرعة الكتلية pw ، اللازمين لتحقيق نفس طول الغليان المتوازن L_{GP} مقارنة مع مجال القيم المنخفضة.
- اجراء تجارب متعددة على الجريان ثنائي الطور في مجالات مختلفة من البارامترات المرتبطة بتحديد أنظمة الجريان والغليان المختلفة في الأنابيب الشاقولية ذات التسخين المنتظم، للحصول على معادلات تجريبية للاستفادة منها في دراسة تأثير مختلف البارامترات في تحديد هذه الأنظمة، وذلك في صعوبة الحصول على نموذج للجريان ثنائي الطور.
- الاستفادة من الدراسة السابقة وباستخدام الطرق العددية في صياغة نموذج للجريان ثنائي الطور من الدراسات التجريبية.

References

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. 1981,365.
2. R.Dabirian; L.Thompson; R.Mohan; O.Shohan, Pressure – Minization Method for prediction of Two – phase – Flow splitting ,Oil – Gas Fac 5 (05) October 2016.
 3. GHIAASIAAN, M. S.; Two-Phase Flow Boiling and Condensation in Conventional and Miniature Systems. First ed., Cambridge University Press-2008, 613.
 4. ABEDINI, S. H.; A Thesis Presented to the Faculty of The Graduate College at the University of Nebraska In Partial Fulfillment of Requirements For the Degree of Master of Science ,A Numerical Investigation of Two Phase Solar-Collector Pipe, Lincoln, Nebraska, May, 2012, 87.
 5. STEVANVIC, V. Professor Sanja Prica Research Assistant MASLOVIĆ B. Research Assistant University of Belgrade Faculty of Mechanical Engineering, Multi-Fluid Model Predictions of Gas-Liquid Two-Phase Flows in Vertical Tubes , VOL. 35, No 4, FME Transactions, 2007, 173-181.
 6. BUONGIORNO, J. Associate Professor of Nuclear Science and Engineering 22.06 Engineering of Nuclear Systems MIT Department of Nuclear Science and Engineering Notes on Two-Phase Flow, Boiling Heat Transfer, and Boiling Crisis in PWRs and BWRs JB / Fall 2010, 34.
 7. GONZALEZ, J. Z.; Thesis Doctoral ,Water Evaporation in Tubes: Analytical Approach For The Sub cooled Flow Boiling Region and Development of A Method For Evaluation and Sizing Evaporators ,Madrid, December 2009, 190.
 8. POLYANIN, L.N. ,IBRAHIMOV, M.X.,SOBILOV,G.E.; Heat Transfer in Nuclear Reactors. Energy Press ,Moscow,1982, 88.
 9. E.A.Chimmv; F.V.Ronshin; O.A.Kabov, Regimes of two – phase flow in miro – and minichannls, May 2015, Thermophysics And Arechanics 22(3): 265- 284.
 10. PETUKHOV, B.S., GENIN, L. G., GOVALIOV, S.A.; Heat Transfer of Nuclear Power Units; second ed. Power Atom Press Moscow. 1986,472.
 11. GRIGORIEV, V.A., ZORIN V.M.; Atomic Thermal Electric Stations; Handbook, Energy Press ,Moscow, 1982, 624.
 12. GALCHENCO,E.F.,CERGEIEV,V.V.; Generalized Data of Boundary Steam Content ,Teploenergetica vol.3-Moscow 1983, p158-159.