

تأثير الكثافة الحرارية والسرعة الكتلية في محتوى البخار الكتلي لأنظمة الغليان والجريان القسري ثنائي الطور في الأنابيب الشاقولية

د. حسان حلواني*

د. فاروق العبود**

الملخص

درُسَ في هذا البحث تأثير تغيير كل من الكثافة الحرارية والسرعة الكتلية في تغيير محتوى البخار الكتلي على طول أنبوب توليد البخار لمختلف أنظمة الغليان والجريان القسري للتيار ثنائي الطور داخل الأنابيب الشاقولية ضمن الشروط: الضغط $P = 3 \text{ MPa}$ ، الكثافة الحرارية $Q = (500 - 2200) \text{ kW/m}^2$ ، السرعة الكتلية $Rw = (400 - 1800) \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ، إنتالبي الدخول $h_{in} = (300 - 1700) \text{ kJ/kg}$ ، طول الأنبوب $L = 3 \text{ m}$ ، وقطر الأنبوب $d_{in} = 8 \text{ mm}$. استُفيدَ من بعض المعادلات التجريبية لتحديد محتوى البخار الكتلي لمختلف أنظمة الغليان والجريان ثنائي الطور، كما أُجريت دراسة تحليلية لتأثير هذه المتغيرات. أنشئَ لوغاريتم كتب بلغة الـ Matlab لتحديد محتوى البخار الكتلي لمختلف أنظمة الغليان والجريان وتمثيل تأثير الكثافة الحرارية والسرعة الكتلية في تغيير محتوى البخار الكتلي على طول أنبوب توليد البخار. نتيجة البحث لوحظ أن هناك إمكانية للتحكم بمحتوى البخار لمختلف أنظمة الغليان والجريان عن طريق تغيير كل من السرعة الكتلية والكثافة الحرارية بثبات الضغط وإنتالبي الدخول، وهذا يمكن من الاستفادة من ميزات ظهور الطور البخاري، وزيادة محتوى البخار في تحسين انتقال الحرارة. لا تؤثر الكثافة الحرارية لبداية الجريان المشتت في محتوى البخار الكتلي X_{GP} .

الكلمات المفتاحية: الجريان المشتت، محتوى البخار الكتلي، أنظمة الغليان، لكثافة الحرارية، الجريان القسري ثنائي الطور.

* قسم الهندسة النووية كلية الهندسة الميكانيكية، جامعة حلب

** قسم هندسة الطاقة كلية الهندسة الميكانيكية، جامعة حلب

1. المقدمة:

الحرارية Heat Flux، وكثافة ولزوجة كل طور، والشدة السطحي، وأبعاد الأنبوب، وزاوية الميل،... إلخ. لظهور الطور البخاري تأثير مهم في تغيير نظام الجريان وفي عوامل انتقال الحرارة في أنظمة الغليان المختلفة وفي هبوط الضغط وفي التيارات الحرارية الحرجة Critical Heat Fluxes الموافقة لأزمة انتقال الحرارة Crises Of Heat Transfer الأولى والثانية [2]، هذه الموضوعات كلها تعد مهمة للبحث في مجالات استخدام النواقل الحرارية ثنائية الطور المتنوعة: الكيميائية، والغذائية، والنفطية، والمجالات الصناعية الأخرى، إلا أن ظهور الطور البخاري يكتسب أهمية خاصة في مفاعلات الطاقة النووية RBMK، BWR (الروسية الصنع) في حالة الاستثمار الطبيعي، وفي مفاعلات الماء المضغوط PWR، في حالة الأعطال المرتبطة بانهيار قنوات المفاعل وفقدان الناقل الحراري، إذ إنه في مفاعلات الطاقة المائية - المائية المغلقة التي يستخدم فيها الماء في الوقت نفسه كناقل حراري ومهدئ، تتغير كثافة المهدئ بشكل جوهري بمقدار تولد البخار تبعاً لارتفاع قلب المفاعل، مما يؤدي إلى انحراف ملحوظ لتوزيع النيوترونات الحرارية، وتوزع إطلاق الطاقة وفق الارتفاع بشكل يختلف عن قانون COS. تتزاح القيمة الأعظمية لإطلاق الطاقة إلى الأسفل قليلاً من المستوي المركزي لقلب المفاعل، حيث كثافة المهدئ أعلى من منطقة الغليان المتطور، عندئذٍ يتعلق توزع إطلاق الطاقة بتوزع محتوى البخار الذي بدوره يتعلق بتوزع إطلاق الطاقة (المرتبط بكثافة النيوترونات) على ارتفاع قلب المفاعل، أي إن محتوى البخار يؤدي دوراً مهماً ترموهيدروليكيًا ونيوترونيًا [3].

يتميز جريان المزيج ثنائي الطور في الأنبوب ببنى مختلفة على شكل فقاعات، قذائف وأغشية التي لا يُعطى شكلها دائماً تحديداً واضحاً، مما يعيق الوصف الدقيق والموضوعي لأنظمة الجريان. تُعطى للجريانات الصفائحية والمضطربة في التيارات أحادية الطور، نماذج متنوعة [1]. يمكن أن توصف التيارات الصفائحية بقيم لحظية، بإيجاد حلول لمعادلات نافي - ستوكس، في حين أن التيارات المضطربة توصف بقيم متوسطة مع الزمن أو إحصائياً بقيم متوسطة، تمثل مع بعضها حلاً 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 Bubbly Flow والحلقية Annular Flow بدقة جيدة بمساعدة النموذج نفسه، 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 تعدّ 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 قذائف Slug Flow. تتعلق بنية الجريان أيضاً بالانحناءات، الوصلات... إلخ. هناك كثير من البارامترات التي تحدد ظهور نظام ما للتيار، ومن غير المفيد محاولة تمثيل الأنظمة الانتقالية كلها على مخططات ثنائية البعد. نختار من البارامترات الكثيرة: التدفقات الحجمية لكل طور، والضغط، والكثافة

2. آلية تشكل الفقاعات:

تصل حجمها الأعظمي وتختفي، عندئذٍ يختفي الجزء الأكبر من الفقاعات دون أن يفصل عن سطح التسخين. ليس من الصعوبة تفسير الخصوصية المشار إليها في سلوك الفقاعات، ففي المرحلة الأولى تدفع الفقاعة النامية السائل المسخن الملامس للجدار وتكون سرعة نموها كبيرة نظراً إلى أنها محاطة بسائل مسخن. ينفذ جزء من الفقاعة، في أثناء عملية النمو، إلى الطبقات الباردة للسائل ويبدأ تكاثف فعال للبخر عند قمتها، بحيث يختل التوازن غير المستقر الملحوظ "تبخر السائل عند قاعدة الفقاعة وتكاثف البخار في قمتها" بسرعة وتتناقص أبعاد الفقاعة ثم تختفي.

عند ضغوط أكبر من 4bar، يحدث نمو الفقاعات نسبياً ببطء بسبب ارتفاع كثافة البخار، تصل سرعة نمو الفقاعة 0.2m/s. عندما تبلغ أبعاد الفقاعات قيمة عظمى، تبدأ بالتناقص سريعاً، ونتيجة للنمو البطيء فإن القوى الهيدروديناميكية التي تؤثر في الفقاعة غير كبيرة وشكلها شبه كروي. يحدث انفصال الفقاعة عن الجدار لدى اقتراب حجمها من الحجم الأعظمي. إن انخفاض السرعة العرضية لحركة الفقاعات في الاتجاه العمودي على الجدار يجب أن يؤدي إلى نمو محتوى البخار الحجمي الحقيقي على حدود الطبقة الحدية للزجة، وهذا يتوافق مع ملاحظات مجموعة الباحثين [2]، إذ تشكل طبقة فقاعية عند ضغوط مرتفعة وقيم عامل جفاف x ضئيل بالقرب من الجدار. تمثل الطبقة الفقاعية نكس للفقاعات التي تتحرك على طول سطح التسخين، والتي تحجب طبقة السائل الجدارية عن نواة التيار. يتوقف انتقال الحرارة من الطبقة الجدارية إلى نواة التيار، يبدأ تميص الطبقة الجدارية، ويزداد محتوى البخار الموضعي. وفق نظرية تونغ [2] تحدث أزمة انتقال الحرارة نتيجة الوصول بالكامل إلى تميص محدد للطبقة الجدارية للسائل.

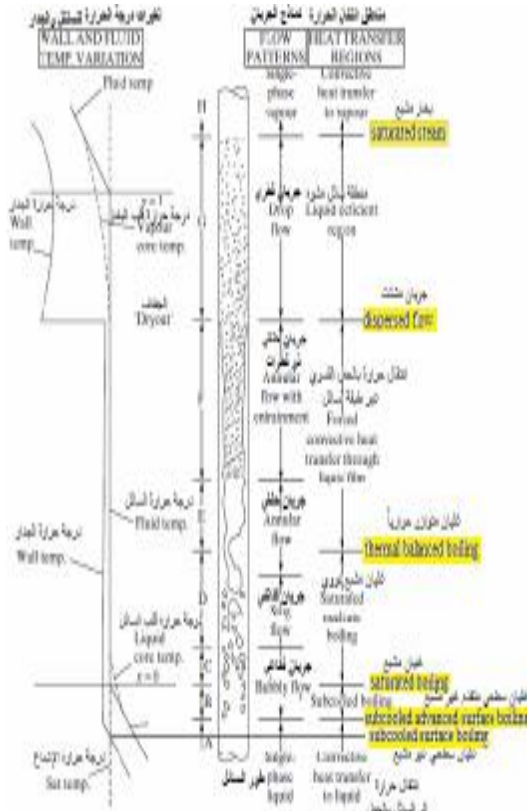
يشترك الغليان الفقاعي Bubbly Boiling لدى الحركة القسرية للسائل بكثير من الأمور العامة مع الغليان في ظروف الحمل الحر في حجم كبير. يبدأ الغليان بعد تجاوز درجة حرارة سطح التسخين لدرجة حرارة الإشباع. يحدث توالد الفقاعات في نقاط محددة من السطح "مراكز التبخر"، التي تمثل تجاوز غير كبيرة. يزداد عدد المراكز مع زيادة تسخين السطح، وتتناقص سرعة نمو الفقاعات في حالة الحركة القسرية مع زيادة الضغط كما هو الحال عند الغليان في حجم كبير.

تسقط الفقاعات المنشكلة على جدار الأنبوب بعد تحررها من مراكز التبخر في طبقة السائل الجدارية المتحركة وتبدأ بالانزياح على طول الجدار. كون سرعة حركة الفقاعات الصغيرة والكبيرة التي توجد على سطح التسخين تقريباً واحدة وتبلغ نحو 80% من سرعة التيار الوسطية [2]، وتستمر الفقاعات بالنمو باستمرار تماسها مع جدران التسخين وإحاطتها بسائل مسخن.

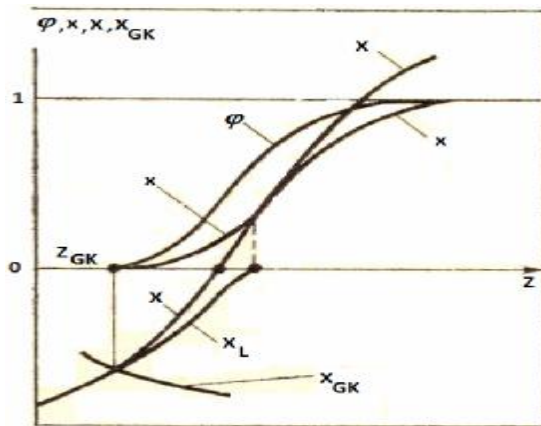
عندما تبلغ الفقاعات حجوماً معينة تنفصل عن الجدران وتنتقل إلى نواة الجريان. عند الغليان في حجم كبير، تكون درجة حرارة السائل أعلى بعض الشيء من درجة حرارة الإشباع، أمّا في حالة الحركة القسرية فيمكن أن تكون درجة حرارة السائل في نواة الجريان دون درجة حرارة الإشباع.

في حالة غليان السائل غير المشبع Subcooled Boiling تتكاثف الفقاعات بعد أن تنفصل عن الجدار في طبقات السائل الباردة. أظهرت بحوث آلية غليان السائل غير المشبع أنه عند ضغوط منخفضة (حتى 4 bar) تنمو الفقاعات بسرعة كبيرة جداً على شكل انفجار، تصل سرعة النمو 12 m/s [2]، ويكون شكل الفقاعة قريباً من النصف كروي. تتضاءل الفقاعات نسبياً ببطء بعد أن

الجريان ثنائي الطور الأديباتي.



يبين الشكل (1) [4] تغيّر الإنتالبي النسبي Relative Enthalpy للتيار X ، الإنتالبي النسبي للطور السائل X_L ، المحتوى الإنتالبي النسبي للماء على حدود الغليان X_{GK} ، المحتوى البخاري الحقيقي ϕ ، "Actual Steam Content"، المحتوى البخاري الكتلتي للتيار x "Mass Steam Content" كتابع لارتفاع قناة التسخين Z .



الشكل (1) تغير بارامترات ثنائي الطور على طول قناة التسخين [4]

3. أنظمة الغليان والجريان القسري ثنائي الطور في الأنابيب الشاقولية للأعلى:

يظهر الشكل (2) [5] تفصيلاً للجريان وأنظمة انتقال الحرارة في أنبوب شاقولي منتظم التسخين للأعلى، ومعرضاً لكثافة تيار حراري معتدلة، إذ المائع على المدخل سائل غير مشبع، كما يبين الشكل نفسه تغيّرات درجات الحرارة لكل من الجدار والسائل بالقرب من مدخل الأنبوب، إذ السائل غير مشبع بدرجة كافية ولا يسمح بنشوء فقاعات، لكون نظام الجريان سائل أحادي الطور ونظام انتقال الحرارة بالحمل القسري. بمتابعة التسخين تتسلسل أنظمة الجريان التي تشمل الفقاعي، والقدائفي، والحلقي، ويليه نظام جريان القطري المشتت Dispersed Flow، وأخيراً نظام جريان أحادي الطور لبخار فقط. يختلف نظام الجريان ثنائي الطور المسخن بعض الشيء من حيث الشكل عن نظيره في

الشكل (2) أنظمة الغليان والجريان المعدلة لتيار ثنائي الطور في أنبوب شاقولي ذي كثافة حرارية على الجدران معتدلة (Collier & Thome, 1994) [5]

يعدّ الغليان النووي Nucleate Boiling هو السائد في نظامي الجريان الفقاعي والقدائفي ويتبع بعملية تبخر بالحمل القسري، حيث نظام الجريان الحلقي هو السائد، وهو نظام فعال جداً لانتقال الحرارة إذ يغطي السطح الداخلي المسخن للأنبوب بطبقة رقيقة من السائل. تبرد طبقة السائل بالتبخّر من سطحها، مما يجعلها غير قادرة على تحمل درجة حرارة تحميص مرتفعة بشكل كافٍ للفقاعات النووية. يمكن أن يحصل حمل للقطرات عندما يكون معدل تدفق البخار مرتفعاً بشكل كافٍ، مما يقود إلى جريان قطري مشتت [5].

إن معامل انتقال الحرارة في منطقة تشوه السائل أخفض بكثير مما هي في نظامي الغليان النووي أو التبخر

انتقال الحرارة، الذي كان مرتفعاً جداً في نظام الغليان غير المشبع، يهبط بشكل حاد بدءاً من نقطة الـ (DNB) حتى ولو كان قلب الجريان في الأنبوب المسخن غير مشبع بدرجة كبيرة.

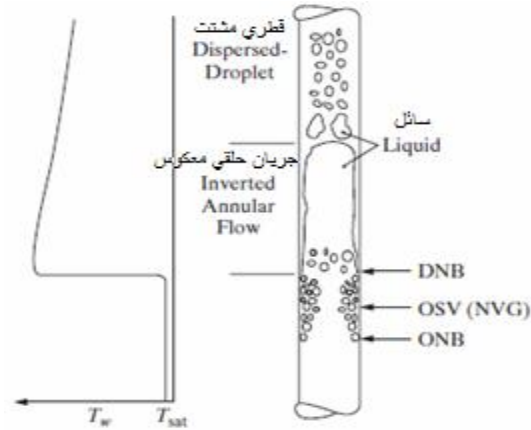
4. أهمية البحث وأهدافه:

إن تحديد البارامترات التدفقية والحقيقية للتيار ثنائي الطور في المقاطع المختلفة من القناة المولدة للبخار يعدُّ أحد الموضوعات الرئيسة لعلم الهيدروديناميك، ودون هذه القيم لا يمكن حساب انتقال الحرارة، ومن ثمَّ اختيار البارامترات الضرورية للأوساط وأبعاد سطوح التبادل الحراري، وتحديد المقاومات في الأجزاء المختلفة لجريان التيار، واختيار الأنظمة الموثوق بها وحل مجموعة من الموضوعات التقنية الأخرى.

تمكننا معرفة قيمة محتوى البخار الكتلي من التحكم في سماكة طبقة السائل الرقيقة، ومن ثمَّ التحكم بقيمة عامل انتقال الحرارة، وإمكانية تحقيق سحب حراري أو تقديم حرارة أفضل؛ مما ينعكس مباشرة على حجم المبادل الحراري، خاصة في الحالات التي يكون لحجم المبادل أهمية بالغة، كتطبيقات التبريد العميق أو مفاعلات الطاقة النووية أو مجال التبريد للأجهزة الإلكترونية كالحاسبات المركزية، ومحطات التحويل.

كما أن معرفة محتوى البخار الكتلي في مختلف الأنظمة ضروري لمعرفة هبوط الضغط في القنوات الشاقولية المسخنة التي تحوي هذه الأنظمة، لذلك كان لابداً من معرفة العوامل التي تتحكم بمحتوى البخار الكتلي في مختلف الأنظمة بما فيها الكثافة الحرارية والسرعة الكتلية. هدَفَ البحث إلى إيجاد علاقة محتوى البخار الكتلي في أنظمة الغليان المختلفة بالكثافة الحرارية والسرعة الكتلية Mass Velocity.

بالحمل القسري، نتيجة لحدوث الجفاف، المترافق بارتفاع كبير في درجة حرارة السطح المسخن، وبذلك فإن ظاهرة الجفاف تشبه الكثافة الحرارية الحرجة التي تحصل في الغليان الحر. يوصف الشكل (3)



الشكل(3) - أنظمة الغليان والجريان ثنائي الطور في أنبوب شاقولي

ذي كثافة تسخين حراري على جدار الأنبوب مرتفعة [5]

أنظمة الجريان والغليان في القنوات الشاقولية المعرضة لكثافات حرارية مرتفعة جداً، إذ تختلف نماذج الجريان في هذه الحالة عن تلك المبينة في الشكل (2). نظراً إلى ارتفاع الكثافة الحرارية على جدار القناة، يحدث بداية الغليان النووي (Onset Nucleate Boiling) في القناة، في حين قلب التيار دون درجة حرارة الإشباع بدرجة عالية يحدث الغليان النووي بدءاً من أسفل نقطة بداية الغليان النووي (ONB)؛ مما يؤدي إلى زيادة التلغ، إذ نمو الطبقة الفقاعية من البخار يجعل من المستحيل استمرار التماس بين طبقة السائل والسطح المسخن، مما يقود إلى الانحراف عن

الغليان النووي (Departure from Nucleate Boiling) (DNB)، الذي هو آلية أخرى لظاهرة الكثافة الحرارية الحرجة في الغليان الحر. عند هذه الشروط، فإن معامل

5 . طريقة البحث:

$$h > h_{sl} ; T_w > T_s$$

تقسم هذه المنطقة إلى أربعة أقسام:

1. يبدأ من $X_0 = 0$ وينتهي عند النقطة X_{PB} الموافقة للغليان المتوازن (Balanced Boiling)، إذ يمكن عدُّ التيار متوازناً ترموديناميكياً

2. يبدأ من النقطة X_{PB} وينتهي بالنقطة X_{GP} ، إذ X_{GP} تمثل الإنتالبي النسبي عند نقطة الانتقال من نظام الجريان الحلقي المشتت إلى نظام الجريان المشتت (Dispersed Flow)

3. يبدأ من النقطة X_{GP} وينتهي بالنقطة $X_I = 1$ ، إذ $X_I = 1$ تمثل الإنتالبي النسبي للبخار المشبع (Saturated Steam).

4. يبدأ من النقطة X_I وينتهي بمخرج الأنبوب إذ البخار محمصاً (Superheated Steam).

يحدد الإنتالبي النسبي لنقطة بداية الغليان للتيار غير المشبع أو بداية الغليان غير متطور بالشكل:

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

من أجل تحديد نقطة حدوث بداية الغليان

المتطور للسائل غير المشبع (الإنتالبي النسبي X_{HK}) تستخدم العلاقة الآتية [6]:

$$X_{HK} = -7.5 \cdot \frac{q}{r w \cdot r} \cdot \frac{\alpha}{\xi} \cdot \frac{q \cdot d_G}{r \cdot r_{sg} \cdot v_{sL}} \cdot \frac{\theta^{0.08}}{\theta}$$

$$\frac{\alpha W_0 \cdot d}{\xi v_{sL} \theta} \cdot \frac{\theta^{0.2}}{\theta}$$

(2)

إذ: Re - عدد رينولدز

Pr - عدد برانتل

v_{sL} - الحجم النوعي للسائل المشبع

ρ_{sg} - الكتلة النوعية للبخار المشبع

W_0 - سرعة تدوير التيار ثنائي الطور

يعتمد البحث مبدأ الدراسة التحليلية والاستعانة بالمعادلات التجريبية التي يمكن من خلالها تحديد أنظمة الغليان والجريان في الأنابيب الشاقولية لجريان صاعد، وتحديد محتوى البخار الكتلتي لمختلف هذه الأنظمة، ومن ثم تحديد علاقة محتوى البخار الكتلتي بالكثافة الحرارية وبالسرعة الكتلية مما يتيح إمكانية التحكم بمحتوى البخار في نقاط مختلفة من الأنبوب ومن تمَّ تحسين إمكانية الاستفادة من الخصائص المميزة للجريان ثنائي الطور.

6. الدراسة التحليلية لأنظمة الجريان والغليان باستخدام العلاقات التجريبية:

تعتمد دراسة أنظمة الجريان والغليان ثنائي الطور في الأنابيب الشاقولية على تقسيم قناة الجريان إلى ثلاث مناطق وفق الآتي الشكل (2):

1. منطقة الجريان أحادي الطور (سائل) بالحمل:

$$h < h' ; T_w < T_s$$

2. منطقة غليان السائل غير المشبع (منطقة الغليان

السطحي (Surface Subcooled Boiling):

$$h < h' ; T_w \geq T_s$$

وتقسم هذه المنطقة إلى قسمين:

(a) يبدأ من النقطة X_{GK} (الإنتالبي النسبي) أي من نهاية منطقة الجريان أحادي الطور (إذ $T_w = T_s$) شكل (2) بداية الغليان السطحي (Surface Subcooled Boiling غير المتطور) وينتهي عند النقطة X_{HK} التي توافق نقطة بداية الغليان السطحي المتطور (Advanced Surface Subcooled Boiling).

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

3. منطقة الغليان الحجمي للسائل

x - محتوى البخار الكتلي الحقيقي للتيار، الذي يساوي نسبة التدفق الكتلي للبخار إلى التدفق الكتلي للمزيج.

لتحديد x ، اقترحت العلاقة التجريبية [2]:

$$\frac{x - X}{(-X_{HV})} = \exp[-(Y - \lambda Y^3)] \quad (5)$$

إذ:

$$Y = 1 + \frac{X}{(-X_{HV})}$$

$$\lambda = 1 - \ln \frac{x_0}{(-X_{HV})}$$

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

x_0 - محتوى البخار الكتلي عند المقطع حيث

$X = 0$ ، المحددة بواسطة العلاقة:

$$X_{HV} = -17 \times \frac{q}{\bar{\rho}w \times r} \times \left(\frac{\bar{\rho}w \times d}{\mu_{sL}} \right)^{0.2} \quad (6)$$

$$x_0 = -0.2 X_{HV}$$

مع استمرار حركة التيار عبر القناة المسخنة، يسخن السائل وتتساوى درجة حرارة الأطوار في مقطع القناة، وتقرب قيم x و X_{HV} .

تحدد قيمة محتوى البخار، التي يمكن عندها عدُّ التيار متوازناً ترموديناميكياً ($X_{pB} \cong x$) بالاستعانة بالعلاقة:

$$\frac{X_{pB}}{(-X_{HV})} = \frac{1.6}{\sqrt[3]{\lambda}} - \frac{1}{4.8 \times \sqrt[3]{\lambda^2}} - 1 \quad (7)$$

هذه الطريقة صالحة من أجل القنوات ذات التسخين المتماثل عبر طول القناة، وذلك عند الشرط:

$$x_{in} < X_{HV}$$

إذ:

$W_{u sL}$ ، $W_{u sG}$ - السرعة الحقيقية لكل من طوري

السائل والبخار على الترتيب (m/s)،

$\bar{\rho}w$ - السرعة الوسطية الكتلية ($kg/m^2 \cdot s$)

r - الحرارة الكامنة للتبخير

$Rw = \rho w$ - السرعة الكتلية للجريان ثنائي الطور

من أجل الجريان ثنائي الطور المتوازن [3] عندما يكون:

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

إذ:

h_L ، h_g - إنتالبي البخار وإنتالبي السائل

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

المشبع على الترتيب

x - محتوى البخار الكتلي

X - الإنتالبي النسبي للجريان ثنائي الطور

تحدد معادلة الإنتالبي النسبي، بالعلاقة:

$$X = \frac{h - h_{sL}}{r} \quad (3)$$

h - الإنتالبي للجريان ثنائي الطور في المقطع المدروس من القناة.

عند غليان الماء غير المشبع ضمن مجال

الضغوط $P = 3 - 15 \text{ MPa}$ ، السرعة الكتلية

$Rw = 400 - 3000 \text{ kg/m}^2 \cdot s$ وكثافة تيار حراري

يحدد محتوى البخار $q = 0.4 - 2.4 \text{ MW/m}^2$ ،

الحجمي الحقيقي φ للجريان ثنائي الطور في الأنابيب

الشاقولية بالعلاقة [2]:

$$\varphi = \left[1 + \frac{W_{u sG}}{W_{u sL}} \times \frac{\rho_{sg}}{\rho_{sL}} \times \frac{1-x}{x} \right]^{-1} \quad (4)$$

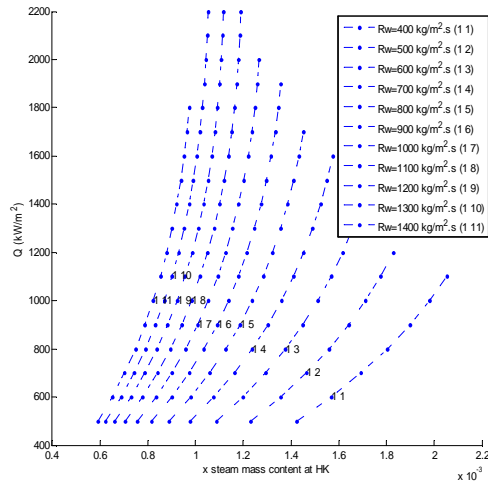
إذ:

$$\frac{W_{u sG}}{W_{u sL}} = \frac{1 - \frac{p}{p_{cr}}}{\hat{e} I + (0.6 + 1.5 \cdot b^2) \frac{p_{cr}}{Fr^{0.25}}} \cdot \frac{\hat{e}}{\hat{e} \sqrt{1 - \exp(-20 b)}} \quad \begin{matrix} \hat{e} \\ \hat{e} \\ \hat{e} \\ \hat{e} \\ \hat{e} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \end{matrix}$$

$$Fr = \frac{W_0^2}{g \times d}$$

β - محتوى البخار الحجمي

p_{cr} - الضغط الحرج



الشكل (4) تأثير الكثافة الحرارية في المحتوى الكتلي للبخار عند بداية الغليان السطحي المتقدم HK (O-LI)

الكثافة الحرارية تؤدي إلى زيادة محتوى البخار الكتلي في النقطة HK "بعلاقة من الدرجة الثانية"، ولكن لا تؤدي الزيادة اللاحقة للكثافة الحرارية إلى زيادة محتوى البخار الكتلي " (1 6)، (1 7)، (1 8)، (1 9)، (1 10)". يتلشى هذا السلوك مع تناقص السرعة الكتلية " (1 1)، (1 2)، (1 3)". من أجل كثافة حرارية معينة يزداد محتوى البخار الكتلي بتناقص السرعة الكتلية، والتزايد في محتوى البخار الكتلي يكون أشد من أجل سرعات كتلية أقل " (1 1)، (1 2)، (1 3)، (1 4)". تمثل الأنابيب " (1 1 4 8)، (1 1 4 9)، (1 1 4 10)، (1 1 4 11)، (1 1 4 12)" شكل (5) على الشكل (4) المنحنى (1 4)، تختلف فيما بينها بالكثافة الحرارية بثبات السرعة الكتلية والضغط وإنتالبي الدخول، كما يلاحظ أن بداية الغليان السطحي المتقدم في النقطة HK (بداية الجزء L_{HK}) تحدث أبكر في الأنابيب، حيث الكثافة الحرارية أكبر.

q - كثافة التيار الحراري kW/m^2

X - الإنتالبي النسبي.

لتحديد المحتوى الحدي للبخار الكتلي للبخار x_{GP} ، المقيس عند نقطة التحول من نظام الحلقي المشتمت إلى نظام المشتمت، تستخدم الصيغة [7]:

$$x_{GP} = 1 - 0.86 \cdot \exp\left(\frac{x}{c} - \frac{19}{rw} \cdot \sqrt{\frac{s \cdot r_{sL}}{d_{eq}}}\right) \cdot \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \quad (8)$$

إذ:

σ - معامل الشد السطحي (N/m).

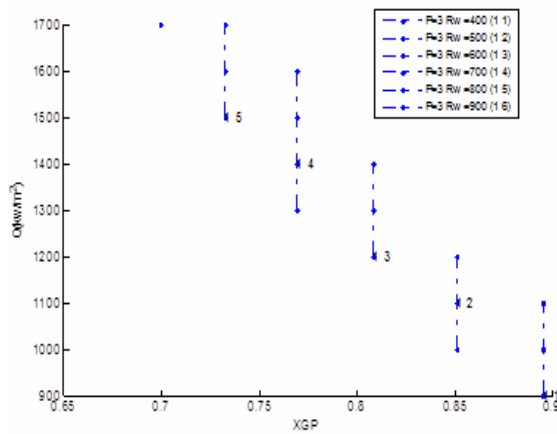
تعُدُّ العلاقة (8) إلى حد ما عامة وعند استنتاجها لم توضع أي من القيود الخاصة على نوع السائل، مجال المتغيرات باستثناء (انخفاض اللزوجة للسائل، $r_{sg} < r_{sL}$ ،

$d \ll s$) [7].

7. النتائج وتحليلها:

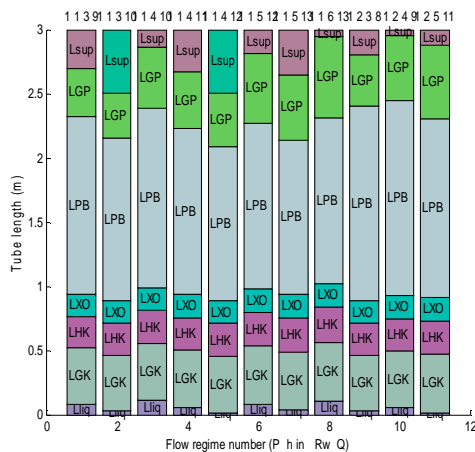
7-1 علاقة محتوى البخار الكتلي x بالكثافة الحرارية q :
7-1-1 علاقة محتوى البخار الكتلي x_{HK} بالكثافة الحرارية q :

يوضح الشكل (4) علاقة محتوى البخار الكتلي بالكثافة الحرارية في النقطة HK التي تمثل بداية الغليان السطحي المنطور، ينضح من الشكل أن زيادة



الشكل (10) تغير محتوى البخار الكتلتي عند بداية الجريان المشتت

x_{GP} كتابع للكثافة الحرارية

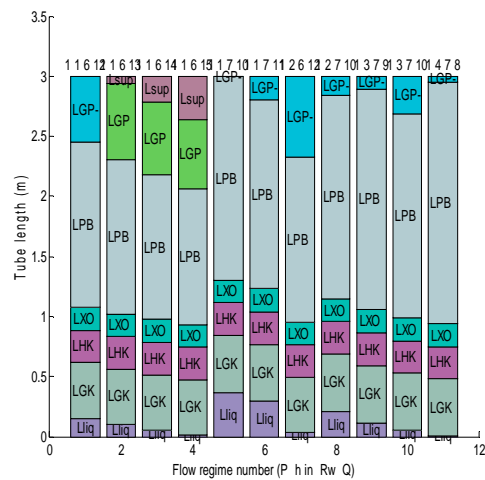


الشكل (11) تغير أنظمة الغليان والجريان على طول الأنبوب - كل أنبوب

يمثل نقطة من المنحنيات المبينة على الشكل (10)

تشير الأنابيب شكل (11) إلى تناقص الطول L_{PB} مع زيادة الكثافة الحرارية، وظهور النقطة GP أكبر، انظر مجموعات الأنابيب "(1 1 4 12)، (1 1 4 11)، (1 1 4 10)"، الأنابيب "(1 1 3 9)، (1 1 3 10)". تمثل المنحنيات "(1 3)، (1 4)" شكل (10) مجموعتي الأنابيب "(1 3 91)، (1 1 3 10)"، "(1 1 4 10)، (1 1 4 11)، (1 1 4 12)".

يلاحظ مقارنة بالشكل السابق (6) أن هذه المنحنيات هي استمرار للمنحنيات السابقة، وهي تستمر في التباعد. في حين يمثل الشكل (9) الأنابيب "(1 1 6 12)"، (1 1 6 13)، (1 1 6 14)، (1 1 6 15) التي تختلف فيما بينها بالكثافة الحرارية بثبات بقية البارامترات، يلاحظ أن بداية الغليان التوازني تحدث أبكر بزيادة الكثافة الحرارية (بداية الجزء L_{PB}).

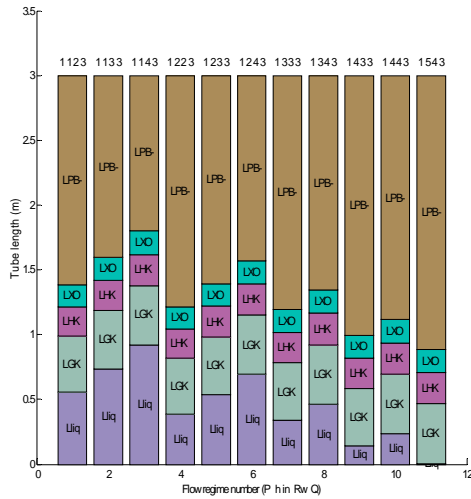


الشكل (9) تغير أنظمة الغليان والجريان على طول الأنبوب - كل

أنبوب يمثل نقطة من المنحنيات المبينة على الشكل (8)

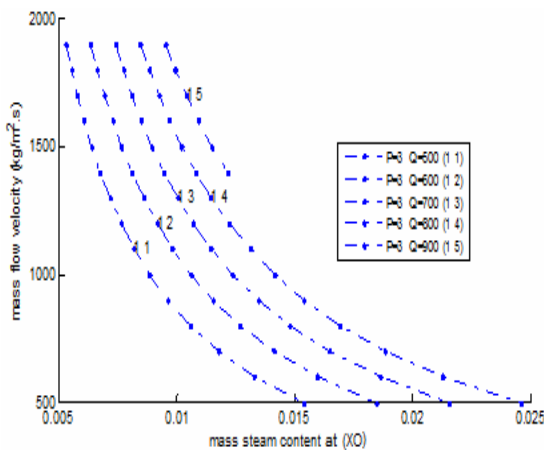
7-1-4 علاقة محتوى البخار الكتلتي x_{GP} بالكثافة الحرارية q_w :

يبين الشكل (10) علاقة محتوى البخار الكتلتي في بداية الجريان المشتت (تحول الحلقي المشتت إلى مشتت) بالكثافة الحرارية من أجل سرع كتلية مختلفة، يلاحظ ثبات محتوى البخار الكتلتي x_{GP} مع زيادة الكثافة الحرارية "(1 1)، (1 2)، (1 3)، (1 4)، (1 5)، (1 6)" ويعمل ذلك بانخفاض عامل انتقال الحرارة في الجريان المشتت لوجود البخار عند الجدران، حيث تصرف الحرارة على رفع درجة حرارة الجدران. من أجل كثافة حرارية ثابتة يتناقص محتوى البخار بزيادة السرعة الكتلية.



الشكل (13) تغيّر أنظمة الغليان والجريان على طول الأنابيب - كل أنبوب يمثل نقطة من المنحنيات المبينة على الشكل (12)
 7-2-2 علاقة محتوى البخار الكتلي x_{XO} بالسرعة الكتلية Rw :

يبين الشكل (14) العلاقة بين السرعة الكتلية ومحتوى البخار الكتلي في النقطة XO من أجل كثافات حرارية مختلفة. يلاحظ وجود علاقة من الدرجة الثانية تشير إلى انخفاض محتوى البخار الكتلي بزيادة السرعة الكتلية من أجل قيمة ثابتة للكثافة الحرارية [8]

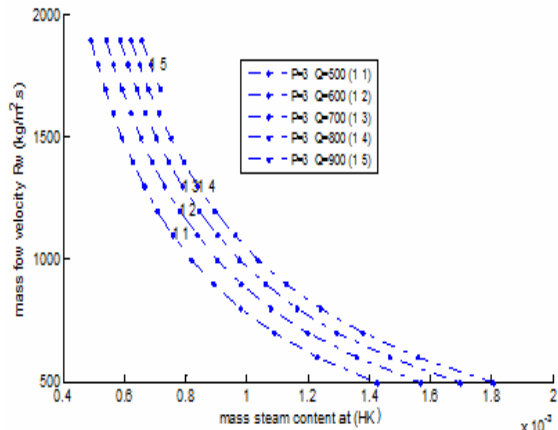


الشكل (14) تأثير السرعة الكتلية في المحتوى الكتلي للبخار عند بداية الغليان الحجمي x_{XO} (O-GK)

7-2-2- علاقة محتوى البخار الكتلي x_{HK} بالسرعة الكتلية Rw :

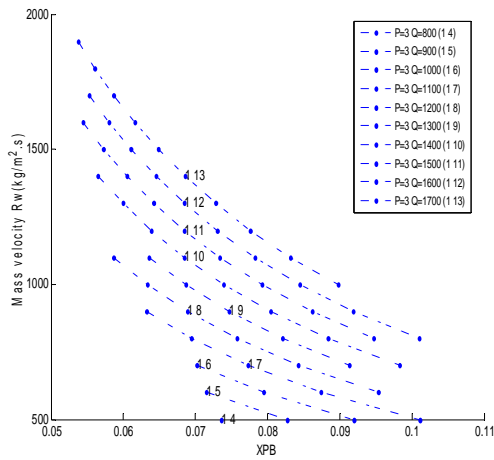
7-2-1- علاقة محتوى البخار الكتلي x_{HK} بالسرعة الكتلية Rw :

يبين الشكل (12) العلاقة بين السرعة الكتلية ومحتوى البخار الكتلي في النقطة HK من أجل كثافات حرارية مختلفة. يلاحظ وجود علاقة من الدرجة الثانية تشير إلى انخفاض محتوى البخار الكتلي بزيادة السرعة الكتلية. من أجل سرعة كتلية ثابتة، يزداد محتوى البخار الكتلي بزيادة الكثافة الحرارية المنحنيات (11)، (12)، (13)، (14)، وهذا يتفق مع [8]. يمكن المحافظة على قيمة ثابتة لمحتوى البخار الكتلي عند النقطة x_{HK} في الأنابيب بزيادة كل من الكثافة الحرارية والسرعة الكتلية



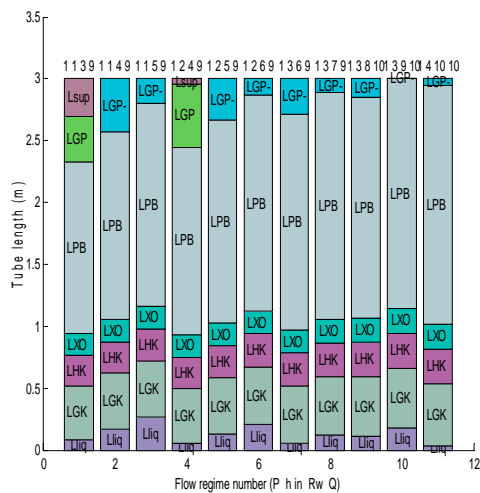
الشكل (12) تأثير السرعة الكتلية في المحتوى الكتلي للبخار عند بداية الغليان السطحي المتقدم x_{HK} (O-GK)

يبين الشكل (13) مجموعات الأنابيب (1 1 2 3)، (1 1 3 3)، (1 1 4 3)، (1 2 2 3)، (1 2 3 3)، (1 2 4 3) التي تختلف فيما بينها بالسرعة الكتلية بثبات البارامترات الأخرى إذ يتضح من الشكل (13) ظهور بداية الغليان السطحي المتقدم (بداية L_{HK}) عند ارتفاعات في الأنابيب تزداد بزيادة السرعة الكتلية.



الشكل (16) تأثير السرعة الكتلية في المحتوى الكتلي للبخار عند بداية الغليان المتوازن X_{PB} (O-LI)

يلاحظ وجود السلوك نفسه المشار إليه في الفقرة السابقة، كما يلاحظ أن طول الجزء المتوازن L_{PB} يزداد بازدياد السرعة الكتلية مع ثبات بقية البارامترات، انظر الشكل (17) الأنابيب " (1 2 4 9)، (1 2 5 9)، (1 2 6 9)".

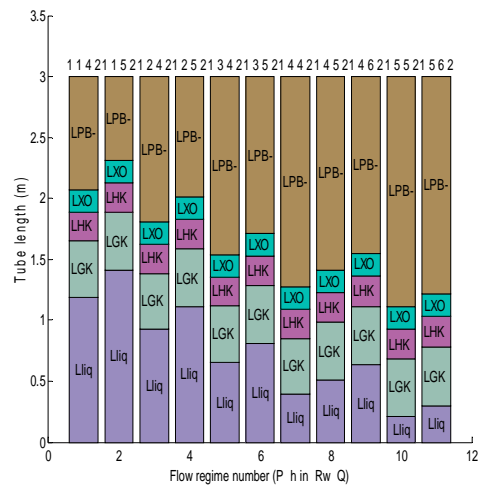


الشكل (17) تغيير أنظمة الجريان على طول الأنابيب - كل أنبوب يمثل نقطة من المنحنيات المبينة على الشكل (16)

7-2-4 علاقة محتوى البخار الكتلي X_{GP} بالسرعة الكتلية R_w :

يبين الشكل (18) علاقة السرعة الكتلية بمحتوى البخار الكتلي عند النقطة X_{GP} من أجل كثافات حرارية مختلفة.

كما يلاحظ السلوك نفسه لهذه المنحنيات مقارنة يلاحظ نفس السلوك لهذه المنحنيات مقارنة بالفقرة السابقة، إلا أن قيم محتوى البخار الكتلي أعلى في الشكل (14) وتوافق بداية الغليان الحجمي XO، انظر المنحنيات: " (1 1)، (1 2)، (1 3)، (1 4)، (1 5)" وهذا ما يتفق مع [8].
يبين الشكل (15) مجموعات الأنابيب " (1 4 4 2)، (1 4 5 2)، (1 4 6 2)"، " (1 5 5 2)"، " (1 5 6 2)" التي تختلف فيما بينها بالسرعة الكتلية بثبات البارامترات الأخرى.



الشكل (15) تغيير أنظمة الغليان والجريان على طول الأنابيب - كل أنبوب يمثل نقطة من المنحنيات المبينة على الشكل (14)

7-2-3 علاقة محتوى البخار الكتلي X_{PB} بالسرعة الكتلية R_w :

يبين الشكل (16) العلاقة بين السرعة الكتلية ومحتوى البخار الكتلي في X_{PB} من أجل كثافات حرارية مختلفة في النقطة X_{PB} .

8. الاستنتاجات والتوصيات:

بإلقاء نظرة تحليلية على ما سبق نستنتج:

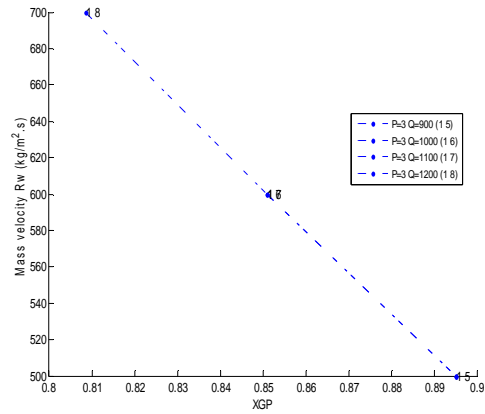
1. تشير علاقة الكثافة الحرارية بمحتوى البخار الكتلّي في نقطة بداية الغليان السطحي المتطور HK إلى أن زيادة الكثافة الحرارية تؤدي إلى زيادة محتوى البخار الكتلّي "بعلاقة من الدرجة الثانية". من أجل سرعات كتلية منخفضة، يكون تزايد محتوى البخار الكتلّي أكبر مما هو في حالة السرعات الكتليّة المرتفعة عند الشروط نفسها. في حين علاقة الكثافة الحرارية ومحتوى البخار الكتلّي في نقطة بداية الغليان الحجمي XO وكذلك في نقطة بداية الغليان المتوازن PB خطية، إذ يزداد محتوى البخار الكتلّي بزيادة الكثافة الحرارية.

2. علاقة محتوى البخار الكتلّي في بداية الجريان المشتت (تحول الحلقي المشتت إلى مشتت) بالكثافة الحرارية، هي خطية يثبت فيها محتوى البخار الكتلّي X_{GP} مع زيادة الكثافة الحرارية، ويعزى ذلك إلى أنه في الجريان المشتت ينخفض عامل انتقال الحرارة لوجود البخار عند الجدران، وتصرف الحرارة على رفع درجة حرارة جدران الأنبوب.

3. علاقة السرعة الكتليّة بمحتوى البخار الكتلّي في نقطة بداية الغليان السطحي المتطور HK، في بداية الغليان الحجمي XO، وفي بداية الغليان المتوازن PB هي علاقة من الدرجة الثانية تشير إلى انخفاض محتوى البخار الكتلّي بزيادة السرعة الكتليّة. يمكن المحافظة على قيمة ثابتة لمحتوى البخار الكتلّي عند النقاط HK، XO، PB، في الأنبوب بزيادة الكثافة الحرارية والسرعة الكتليّة.

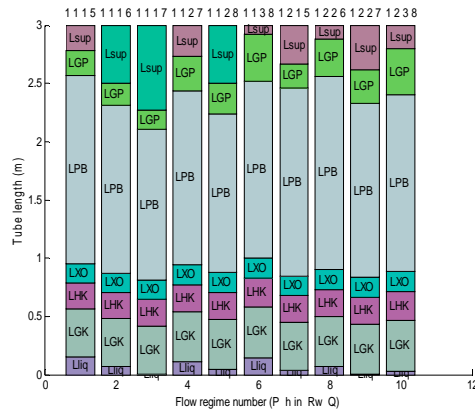
4. علاقة السرعة الكتليّة ومحتوى البخار الكتلّي في نقطة بداية الجريان المشتت (تحول الحلقي المشتت

يلاحظ تطابق المستقيمات على بعضها باختلاف الكثافة الحرارية، انظر المستقيمات " (15)، (16)، (17)، (18)".



الشكل (18) تأثير السرعة الكتليّة في المحتوى الكتلّي للبخار عند بداية الجريان المشتت X_{GP} (O-GK)

يلاحظ أيضاً من الشكل (18) ازدياد محتوى البخار الكتلّي بتناقص السرعة الكتليّة. يبيّن الشكل (19) ازدياد طول الجزء L_{GP} بزيادة السرعة الكتليّة على حساب تناقص الطول في الجزء الأخير من الأنبوب L_{sup} بشكل رئيسي، كما يلاحظ أن بداية الجريان المشتت تحدث بشكل أبكر من أجل سرعة كتليّة أقل، انظر مجموعتي الأنبوب " (1128)، (1138)"، " (1117)، (1127)".



الشكل (19) تغيير أنظمة الجريان على طول الأنبوب - كل أنبوب يمثل نقطة من المنحنيات المبينة على الشكل (18)

- PB - الغليان المتوازن
 GP - الجريان المشتت (تحول الجريان الحلقي
 المشتت إلى مشتت)
 X1 - بخار مشبع
 sup - بخار محمص
 L_{liq} - طول جزء السائل
 L_{GK} - طول جزء الغليان السطحي
 L_{HK} - طول جزء الغليان السطحي المتقدم
 L_{PB} - طول جزء الغليان المتوازن
 L_{XO} - طول جزء الغليان الحجمي
 L_{GP} - طول جزء الجريان المشتت
 L_{SUP} - طول جزء البخار المحمص
 LI-O النظام الرئيسي الذي يبدأ فيه الأنابيب بجزء سائل

إلى مشتت) X_{GP} هي علاقة خطية، وتتطابق المستقيمات مع بعضها باختلاف الكثافة الحرارية نظراً إلى الانخفاض الحاد في معامل انتقال الحرارة بسبب وجود طبقة البخار الملامسة للجدران، إذ تصرف الحرارة على رفع درجة حرارة سطوح التسخين. يلاحظ ازدياد محتوى البخار الكتلتي في هذه النقطة بتناقص السرعة الكتلية.

5. يمكن التحكم بمحتوى البخار في أنظمة الغليان والجريان عن طريق تغيير السرعة الكتلية والكثافة الحرارية بثبات الضغط وإنتالبي الدخول، وهذا يعطي إمكانية متقدمة للإفادة من ميزات ظهور الطور البخاري، وزيادة محتوى البخار لتحسين عامل انتقال الحرارة، إذ ظهور الطور البخاري بالقرب من جدران الأنابيب ضمن الطبقة السائلة الملامسة للجدران تسهم بطريقتين في تحسين التبادل الحراري: الأول تشكل فقاعات البخار يتم عن طريق سحب حرارة بالتبخير، الثاني وجود الفقاعات يزيد الاضطراب، كما أن زيادة محتوى البخار حتى حد معين يؤدي إلى انخفاض عامل انتقال الحرارة.

6. العمل على تجهيز مخبر تتوافر فيه إمكانية إجراء تجارب على الأنابيب المولدة للبخار، مختلفة الأقطار، وبضغوط مختلفة، ولسوائل مختلفة، ومجهزة بأجهزة قياس مناسبة.

7. تأمين التحكم بالجريان ثنائي الطور من حيث الأنظمة ونسب البخار في مختلف التطبيقات (مولدات البخار، أنظمة التبريد والتكييف).

الرموز والمصطلحات:

- GK - الغليان السطحي
 HK - الغليان السطحي المتقدم
 XO - الغليان الحجمي

مسرد المصطلحات L_{liq}	
إنكليزي	عربي
Bubbly Flow	جريان فقاعي
Annular Flow	جريان حلقي
Slug Flow	جريان قذافي
Heat Flux	كثافة حرارية
Critical Heat Fluxes	تيارات حرارية حرجة
Crises Of Heat Transfer	أزمة انتقال الحرارة
Bubbly Boiling	غليان فقاعي
Subcooled Boiling	غليان غير مشبع
Relative Enthalpy	الإنتالبي النسبي
Actual Steam Content	محتوى البخار الحقيقي
Mass Steam Content	محتوى البخار الكتلتي
Dispersed Flow	الجريان المشتت
Mass Velocity	السرعة الكتلية
Surface Subcooled Boiling	الغليان السطحي غير المشبع
Advanced Surface Subcooled Boiling	الغليان السطحي المتقدم غير المشبع
Balanced Boiling	الغليان المتوازن
Dispersed Flow	الغليان المشتت
Superheated Steam	البخار المحمص

المراجع

1. DELHAYE J.M.;GIOT M.; RIETHMULLER M.L.; Thermohydraulics of Two-Phase Systems for Industrial Design and Nuclear Engineering ,1981 Hemisphere publishing corporation, McGraw-Hill Book Company.
2. PETUKHOV B.C.;GENIN L.G.; KOVALEOV S.A.; Heat Transfer in Nuclear Power Units ,1986 Power Atom Press Moscow.
3. DEMENTEV .B. A ;Nuclear Power Reactors ,Power Atom Press-Moscow 1984.
4. POLYANIN, L.N. ; IBRAHIMOV, M.,X.,SOBILOV,G.,E. Heat Transfer in Nuclear Reactors. Energy Press ,Moscow,1982.
5. GHIAASIAAN, M. S. Two-Phase Flow, Boiling and Condensation in conventional and miniature systems. First ed., Cambridge University Press-2008 ,613.
6. GRIGORIEV V.A;ZORIN V.M; Atomic Thermal Electric Stations; Handbook, Energy Press ,Moscow,1982
7. GALCHENCO,E.F.CERGEIEV ,V.V. Generalized data of Boundary Steam Content ,Teploenergetica vol.3-Moscow 1983, p158-159 .
8. HAEIRCHIAN T. GARIMELL A,S.V.; Effects of channel dimension, heat flux, and mass flux on flow boiling regimes in Microchannels International Journal of Multiphase Flow 35 (2009) 349–362 .