

تقييم ظاهرة التموج وسلوك السريان القصي

د. سامح الغول، د. الهادي الدكام، د. عبد الحفيظ المجاني، عبد الرؤوف النعاس
قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية - كلية الهندسة
جامعة طرابلس

ملخص البحث:

السريان المتعدد الأطوار له العديد من التطبيقات المهمة في عالمنا، حيث نجدها في محطات القوى ومصافي النفط ومحطات تحلية المياه والصناعات الكيماوية والمفاعلات النووية والسيارات ومركبات الفضاء. تهتم هذه الورقة بدراسة سلوك ظاهرة سريان طبقة الماء القصي والمتولد من تحرك الهواء الملامس لها بحيث يتزامن سريانها معاً بسرعتين متوسطتين مختلفتين. بنيت منصة اختبار من قناة شفافة مستطيلة المقطع والتي يدفع الهواء خلالها على سطح شريحة (طبقة رقيقة) من الماء الساكن. وقد وظفت آلة تصوير عالية السرعة لالتقاط المشاهد الأنية. نتج عن الترتيبات المأخوذة وتباين ظروف التشغيل موجات سطحية متعددة

الأنماط، الأمر الذي يمكن أن يؤثر بشكل كبير على فيض عمليتي تدفق الكتلة وانتقال الحرارة. هدفت هذه الورقة إلى تحديد سلوك السريان بما يشمل متوسط سرعة طبقة الماء وسمكها وطبيعة الموجات المتولدة. تم إثبات أن كلاً من متوسط سرعة طبقة الماء وخصائص الموجات السطحية تتعلق برتبية معينة مع عدد رينولدز لشريحة الماء وعدد ويبر للهواء، حيث توصلت الدراسة أيضاً إلى وضع علاقات ترابطية مبنية على البيانات المقاسة والملاحظات المسجلة، التي بينت بأن هناك علاقة وطيدة فيما بين ارتفاع طبقة الماء وسرعة السائل، وأن المشاهد له علاقة بالتغيرات في سلوكيات وأنماط سطح الشريحة، على أن هذه العلاقات صالحة بدرجة عالية لسريان الهواء الرقائقي بينما بدرجة أقل للسريان المضطرب.

كلمات مفتاحية: سريان متعدد الأطوار، السريان القصي، الموجات السطحية، تزامن

حركة طورين من الموائع.

رموز وتعريف للمتغيرات المستخدمة:

المتغير وتعريفه	الرمز ووحده	المتغير وتعريفه	الرمز ووحده
القطر الهيدروليكي للقناة	D_h (mm)	عدد رينولدز للهواء	$Re_a = (U_a D_h) / \nu_a$
عدد فرويد	Fr	عدد رينولدز للسائل	$Re_f = L_f / \nu_f$
متوسط سمك طبقة السائل	h_f (m)	درجة حرارة المحيط	T (°C)
متوسط سمك طبقة السائل الحرج	h_{fc}	متوسط سرعة سريان الهواء بالقناة	U_a (m/s)
ارتفاع القناة	H (mm)	متوسط سرعة السائل	$U_f = L_f / h_f$ (m/s)
طول المجرى	L (mm)	عرض القناة	W (mm)
معدل تحميل طبقة السائل	$L_f = Q/W$ (m ² /s)	عدد ويبر	We
معدل السريان الحجمي للسائل	Q (m ³ /s)	عدد ويبر للهواء	$We_a = \rho_a U_a^2 D_h / \sigma$
زاوية ميل القناة بالدرجات	α°		

مقدمة:

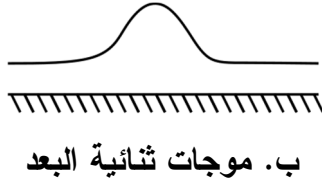
يعد السريان المتعدد الأطوار من التطبيقات المهمة في عالمنا، حيث نجده في محطات القوى ومصافي النفط ومحطات تحلية المياه والصناعات الكيماوية والمفاعلات النووية والسيارات ومركبات الفضاء والعديد من التطبيقات الأخرى. وهو من التطبيقات المتداخلة بين مختلف العلوم الهندسية، حيث نجدها تهتم بتحديد معدل تدفق الكتلة ومعدل انتقال الحرارة عند تزامن السريان المشترك المكون من السائل والغاز منفصلي الطور. إذا تحرك الطوران أثناء سريانها معاً بسرعتين متوسطتين مختلفتين، سينتج عن هذا التحرك تكون موجات ذات طول موجي طويل في شريحة السائل، هذه الموجات المتكونة يمكن أن تؤثر بشكل كبير على فيض عمليتي تدفق الكتلة وانتقال الحرارة. هذا يعني أنه من المهم جداً معرفة كيف تكونت هذه الموجات وعلى ما تعتمد وكيف يمكن تصنيفها وما هو سلوكها وما مدى تأثيرها، الأمر الذي يشجع على دراسة هذه الظاهرة لما لها من أهمية لكل تلك التطبيقات العملية. بالإضافة إلى أن هذا النوع من الأنماط يعد مثلاً لظاهرة الموجات اللاخطية الذي يستخدم كحالة لدراسة وتحليل أساسيات هذه الظاهرة. هناك خمسة أنماط للموجات السطحية المحتملة الحدوث وهي: سطح ناعم، وموجات ثنائية البعد، وموجات ثلاثية البعد، وموجات التقافية وموجات تجزئية [1]. الشكلين رقم (1) ورقم (2) يمثلان رسم تخطيطي يوضح شكل الأنماط المتوقعة للموجات السطحية المحتملة الحدوث. وبشيء من الإيجاز، يُمكن تعريف هذه الأنماط على النحو الآتي: سريان انسيابي ناعم (بدون تموجات)؛ لا توجد أي اضطرابات واضحة على سطح طبقة السائل.

موجات ثنائية البعد: وهي تموجات شبيهة بموجات جيبية. كما هو ظاهر بالشكل رقم (1-ب) ، هذه الموجات يمكن أن تتقاطع بشكل مستعرض تؤدي إلى نشوء اضطرابات عرضية مكونة جبهات منحنية.

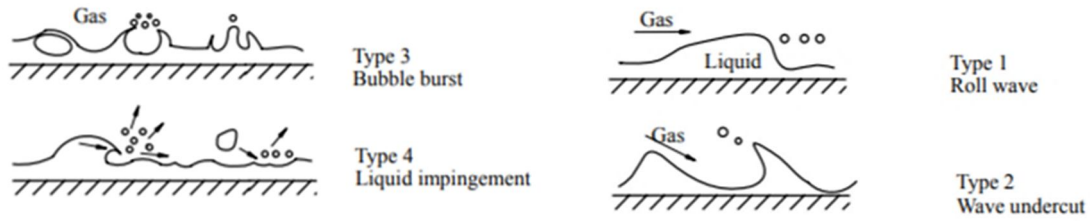
موجات ثلاثية البعد؛ وفيها تتسبب التقاطعات المستعرضة في حالة عدم استقرار، تتحلل الموجة عندها بشكل موضعي إلى ثلاثة أبعاد في بناء له تركيبية متماسكة كما هو ظاهر بالشكل رقم (1-ج).

موجات التفاضلية ؛ هي الموجات الثلاثية البعد تعيد تنظيم نفسها في شكل موجات كبيرة نسبياً ثنائية البعد. تحتوي هذه الموجات عادة في مقدمتها على دوامات تميل للاستقرار حيث يتداخل السائل والهواء كما هو ظاهر بالشكل رقم (1-د).

موجات تجزئية؛ في هذا النمط، القطرات الصغيرة تدفع من سطح الموجات السائلة الالتفافية لتتحرك وتنقل مع التدفق الغازي كما هو ظاهر بالشكل رقم (2).



شكل 1: رسم توضيحي لأنماط المختلفة للموجات السطحية المحتملة الحدوث على سطح المائع.

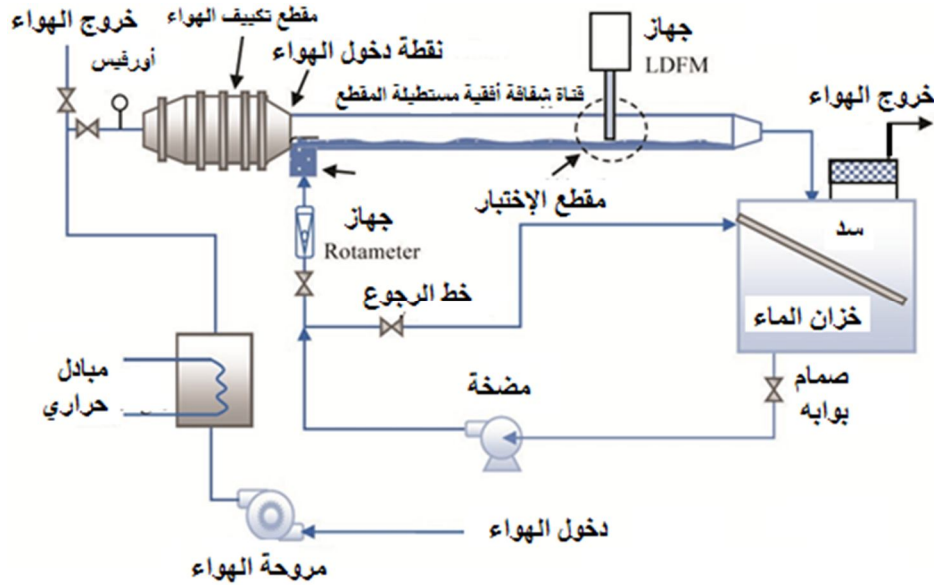


شكل 2: رسم توضيحي لموجات تجزئية مختلفة [2].

العمل البحثي المنشور الذي أجري للدراسة والتعرف على تفاصيل المراحل الانتقالية فيما بين أنماط هذه الموجات خلال هذا السريان المتزامن المشترك يقترح أن هذه المرحلة الانتقالية تتعلق بكل من عددي رينولدز للغاز والسائل معاً. وقد لوحظ عندما يكون عدد رينولدز للغاز عاليًا، فإن الحالة الانتقالية مستقلة إلى حد كبير عن سرعة الغاز [1، 3]. قام كل من ناراسيمهان وديفيد [4] بتكرار هذه الدراسة، ولكن مع خافض للتوتر السطحي، وقد حددا أن هذا كان له أثر استقرار على نمط الموجات السطحية. ليومباس وآخرون [5] أظهروا أن عدد رينولدز الانتقالي كان يعتمد على التوتر السطحي بين الغاز والسائل. فإذا كان الانتقال يعتمد على التوتر السطحي، عليه سيكون أكثر ملاءمة لاستخدام عدد لا بعدي مثل عدد ويبر والذي يستند على السرعة وكثافة الغاز والتوتر السطحي للسائل. هذه الدراسة الحالية هي امتداد لدراسة موسعة تهتم بتأثير السريان القصي على اصطدام القطرات على شرائح السائل المتحركة [6]. ما يتم عرضه في هذه الدراسة هو تحليل ودراسة سلوك شرائح السائل القصي تحت ظروف تشغيل متباينة وتحديد نمط الموجات السطحية المتولدة وربطها بعلاقات وشواهد تتنبأ بالسلوك العام لمنظومة السريان تحت الدراسة.

تجهيز التجربة وظروف التشغيل

تم توليد سريان قص بواسطة ضخ الهواء على سطح طبقة رقيقة من السائل داخل قناة مستطيلة. المكونات الهامة لمنصة السريان القصي المستخدمة في هذا العمل هي مبينة في الشكل 3. الجزء الرئيسي في المنصة هي قناة شفافة، ناعمة السطح، مستطيلة المقطع بأبعادها 25×161 (2000 مم) والتي خلالها يدفع الهواء بسرعة في النطاق (4.5 - 15 م/ث) على سطح طبقة الماء بسماك (0.2 - 1.7 مم). يمكن تغيير زاوية ميل القناة، مع المحافظة على درجة حرارة الهواء الداخل في النطاق من 17 إلى 20°C وذلك باستخدام المبادل الحراري المبين بالشكل. ولكن في هذه الدراسة أقيمت القناة أفقية.



شكل 3: مخطط توضيحي لمنصة التجربة المستخدمة في توليد السريان القصي المختلط.

تتولد حركة شريحة الماء خلال القناة بفعل سريان الهواء القصي؛ لمزيد من التفاصيل حول هذه المنصة وطريقة تشغيلها ينظر المراجع [7، 8]. أخذت قياسات سمك الشريحة وصور

لسطح الشريحة على بعد مسافة 1.5 متراً من مدخل القناة حيث إن كلاً من الهواء وشريحة السائل يعتبر أنه قد وصل لمرحلة النمو الكامل. يلخص جدول 1 ظروف التشغيل للتجربة والتي أجريت باستخدام ماء شبكة المدينة. تم استخدام آلة تصوير عالية السرعة مثبتة فوق القناة وتميل بزواوية 46° على الأفقي لرصد وتحديد حدود أنماط الموجات. يتم الحصول على سمك الشريحة الآني والمتوسط بدقة عالية باستخدام مقياس إزاحة بؤرة ليزيرية. يتم استخدام بطاقة الحصول على بيانات لأخذ الجهد الخارج من جهاز LFDM وتحويله إلى جهاز كمبيوتر حيث يتم معايرة البيانات وتحليلها.

جدول 1: الظروف التشغيلية لسريان شريحة الماء القصي.

وصف العنصر	الرمز	الوحدات	القيمة
عرض القناة والشريحة	W	mm	161
ارتفاع القناة	H	mm	25
طول المجرى	L	mm	2000
زاوية ميل الشريحة بالدرجات	α	$^\circ$	1
معدل سريان الماء بالنسبة لعرض القناة / تحميل الشريحة	L_f	cm^2/s	2.28 – 0.36
متوسط سرعة سريان الهواء بالقناة	U_a	m/s	15.0 – 4.5
درجة حرارة الهواء	T_{amb}	$^\circ\text{C}$	20 – 17

تمت معايرة كل الأجهزة المستخدمة في هذه التجربة لضمان الحصول على نتائج دقيقة. كما تم اختبار تكرارية المنصة بقياس متوسط سمك شريحة الدفع القصي عدة مرات (باستخدام LFDM) عند إعدادات معينة لمعدلي سريان الهواء والماء. وبناءً على النتائج المتحصل عليها يمكن اعتبار التجربة قابلة للتكرار بنسبة خطأ لا تتجاوز 6%. كان عدد فرويد (Fr) أكبر من 1 في جميع القياسات المبينة في الأشكال، مما يشير إلى أن السريان هو سريان فوق الحرج في تصنيف سريان القنوات المفتوحة.

فرضيات العمل البحثي في الدراسة:

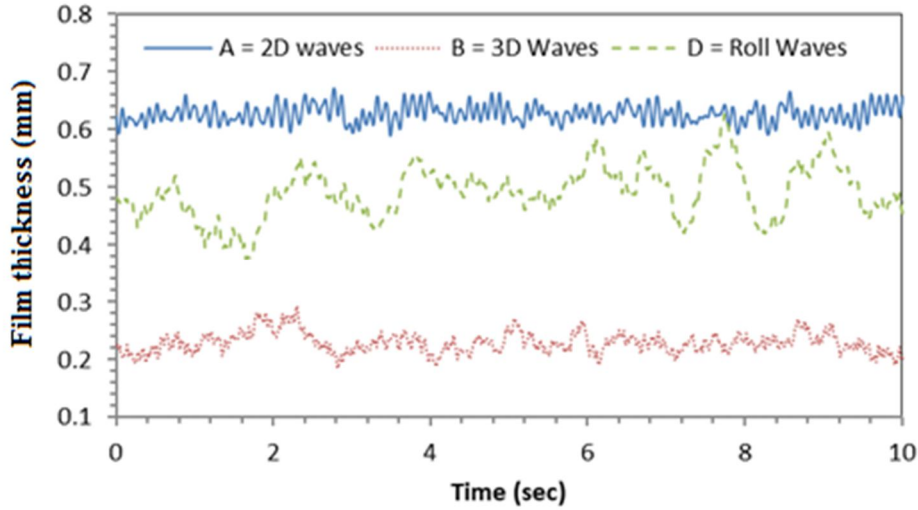
هناك عدد من الفرضيات المتعلقة بالشكل الهندسي وخصائص مائع التشغيل وظروف التشغيل، والتي تعد في مجملها مقبولة في مجال البحث الهندسي في موضوع الدراسة. هذه الفرضيات تشمل النقاط الواردة الآتية:

1. أخذ في الاعتبار تحقيق التشغيل المستقر أولاً في كل مراحل الاختبار ومن ثم جمع البيانات المقاسة عند الاستقرار.
2. أسطح القناة الداخلية هي ناعمة ولا تحوي القناة على عوائق تذكر، وأن شرط اللانزلاق محققاً بين سطح القناة والسائل.
3. سريان الماء وسريان الهواء يُعدان لا انضغاطيان نظراً لسرعة التشغيل المنخفضة.
4. درجة الحرارة شبه ثابتة على امتداد القناة ولا وجود لتدرج درجة الحرارة.
5. سريان الماء ثنائي البعد نظراً لاتساع القناة نسبة لسمك الشريحة.
6. يلاحظ تدني تدرج الضغط في قناة واسعة وقصيرة نسبياً، ولا يتوقع أن يكون له أثر ملحوظ على سلوك السريان المشترك.
7. لا وجود لأي تفاعل كيميائي بين السائل والغاز.
8. ضغط التشغيل للموائع داخل القناة أعلى بكثير من ضغط بخار السائل.
9. لا يتوقع أن تكون هناك اهتزازات بمستوى يؤثر على سير التجربة.

نتائج ومناقشة:

كما تم التوضيح سابقاً فإن السمك اللحظي لطبقة الماء تم قياسه باستخدام جهاز LFDM بدقة قياس وتكرارية عالية، والشكل 4 يوضح ثلاثة أمثلة لسمك طبقة الماء كعينات للقياسات

اللحظية تحت ظروف سريان مختلفة التموج السطحي. الملاحظة الأولية من هذا الشكل أن تردد الموجات السطحية كان أعلى ما يمكن في حالة الموجات الثنائية وأقل ما يمكن في حالة الموجات الالتفافية.



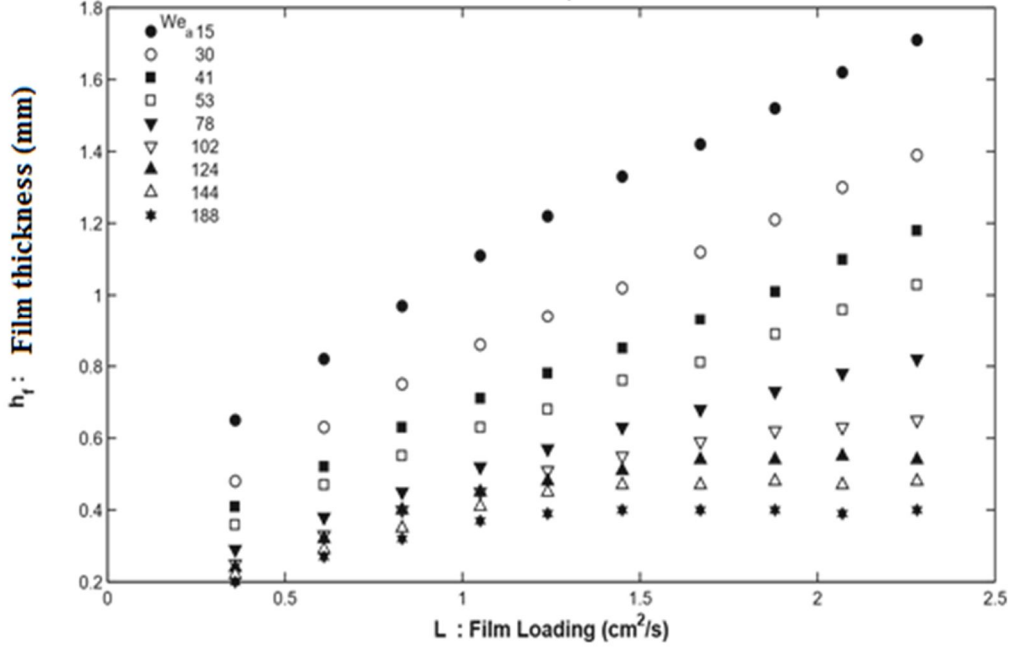
شكل 4: قياسات لحظية لارتفاع سمك الشريحة لثلاثة أنماط للموجات السطحية.

متوسط سمك الشريحة:

يوضح شكل 5 متوسط سمك الشريحة الذي تم الحصول عليه بواسطة جهاز LFDM بدلالة كل من تحميل طبقة الماء وعدد وبيير للهواء. بشكل عام، يمكن ملاحظة أنه عند زيادة تحميل الشريحة عند ثبوت سرعة الهواء سيسبب هذا في زيادة غير خطية في سمك الشريحة. تعرض هذه البيانات المتحصل عليها الخصائص نفسها الواردة في المراجع [1]، التي يمكن تلخيصها في الآتي:

- يصبح سمك الشريحة مستقلاً عن مقدار تحميل الشريحة (وبالتالي مستقلاً عن عدد رينولدز للشريحة) بعد الوصول إلى سرعة هواء حرجة.

- تحدث بداية الاستقلالية عند معدلات تحميل مختلفة للشريحة لسرعات هواء مختلفة.
- سمك الشريحة عند الاستقلالية يعتمد على سرعة الهواء.



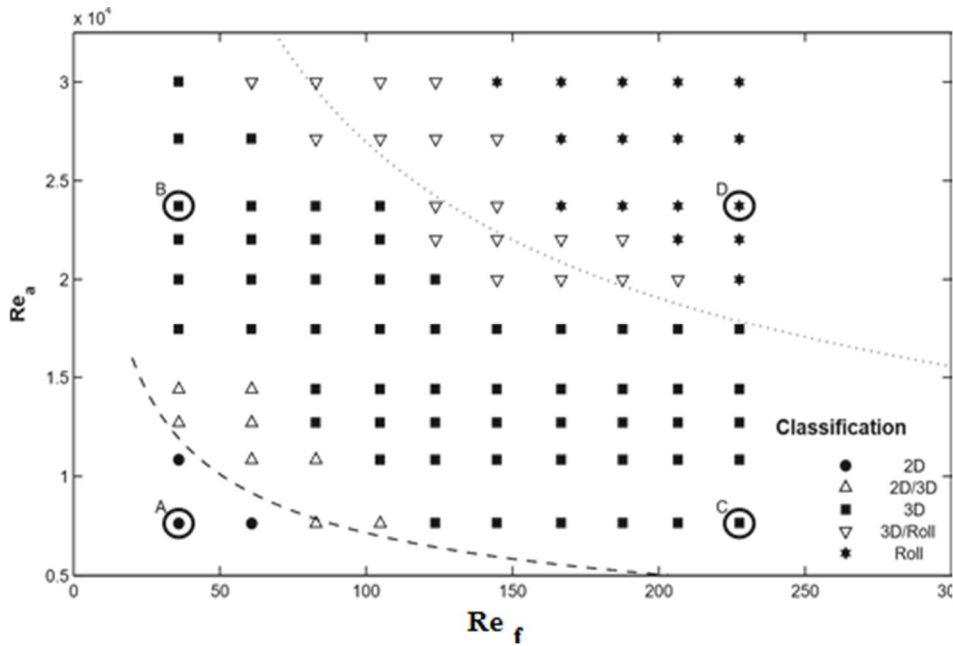
شكل 5: قياسات سمك شريحة الماء لمعدلات سريان مختلفة للماء والهواء.

تصنيف السريان حسب الموجات السطحية:

الصور التي أخذت لسطح الشريحة بواسطة آلة التصوير عالية السرعة عند كل النقاط (الموضح نتائجها في شكل 7) تمت دراستها، وقد تم بيان خصائص الأسطح وتم تصنيفها إلى الأنماط التي تم تقديمها ومناقشتها في مقدمة هذه الورقة في المناطق الانتقالية بين الموجات ثنائية البعد والثلاثية البعد وكذلك بين الموجات اللتقافية والتجزئية كان هناك بعض الشك في تصنيف الصور المتحصل عليها وبالتالي تم تصنيفها بمناطق انتقالية. الشكل 5 يوضح تصنيف

النقاط المتحصل عليها وفقاً للموجات السطحية للتدفق كدالة في عدد رينولدز للماء وعدد رينولدز للهواء.

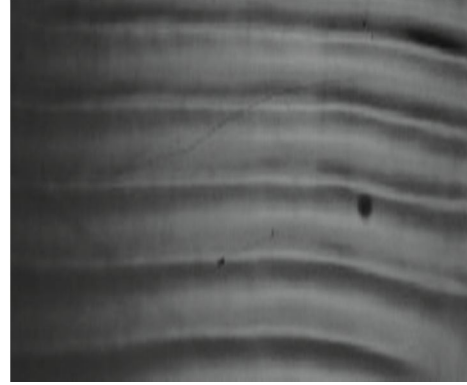
ينبغي ملاحظة أن سلة البيانات هذه لها سلوك كما هو متوقع، وحيث إن أي علاقات معاملاتية تم تحديدها في الدراسة ينبغي أن تكون قابلة للتطبيق على الأعمال البحثية الأخرى ذات العلاقة. من النتائج المعروضة تم تسليط الضوء على أربع نقاط هي A و B و C و D. وتم بيان الأربع نقاط المميزة بالشكل 6، وصور لخصائص السطح في الشكل 7 الذي يوضح الخصائص السطحية للموجة. وسنتناول في هذه الورقة العلاقة الترابطية فيما بين هاتين السلتين من المعلومات لتعيين علاقة بسيطة لتحديد نقطة التحول في هذا النطاق من النتائج المتحصل عليها.



شكل 6: خارطة نمطية للموجات بالنسبة لعدد رينولدز للهواء والماء تميز بين أربع أمثلة موضحة في شكل 5 وكذلك الحالات الانتقالية بين أنماط سطح الموجه.



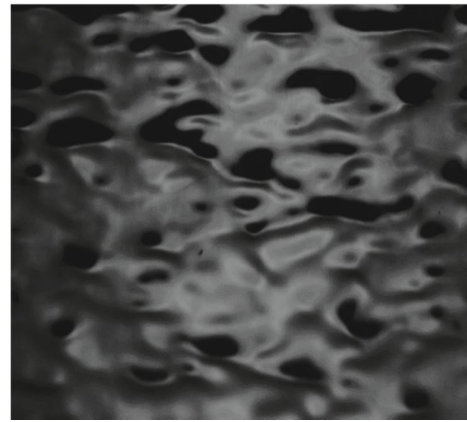
موجات ثلاثية البعد



موجات ثنائية البعد



موجات تجزئية



موجات التفاضلية

شكل 7: صور لمسط أفقي لسطح الموجة للسريان القصي في أربعة أنماط للموجات.

تعيين العلاقات الترابطية:

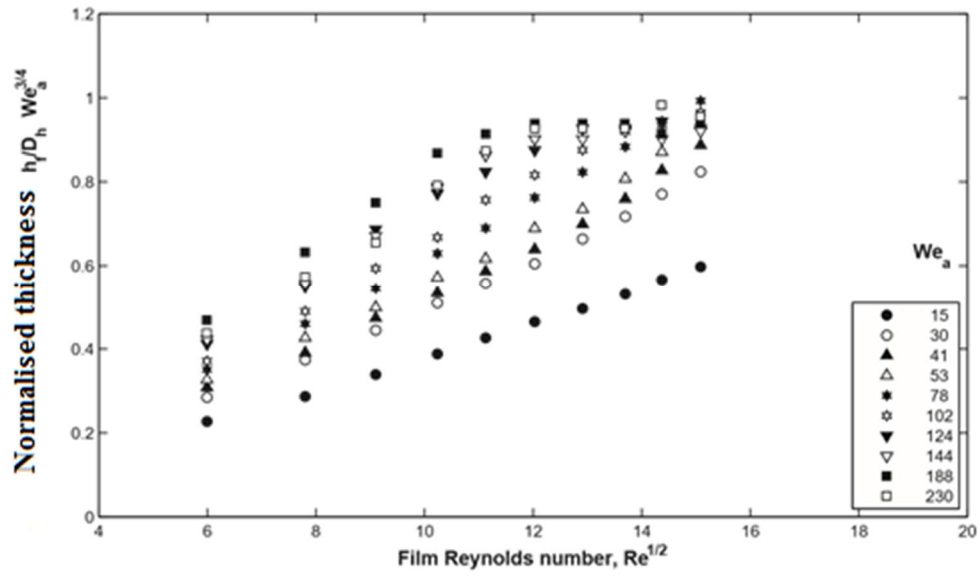
كما سبق ذكره في الفقرة السابقة، فإن سمك الشريحة يصل إلى السمك الحرج، h_{fc} ، كلما زاد عدد ويبر للهواء، We_a ، وأن سمك الشريحة الحرج هذا يعتمد على سرعة الهواء. في هذه الورقة قد تقرر استخدام عدد ويبر للهواء We_a ، الذي يمكن تعريفه على النحو الآتي:

$$We_a = \rho_a U_a^2 D_h / \sigma \quad (1)$$

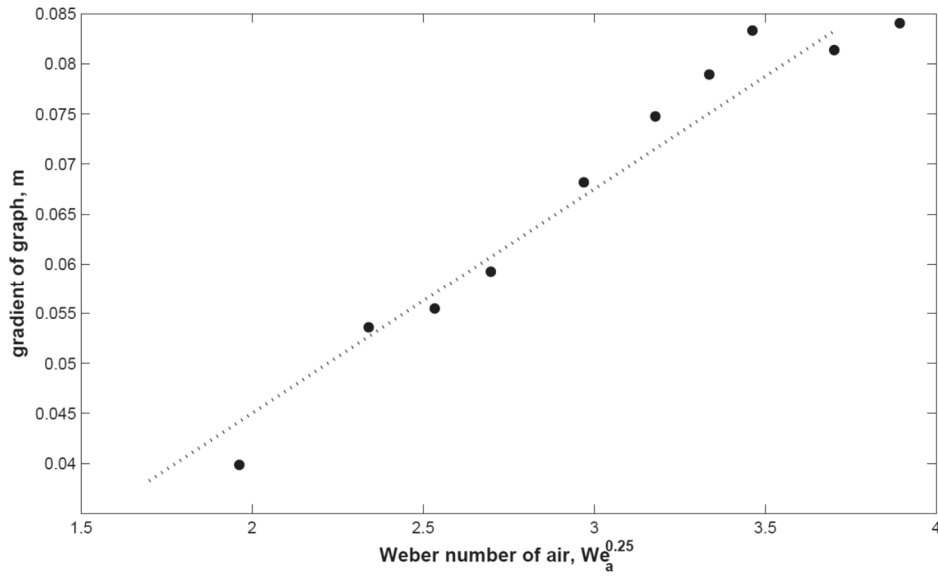
حيث إن α هي التوتر السطحي للماء. وقد أخذ عدد ويبر هذا بدلاً من عدد رينولدز للهواء؛ لأجل تحديد مدى تأثير الهواء على سطح الشريحة. إنه من المتوقع أن تكون للتوتر السطحي أهمية كبيرة في تبادل الطاقة بين الهواء والسائل خلال تطور الموجات السطحية، الذي حدد لنا اختيارنا للأعداد اللابعدية التي سوف نستخدمها في الدراسة. بالإشارة إلى شكل 5، يمكن مشاهدة أنه كلما زاد عدد ويبر، يصبح ارتفاع الشريحة تقريبياً ثابتاً وتصبح سمة سطح الشريحة مستوية. إنه من السهل اشتقاق علاقة رياضية تمثل سمك الشريحة الحرج h_{fc} ، حيث نجد أنه يعتمد على عدد ويبر للهواء We_a على النحو الآتي:

$$h_{fc} = 0.02 We_a^{-3/4} \quad (2)$$

إذا تم إعادة رسم شكل 5 وذلك برسم المتغير المشترك اللابعدي h_f/h_{fc} مع الجذر التربيعي لعدد رينولدز للشريحة، $Re_f^{1/2}$ ، تتحقق اعتمادية سمك الشريحة على عدد ويبر كما جاء بيانه في شكل 8. كذلك يتضح جلياً أنه عند ظهور قيم حدية منخفضة فإن العلاقة هي علاقة خطية وأن التدرجات تظهر اعتمادية على عدد ويبر. ويمكن أن نرى بوضوح علاقة خطية لهذه البيانات مع $We_a^{1/4}$ في شكل 9.

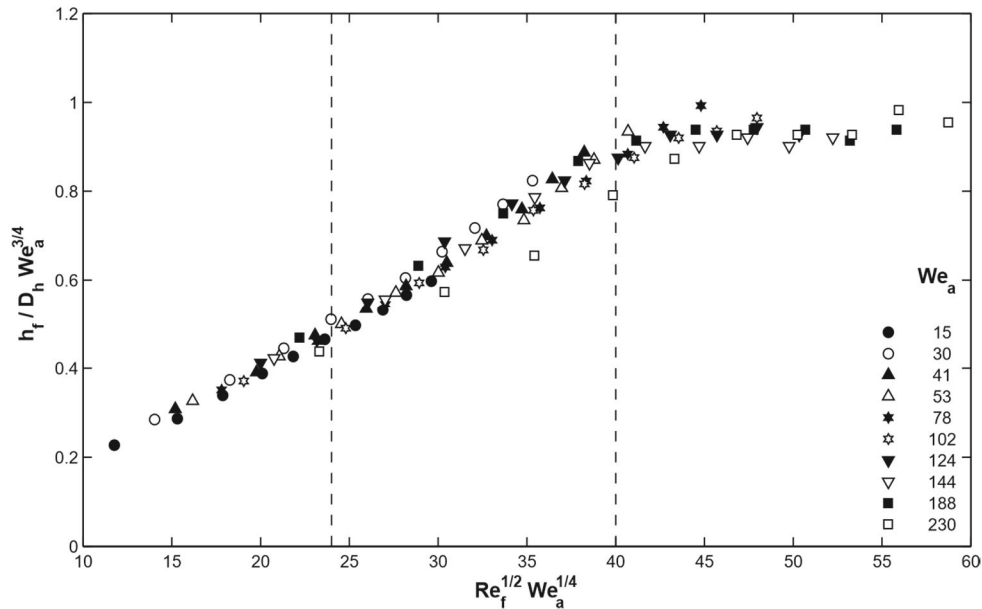


شكل 8: التأكيد على أن سمك الشريحة يحدد من خلال رقم ويبر، وأن ميل الخطوط يعتمد على عدد ويبر.



شكل 9 : العلاقة الطردية بين ميل الخطوط وعدد ويبر للأس 0.25.

هذه البيانات يمكن أن توضع مع بعضها كما هو موضح في شكل 10، والذي يبين أن سمك الشريحة اللابعدية (تطبيع) هو دالة في تركيبة العددين؛ $We_a^{1/4} Re_f^{1/2}$. وهذا يبين أن جميع النقاط تقع ضمن علاقة رتيبة تصاعدية. كما تم تمييزه، هذه العلاقة لديها ثلاثة تغييرات في الميل. وهذا ينبغي أخذه في الاعتبار عند محاولة اشتقاق العلاقة. الآن يمكن أن نستخدم عدد ويبر لرسم كل من المحورين. ولقد تم التعامل مع الاشتقاق بعناية كبيرة، وهذا يدعم الوثوق في العلاقة المشتقة وليست مجرد بيانات غير متجانسة. كما تجدر الإشارة إلى ما يمكن ملاحظته في شكل 10، وهو أنه عند أعلى قيم لعدد ويبر نجد أن البيانات تتحرف بشكل واضح عن بقية البيانات. هذا يمكن أن يدون على أساس أن السريان رقائقي عند القيم المنخفضة لعدد ويبر ومن تم بداية الانتقال إلى السريان المضطرب عند القيم العليا لعدد ويبر [7].



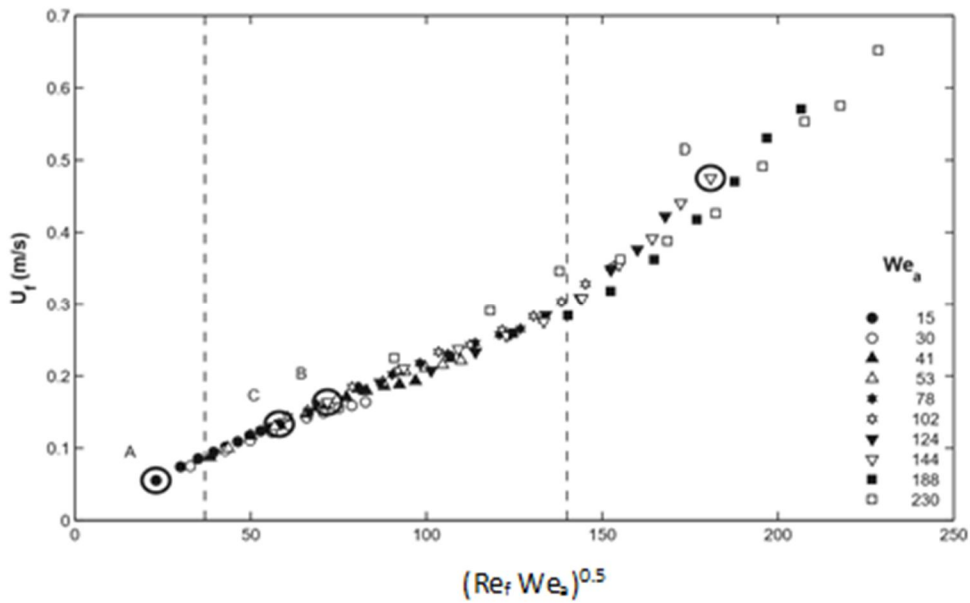
شكل 10 : البيانات المجمعمة المشتركة توضح ثلاث مناطق خطية مميزة بتحويلات واضحة.

يمكن الجمع بين معاملات تحميل الشريحة وسمكها للخروج بقيمة تمثل متوسط سرعة شريحة السائل، U_f . بإجراء تحليل للمعاملات بطريقة مماثلة لما تم أعلاه للمتغير h_f ، يقود إلى أن U_f تتناسب طردياً مع $Re_f^{1/2}$ و $We_a^{1/2}$ ، مما يوحي بأن سرعة الشريحة هي دالة في $(Re_f We_a)^{1/2}$. وعليه يمكن الجمع بين هذه العلاقات المشتقة مرة أخرى وقد تم عرض النتيجة في شكل 11.

مرة أخرى فإن البيانات عند القيم العليا لعدد ويبر تحيد قليلاً عما تمتلته هذه العلاقة. الفرضية الأكثر وضوحاً هو أن التحولات في البيانات تتم بسبب التغير الحاصل في أنماط الموجات السطحية وهذا ما سيتم تأكيده في الفقرة الآتية. وهذا يبين أيضاً وجود ثلاث مناطق من التدرجات المختلفة مع تحولات عند؛

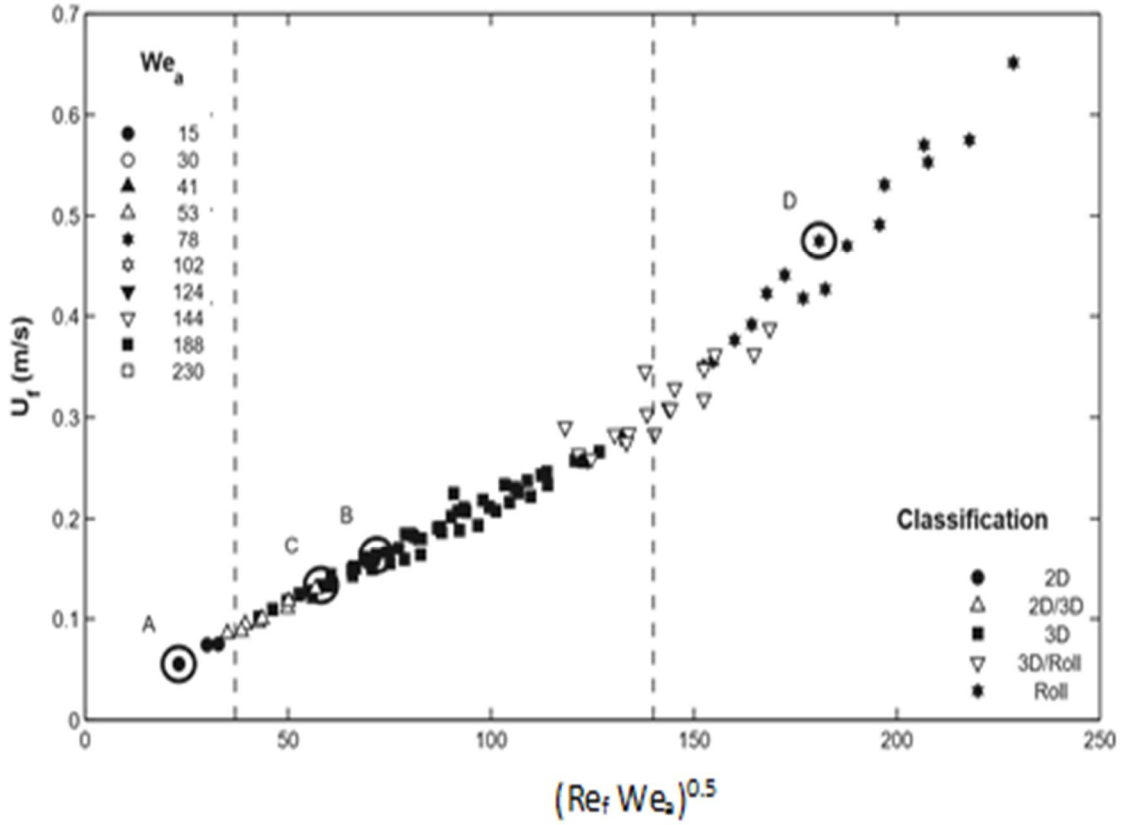
$$(Re_f We_a)^{1/2} \approx 39 \text{ and } 140 \quad (3)$$

الأنماط الثلاثة للموجات التي تمت مشاهدتها في منصة التجربة هذه (بعد رصدها بواسطة آلة التصوير عالية السرعة أعلى القناة كانت)؛ موجات ثنائية البعد، موجات ثلاثية البعد، وموجات التفاضلية. ويمكن تحديد ثلاث مناطق خطية على الرسم. يوضح شكل 6 أربع حالات للموجات، ويعرض أمثلة على هذه الأنماط من الموجات. التحول فيما بين هذه الأنماط ليس حاداً لنمطين مختلفين من الموجات ولعله من الصعب الفصل بينهما عند بعض النقاط؛ فمثلاً بين الموجات الثنائية والثلاثية البعد أو بين الموجات الثلاثية البعد والالتفاضلية. وهذا الافتقار إلى تحديد مرحلة التحول الواضحة تظهر جلياً في شكل 5.



شكل 11 : العلاقة بين متوسط سرعة الشريحة و $(Re_f We_a)^{1/2}$ (ثلاث مناطق خطية يمكن تمييزها، حيث تم وضع علامات على المخطط تبين مواقع الحالات الأربعة الموضحة في شكل 7).

هذه الأنماط للموجات السطحية مهمة؛ لأنها تتوافق مع الظروف المختلفة لسريان الحرارة وانتشار الكتلة. يمكن استخدام المعلومات الواردة في الشكلين 10 و 5 للتحقق من الفكرة المقترحة وهي أن التحولات مرتبطة بالتغيرات في أنماط الموجات السطحية. شكل 12 يتطابق مع شكل 11، ولكن الآن الرموز مقترنة مع نمط الموجة السطحية. وهذا يثبت أن التحولات التي لوحظت في الفقرات السابقة عند قيم معينة للبند $(Re_f We_a)^{1/2}$ كانت بسبب التغيرات في نمط الموجة السطحية ويبدو أن هذا هو البند الفعال لاستخدامه في تحديد خصائص الموجة السطحية لحالات السريان القصي.



شكل 12 : هذا تكرار للشكل 10، ولكن تم وضع علامات تبين نمط الموجة السطحية.

خلاصة واستنتاجات:

تم إثبات أن متوسط سرعة الشريحة تتناسب طردياً مع معدل تحميل الشريحة وسرعة الهواء وذلك من خلال عدد رينولدز للشريحة، Re_f ، وعدد ويبير للهواء، We_a . وقد تم بيان أن التحولات في خصائص الموجة السطحية يمكن تمييزها في حالة السريان القصي فيما بين الماء والهواء لسريان مشترك في قناة مستطيلة المقطع وذلك باستخدام المتغير $(Re_f We_a)^{1/2}$. فقد تبين أن هذه التحولات تحدث عند القيم؛ $(Re_f We_a)^{1/2} \approx 39$ and 140 ، وهذا كان جلياً عند

مقارنة خصائص الموجة السطحية مع قيم $(Re_f We_a)^{1/2}$ ، وكانت التغيرات في خصائص الموجة السطحية واضحة تقابل التحولات المشار لها في سلوك الشريحة الدقيقة. كما تم بيان أن التغير في سمك الشريحة يبقى محدودًا بقيم تتعلق فقط بعدد ويبر للهواء عند ارتفاع عددي ويبر للهواء ورينولز للماء. وهنا في هذه الحالة تم الوصف بكل ثقة بأن هناك علاقة وطيدة فيما بين سمك الشريحة وسرعة السائل. هذه العلاقة تظهر التحولات الحاصلة عند قيم معينة لعدد رينولز وعدد ويبر، وكان من المؤكد أن النتائج لها علاقة بالتغيرات في سلوكيات سطح الشريحة. مما سبق، هنا يمكن القول بأن هذه العلاقات المذكورة المستتبطة صالحة جدًا لسريان الهواء الرقائقي، بينما عند القيم العالية لعدد ويبر تبدأ النقاط في الابتعاد عن مسار العلاقات المشتقة وهذا النطاق يبدو أنه يحتاج إلى المزيد من الدراسة والبحث.

المراجع:

- [1] T. J. Hanratty, J. M. Engen, *AICHE 3* (1957) 299–304.
- [2] Bo JIAO, Li-min QIU, Jun-liang LU, Zhi-hua GAN, *Journal of Zhejiang Univ Sci A* 2009 10(3):398-417
- [3] L. A. Jurman, M. J. McCready, *Physics of fluids A-Fluid dynamics 1* (1989) 522–536.
- [4] T. V. Narasimhan, E. J. David, *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals 11* (1972) 490–497.
- [5] J. S. Lioumbas, A. A. Mouza, S. V. Paras, *Chemical engineering Science 61* (2006) 4605–4616.
- [6] S. Alghoul, C. N. Eastwick, D. B. Hann, in: *ILASS-Europe 2010, 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and spray systems.*

[7] S. Alghoul, *Experimental investigation of a single droplet impact onto moving films.*, Ph.D. thesis, University of Nottingham, 2011.

[8] C. N. Eastwick, B. J. Azzopardi, K. A. Simmons, C. Young, P. Morrison, in: *Proceedings of ASME Turbo Expo 2005; Power for Land, Sea and Air. Reno, USA: New York: ASME Press.*