

حساب الخطأ الناتج عن اللاتجانس في تقنية قياس التدفق بزمن وصول النبضة فوق الصوتية

الدكتور جبر حنا *

الدكتور عفيف صقور **

أحمد السيد ***

تاريخ الإيداع 8 / 7 / 2008 . قُبِلَ للنشر في 16/10/2008

□ الملخص □

تعتبر تقنية قياس التدفق باستخدام الأمواج فوق الصوتية تقنية واحدة جداً، و على كونها مطبقة بالفعل، فإنها لا تزال غير مرضية في الظروف غير المثالية للتدفق. تقسم تقنيات القياس باستخدام الأمواج فوق الصوتية إلى صنفين أساسيين هما: القياس باستخدام زمن وصول النبضة و القياس باستخدام انزياح دوبلر. تعتمد كل من هاتين الطريقتين على عدة منهجيات في قياس المقدار الفيزيائي. نناقش في هذه المقالة طريقة القياس باستخدام زمن وصول النبضة و ندرس عدم الدقة الذي ينشأ نتيجة التوزيع غير المنتظم للتدفق . نقدم في الجزء الأول من هذه المقالة المعادلات الفيزيائية التي تصف تقنية القياس ، ثم نناقش بطريقة رياضية مثالاً توضيحياً لحالة ابتدائية، و بعدها نستخدم برنامجاً مبني بواسطة Matlab للحصول على منحنيات تبين تأثير الأشكال المختلفة للتدفق على دقة القياس. كما نناقش الحالة التي يكون فيها أكثر من سرعة للصوت، و حالة وجود فقاعات غازية أو دوامات.

الكلمات المفتاحية: الأمواج فوق الصوتية- زمن وصول النبضة- خطأ القياس- التدفق الصفائحي- دوامات- فقاعات غازية- حساب المعدل.

*أستاذ مساعد-قسم هندسة الحاسبات و التحكم الآلي-كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية سورية.
**مدرس في قسم هندسة الاتصالات و الإلكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية-جامعة تشرين اللاذقية-سورية.
***طالب دراسات عليا(ماجستير) - قسم هندسة الحاسبات و التحكم الآلي-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

Estimating the Measurement Error Caused By Flow Heterogeneity in the Ultrasonic Pulse Arrival Time Measurement Technique

Dr. Jabr Hanna^{*}
Dr. Afif Sakkour^{**}
Ahmad Alsayed^{***}

(Received 8 / 7 / 2008. Accepted 16 / 10 / 2008)

□ ABSTRACT □

Flow measurement technology using ultrasonic waves is very promising. Although this technology is already in use, it still demonstrates a rather lousy performance in non-ideal situations. The measurement techniques using this technology can be classified into two major categories: Pulse arrival time and Doppler shift. Each of these two major techniques can be subdivided into several methods in terms of measuring the physical parameter. In this paper, we discuss the technique of pulse arrival time and the inaccuracy caused by flow inequalities. We first furnish the mathematical equations, discuss an example, and then make use of a program built by Matlab to obtain curves that illustrate the effect of various flow possibilities on accuracy. Then we turn to discuss the case when there is more than one speed of sound, gas bubble, or whirl .

Keywords: Ultrasonic, pulse arrival time, measurement error, laminar flow, whirls, gas bubbles, averaging .

^{*} Associate Professor, Department of Computers and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

^{**} Assistant Professor, Department of Communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

^{***} Postgraduate Student, Department of Computers and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة :

عندما ظهرت تقنية قياس التدفق باستخدام الأمواج فوق الصوتية لأول مرة كانت توقعات العاملين في مجال التحكم الآلي بشأنها كبيرة وذلك بسبب خواصها الرائعة. إن لتقنية القياس باستخدام الأمواج فوق الصوتية ميزات هائلة [2,5,6] إذ إنها بخلاف جميع المقاييس المنافسة تقريباً يمكن أن تصمم لتكون لا اقتحامية Non-intrusive ، أي تركيب فوق الخط و بالتلاصق معه Clamp-on و هي بالتالي لا تتضمن تماساً مع السوائل المتدفقة و هذا مهم جداً في حالة الموائع و الغازات التي لها نشاط كيميائي عالٍ، و التي تفرض على المهندسين تصميم أدوات قياس تدفق تقليدية مصنعة من مواد خاصة باهظة الثمن. تبرز الميزة المهمة جداً لهذه المقاييس في حالة رغبة مهندسي التشغيل في منشأة معينة (مصفاة نفط مثلاً) أن يضيفوا مقياساً لقياس التدفق في خط معين لم يتم تزويده بهذا المقياس عند بناء المصفاة لأول مرة، ففي حالة المقاييس التقليدية التي تركيب بشكل تسلسلي يجب اقتطاع جزء من الخط لفتح مكان لوضع المقياس ثم القيام بلحام الشفاه flanges ثم تركيب المقياس، وهذه عملية تتطلب الكثير من الوقت و الجهد و تتطلب توقف الضخ في هذا الخط و بالتالي تؤدي إلى خسارة اقتصادية، بينما في حالة المقياس فوق الصوتي المصمم ليركب على السطح الخارجي للخط نستغني عن كل هذه التعقيدات. هناك ميزات أخرى للمقاييس فوق الصوتية مثل أنها لا تسبب هبوطاً في الضغط لأنها لا تشكل إعاقة في طريق الجريان و لايزداد ثمنها و حجمها بازدياد حجم الخط، و أنها تعمل مع السوائل الناقلة كهربائياً و السوائل العازلة كهربائياً على حد سواء ، و غير ذلك من المميزات المدهشة التي كان يجب أن تُخرج كل المنافسات خارج السوق نهائياً لولا السلبية الوحيدة لتقنية القياس بواسطة الأمواج فوق الصوتية، و هي حساسيتها للظروف غير المثالية. تتعدد الظروف غير المثالية من الضجيج إلى عدم انتظام التدفق. تم في الدراسات التي تعاملت مع تحسين هذه التقنية دراسة العديد من الجوانب مثل تحسين دقة قياس زمن وصول النبضة فوق الصوتية و ذلك باستخدام خوارزميات مختلفة في قياسها مثل طريقة التشابه الذاتي Auto-correlation [3] و طريقة النبضات المتناغمة sing-around [2]، و تصميم النبضة الصوتية باستخدام أكثر من تردد أو استخدام المسح الترددي frequency sweeping [3]، و تحسين قدرة المقياس على التخلص من الخطأ الذي يقدمه الضجيج و تصميم توضع الحساسات و مرسلات الإشارة الصوتية بالشكل الذي يؤدي إلى أفضل دقة ممكنة، و دراسة تأثيرات تطاول المسار path elongation الناتج عن حركة السائل، و تأثير التأخير الناتج عن معالجة البيانات إلكترونياً [5]. لقد قطع شوط جيد حتى الآن في تحسين هذه التقنية و لكن لا يزال هناك الكثير قيد الدراسة. كل ما ذكرناه حتى الآن عن تقنية قياس التدفق باستخدام الأمواج فوق الصوتية يتعلق بإحدى الطريقتين الرئيسيتين المتبعين، الأولى: و هي قياس زمن وصول النبضة فوق الصوتية transit time، أما الطريقة الرئيسة الأخرى و هي طريقة انزياح دوبلر الترددي Doppler frequency shift، فهي الأخرى تم التصدي للتحديات التي تواجهها من قبل العديد من الباحثين و أحرزت إنجازات كبيرة في هذا المجال، إلا أننا لن نتطرق لها إلا بشكل عابر في هذا المقال التي ستركز على الطريقة الأولى فقط.

أهمية البحث و أهدافه:

هذا البحث يركز على الأخطاء التي يسببها عدم انتظام تدفق السائل، إذ بسبب وجود أكثر من سرعة للسائل أو دوامات أو فقاعات حدوث أخطاء قياس، حتى لو تم قياس زمن وصول النبضة بدقة لا نهائية. لن نتطرق في هذه المقالة إلى الأخطاء في قياس أزمان وصول النبضة بل سنعتبره دقيقاً. فقط سنشير و لمرة واحدة إلى تأثير إحدى

حالات عدم انتظام تدفق السائل و هي حالة وجود فقاعات على قياس زمن وصول النبضة. هذه المقالة تحدد منابع الخطأ كخطوة رئيسة بهدف التعامل معها و التخلص منها لاحقا.

طرائق البحث و مواده:

نعمد في هذا البحث إلى دراسة عدة حالات من حالات عدم انتظام تدفق السائل، ونقارن النتائج التي تعطيها الإجرائية المتبعة في تحصيل معلومة القياس في تقنية القياس باستخدام الأمواج فوق الصوتية و نقارنها بالقيم الحقيقية، ثم نعمد إلى دراسة العلاقة بين خطأ القياس و بين بارامترات معينة تصف عدم انتظام التدفق، لنبين أن هذه الأوضاع غير المثالية تعطي خطأ يتخطى الحد المقبول في غالبية الحالات. تم الحصول على هذه العلاقة من خلال استخدام برامج تنابعة كتبت بواسطة Matlab الذي استخدم أيضا في الحصول على المنحنيات.

النتائج و المناقشة:

قياس التدفق باستخدام الأمواج فوق الصوتية:

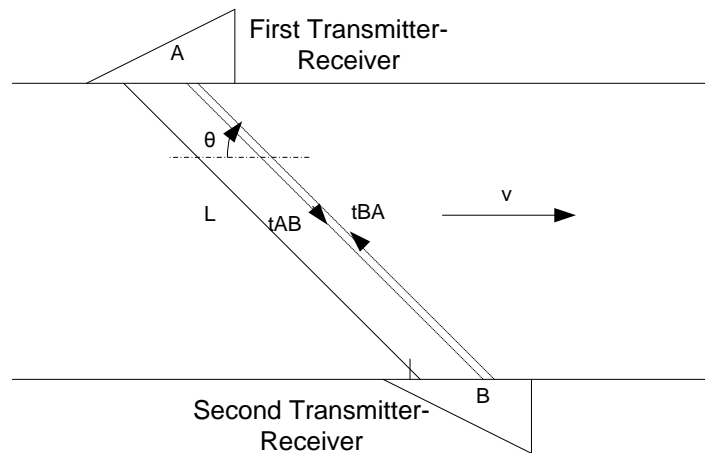
تعتمد تقنية قياس التدفق باستخدام الأمواج فوق الصوتية على قياس سرعة السائل و استنتاج التدفق من القانون الشهير [1,2] :

$$Q = V \cdot A \quad (1)$$

حيث V هي سرعة السائل على اعتبار أنها منتظمة على مساحة المقطع، و في خلاف ذلك فإن V يجب أن تعبر عن السرعة الوسطية المحسوبة على مساحة المقطع، عندئذ فإن عملية حساب المعدل Averaging يجب أن تكون مأخوذة بعين الاعتبار في إجرائية القياس، و أي خطأ في عملية حساب المعدل هذه سوف تنعكس سلبا على دقة القياس، كما سنرى بعد قليل في هذا البحث. يتم تقدير السرعة بإحدى طريقتين:

طريقة انزياح دوپلر [4] : هذه الطريقة تعتمد على قياس انزياح تردد الموجة الصوتية المنعكسة على الفقاعات و الذرات المعلقة في السائل و لن نخوض في هذه الطريقة في هذا البحث.

تقنية قياس زمن الوصول [2,5]: كما يوحي اسم هذه الطريقة فإن طريقة قياس زمن الوصول تعتمد على قياس الفرق بين زمن وصول نبضة موجية فوق صوتية مع اتجاه التدفق، و بعكس اتجاه التدفق و تعتبر أكثر وثوقية من منافستها و يبين الشكل (1) هذه الطريقة:



الشكل (1) قياس سرعة جريان السائل بقياس زمن وصول النبضة فوق الصوتية مع اتجاه التدفق و بعكسه

الزمن المستغرق لوصول النبضة من المجس A إلى المجس B هو $t_{AB} = L/(C+V\cos\theta)$ بينما الزمن المستغرق لوصول النبضة بالاتجاه المعاكس هو $t_{BA} = L/(C-V\cos\theta)$. حيث C هي سرعة الصوت في الوسط و V هي سرعة السائل المتدفق.

$$\Delta t = t_{AB} - t_{BA} = \frac{2LV\cos\theta}{C^2 - V^2\cos^2\theta}$$

الفرق بين الزمنين هو ما يلي:

$$\Delta t = t_{AB} - t_{BA} = \frac{2LV\cos\theta}{C^2 - V^2\cos^2\theta}$$

بما أن $V \ll C$ يمكن إهمال الحد $V^2\cos^2\theta$

$$(2)\Delta t = t_{AB} - t_{BA} = \frac{2LV\cos\theta}{C^2}$$

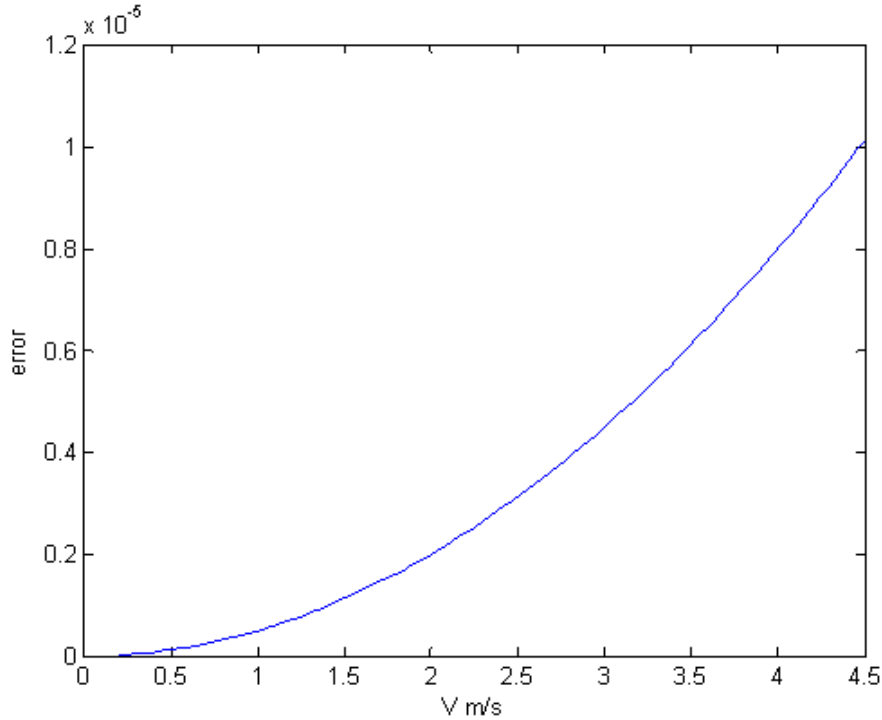
من غير المقبول أن نترك العلاقة الرياضية مرتبطة بسرعة الصوت لأنها (أي سرعة الصوت) متغيرة بتغير وسط الانتشار و شروطه الفيزيائية. لذلك نلجأ لحساب المتوسط الحسابي للزمنين t_{AB} و t_{BA} :

$$t_{av} = \frac{t_{AB} + t_{BA}}{2} = \frac{L}{C} \Rightarrow C = \frac{L}{t_{av}}$$

بالتعويض في المعادلة (1) وإعادة الترتيب نحصل على:

$$V = \frac{L \cdot \Delta t}{2t_{av}^2 \cos\theta} \quad (3)$$

الحالة الأولى: الحالة المثالية:



الشكل (2) الخطأ في حالة جريان مثالي و هو ناتج فقط عن إهمال الحد $V^2\cos^2$

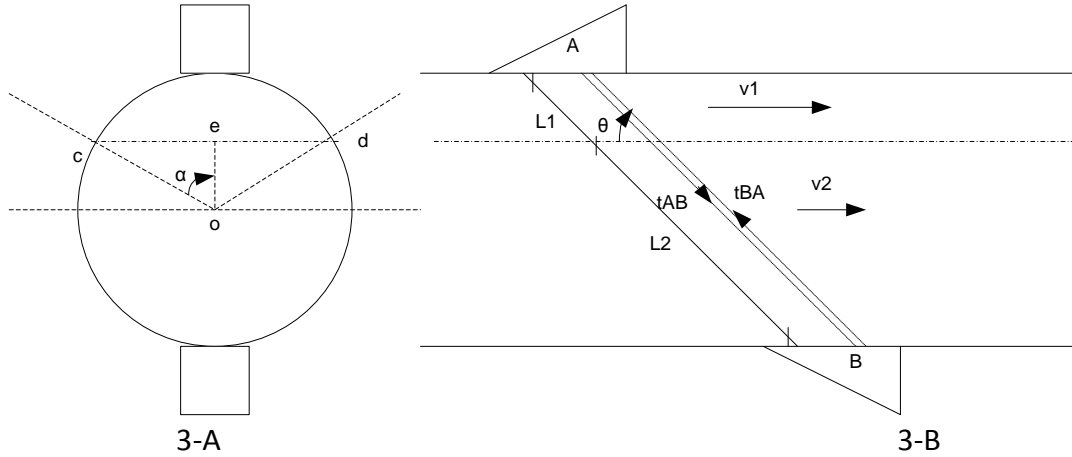
بما أن الغاية من المقالة هي دراسة الخطأ الناتج عن نموذج جريان السائل Flow profile، بغض النظر عن الأخطاء التي يسببها الضجيج أو خوارزمية قياس زمن وصول النبضة، ففي الحالة المثالية هنا أي السائل الذي يسير بسرعة منتظمة على كامل مساحة مقطع الأنبوب لا يبقى أي خطأ سوى الخطأ الناتج عن إهمال الحد $V^2\cos^2$ في اشتقاق القانون (3). بهدف الإحساس بقيمة هذا الخطأ حسبنا قيمة هذا الخطأ من أجل مجال من القيم لـ V يمتد من

0.2 م/ثا إلى 4.5 م/ثا، وهي تكافئ مجالا واسعا في التدفق يتراوح ما بين أقل من 1000 برمبيل في اليوم إلى حوالي 20000 برمبيل في اليوم و حصلنا على المخطط البياني التالي في الشكل (2).

نلاحظ بوضوح أن الخطأ صغير جدا في هذه الحالة المثالية. و يمكن إهماله في جميع الحسابات. في هذه الحالة الأخطاء الناتجة في تقنية قياس التدفق باستخدام الأمواج فوق الصوتية ناتجة عن أخطاء خوارزميات قياس زمن وصول النبضة، وهي كما ذكرنا لا تقع ضمن دراستنا في هذه المقالة، إلا ما يتعلق منها بتأثير تشوه شكل النبضة بسبب الشوائب و الفقاعات.

الحالة الثانية: تدفق صفائحي بسرعتين:

من هذه الحالة المبسطة سننتقل إلى كل الحالات الأخرى .



الشكل (3) نموذج التدفق مبينا عليه مسار النبضة فوق الصوتية: حالة تدفق صفائحي بسرعتين

لندرس الشكل (3) الذي يبين مقطعا أماميا و جانبيا لأنبوب يجري فيه سائل جريانا صفائحي . هنا ندرس الحالة التي يكون لدينا فيها سرعتان للسائل نفترض أن كلا منهما منتظمة على جزء من مقطع الأنبوب (جريان صفائحي).

المثال العددي التالي يهدف إلى إعطاء الإحساس بواقعية الأرقام .

و يجب التنويه بأن الغاية من هذا النموذج هو الانطلاق منه إلى النماذج الأكثر مطابقة للواقع.

المثال المدروس هو سائل يجري بشكل صفائحي، إذ إنه في الربع الأعلى $(L_1+L_2=4*L_1)$ يجري السائل بسرعة

V_1 ، بينما يسير بسرعة تساوي V_2 في ما تبقى من مقطع الأنبوب .

قيمة V_2 تساوي 1 م/ثا و قيمة V_1 تساوي 3 م/ثا، وهي قيم تكافئ تدفقا حوالي 6000 برمبيل يوميا من أجل

أنبوب بقطر 4 إنش.

القطر الداخلي للأنبوب يساوي 0.1 متر و الحساسات متوضعة بحيث تكون الزاوية θ تساوي 45 درجة

(وهي قيمة نموذجية)، و سنحسب التدفق الحقيقي الذي يعبر الأنبوب في هذه الحالة، و سنقارنه بالتدفق الذي ستحسبه

الإجرائية التي يستثمرها جهاز قياس التدفق باستخدام الأمواج فوق الصوتية التي يستثمر طريقة زمن وصول النبضة.

بالعودة إلى الشكل (3) السابق نجد :

نحتاج لحساب الجزء من مساحة الدائرة فوق الوتر [cd] وهو يساوي مساحة القطاع الدائري المحدد

بالمستقيمين [oc] و [od] ناقص مساحة المثلث [ocd] :

نستطيع بسهولة أن نلاحظ أنه و في حالة القيم المختارة لكل من L_2 و L_1 فإن قيمة α تساوي $\frac{\pi}{3}$ و بالتالي، فإن

مساحة القطاع الدائري تساوي:

$$2 \frac{\alpha}{2} r^2 = 2 * \frac{\pi}{6} * (0.05)^2 = 0.00262 \text{ m}^2$$

حيث r هو نصف قطر الأنبوب .

$$. \text{مساحة المثلث [ocd]} \text{ تساوي } 0.5r * r * \sin \alpha = 0.5 * 0.05 * 0.05 * \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.00108 \text{ m}^2$$

و بناء عليه تكون مساحة الجزء من مقطع الأنبوب الذي يجري السائل فيه بسرعة v_1 هي:

$$0.00262 - 0.00108 = 0.00154 \text{ m}^2.$$

ومساحة الجزء الذي يجري فيه السائل بسرعة v_2 تساوي مساحة الدائرة ناقصا مساحة الجزء من مقطع الأنبوب

الذي يجري السائل فيه بسرعة v_1 أي أنها تساوي:

$$\pi r^2 - 0.00416 = \pi(0.05)^2 - 0.00154 = 0.00785 - 0.00154 = 0.00631 \text{ m}^2$$

وبالتالي، وبالإستفادة من قانون التدفق الشهير لحساب التدفق في حال التدفق المنتظم $Q = v.A$ حيث Q

هي التدفق و v هي سرعة السائل المنتظمة على مساحة المقطع، و A هي مساحة المقطع نجد أنه و في حال وجود

سرعتين كل منهما منتظمة على جزء من مساحة المقطع أن التدفق يساوي $Q = v_1 A_1 + v_2 A_2$.

و بالتعويض نجد أن:

$$. Q = 3 * 0.00154 + 1 * 0.00631 = 0.01093 \text{ m}^3/\text{s}$$

أما القيمة التي يقرأها الجهاز فتحسب كما يلي:

الزمن الذي تستغرقه النبضة الصوتية لتعبر المسافة L_1 متجهة من A إلى B هو

$$. t_{AB1} = L_1 / (C + V_1 \cos \theta)$$

بحساب قيمة L نجد :

$$L = \frac{\text{pipe inside diameter}}{\cos \theta} = \frac{0.1}{\cos 45^\circ} = 0.14142 \text{ m} \Rightarrow L_1 = 0.14142 * \frac{1}{4} \\ = 0.03536 \text{ m} \quad \text{and} \quad L_2 = 0.14142 * \frac{3}{4} = 0.10607 \text{ m}$$

إذا أخذنا قيمة نموذجية لسرعة الصوت في سائل خواصه الصوتية قريبة من الماء نأخذ قيمة سرعة الصوت

$$. C = 1000 \text{ m/s}$$

بالتعويض نجد

$$t_{AB1} = \frac{L_1}{C + V_1 \cos \theta} = \frac{0.03536}{1000 + 3 * \cos 45} = 35.2851 \mu\text{sec}$$

بنفس الأسلوب نستطيع إيجاد قيم كل من t_{BA2} و t_{BA1} و t_{AB2}

$$t_{AB2} = \frac{L_2}{C + V_2 \cos \theta} = \frac{0.10607}{1000 + 1 * \cos 45} = 105.9951 \mu\text{sec}$$

$$t_{BA1} = \frac{L_1}{C - V_1 \cos \theta} = \frac{0.03536}{1000 - 3 * \cos 45} = 35.4352 \mu\text{sec}$$

$$t_{BA2} = \frac{L_2}{C - V_2 \cos \theta} = \frac{0.10607}{1000 - 1 * \cos 45} = 106.1451 \mu\text{sec}$$

و منه نستنتج قيم كل من t_{BA} و t_{AB} :

$$t_{AB} = t_{AB1} + t_{AB2} = 141.2802 \mu\text{sec}$$

$$t_{BA} = t_{BA1} + t_{BA2} = 141.5803 \mu\text{sec}$$

و منه نستنتج قيم كل من t_{av} و Δt :

$$\Delta t = t_{BA} - t_{AB} = 0.3001 \mu\text{sec}$$

$$t_{av} = \frac{t_{BA} + t_{AB}}{2} = 141.43025 \mu\text{sec}$$

و بالتالي و بالتعويض في العلاقة (2).

$$v = \frac{L \cdot \Delta t}{2t_{av}^2 \cos \theta} = \frac{0.14142 * 0.3001 * 10^{-6}}{2 * (141.43025 * 10^{-6})^2 * \sqrt{2}/2} = 1.5003 \text{ m/s}$$

و بالتالي يكون التدفق المحسوب بواسطة الجهاز هو:

$$Q = v \cdot A = 1.5003 * \pi * (0.05)^2 = 0.01178 \text{ m}^3/\text{s}$$

و بالتالي نحسب الخطأ بين قراءة الجهاز و التدفق الحقيقي لنجدها:

$$\text{error}\% = \frac{0.01178 - 0.01093}{(0.01178 + 0.01093)/2} * 100 = 7.49\%$$

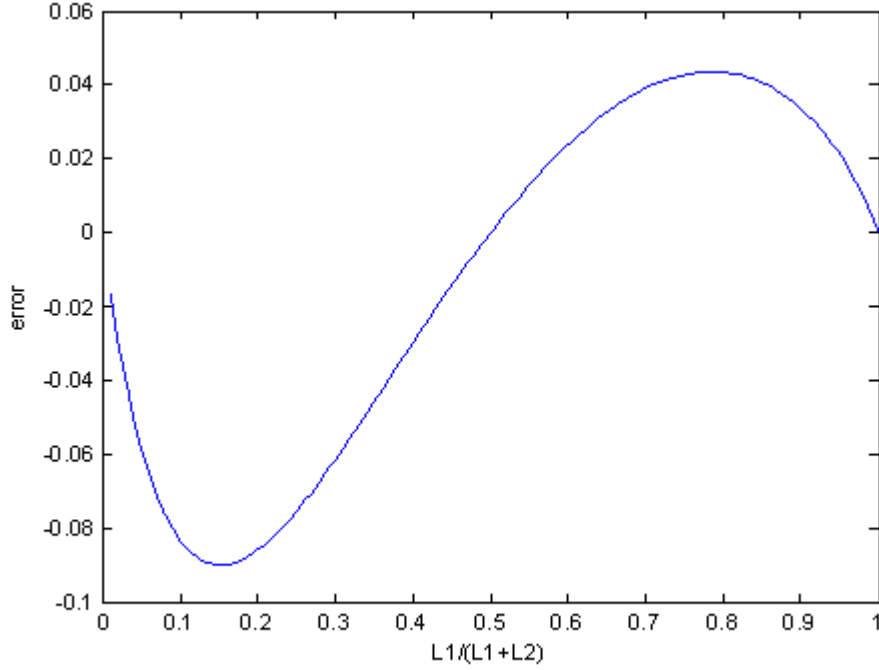
الدقة المستهدفة تكافئ خطأ لا يزيد عن 1 % ومن الواضح أن هذا غير محقق في حالة مثال الجريان الذي أخذناه.

تعميم الحالة السابقة:

لنحاول إلقاء نظرة على تأثير عدم انتظام سرعة السائل، و تأثير توزع كل من السرعتين على مقطع الأنبوب على خطأ القياس (سنبقى مبدئياً في إطار السرعتين). بالعودة إلى الشكل (3)، نعرف النسبة $\frac{L_1}{L_1+L_2}$ و نلاحظ تأثير هذه النسبة على خطأ القياس.

تمت نمذجة جميع القوانين الرياضية التي تصف الواقع الفيزيائي أعلاه باستخدام تعليمات Matlab. يشكل Matlab بيئة ممتازة لبناء منحنيات بيانية تعطي فكرة واضحة عن تصرف الجملة الفيزيائية.

بإعطاء مائة قيمة للنسبة $\frac{L_1}{L_1+L_2}$ ما بين الصفر و الواحد سنترك Matlab أن يحسب قيمة الخطأ المقابل، وسيبين المنحني تأثير توزع السرعة في طول مسار الأمواج فوق الصوتية ضمن الأنبوب.



الشكل (4) علاقة خطأ القياس بالنسبة $\frac{L_1}{L_1+L_2}$

تم اعتماد القيم نفسها، لسرعات السائل، و القيمة نفسها لسرعة الصوت، والقيمة نفسها للأبعاد الهندسية للأنبوب و توضع الحسابات.

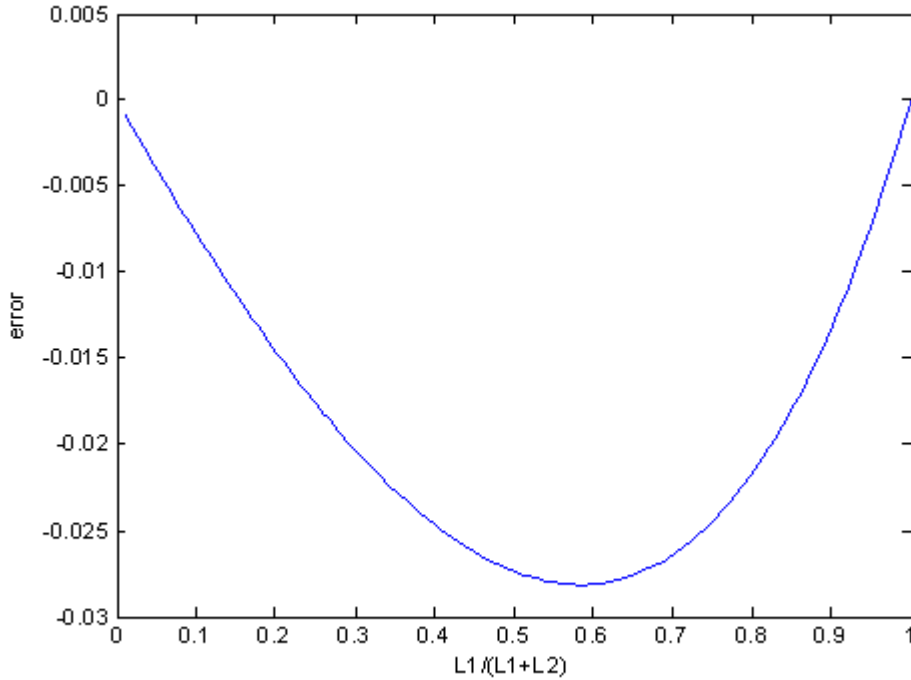
إن نظرة إلى هذا المنحني و المعادلات التي قادتنا إليه ترينا كيف أن فشل مبدأ حساب المعدل Averaging المتبع هو الذي قاد إلى هذا الخطأ. بالعودة إلى الشكل 3-A و المعادلة (3) نجد أن الخطأ يكمن في كون المعادلة (3) تحسب سرعة وسطية في حالة السرعات المختلفة، وهذه السرعة الوسطية تحسب بحيث إن سرعة من السرعتين الجزئيتين V_1 و V_2 تساهم في حسابها بحسب نسبة الطول المقابل لها (أي للسرعة الجزئية) L_1 أو L_2 من الطول الكلي L_1+L_2 . و لكن الصحيح هو أن السرعة الوسطية يجب أن تحسب بحيث إن كلاً من السرعتين الجزئيتين V_1 و V_2 تساهم في حسابها بحسب نسبة المساحة المقابلة لها (أي للسرعة الجزئية) من المساحة الكلية لمقطع الأنبوب، لأن هذا ما تتطلبه حقيقة أن التدفق يحسب وفق المعادلة (1) التي تتضمن المساحة وليس القطر. هذا الأمر يمكن ملاحظته أيضاً من خلال المنحني في الشكل (4) حيث نجد أن الخطأ يبدأ من الصفر عندما تكون النسبة $\frac{L_1}{L_1+L_2}$ مساوية للصفر، وهذا بديهي ثم يزداد الخطأ (بالقيمة المطلقة) بسبب الخطأ في عملية حساب المعدل فعلى سبيل المثال عندما تكون النسبة $\frac{L_1}{L_1+L_2}$ مساوية 0.75 فإن قانون إجرائية حساب التدفق بواسطة الأمواج فوق الصوتية

يعطي تقريبا لكل من L_1 و L_2 بنسبة 3:1، بينما ليس صحيحاً أن جزأي الدائرة المفصولين بالقطعة المستقيمة [cd] يساوي الأعلى منهما ثلث مساحة الأسفل بل أقل من ذلك كما هو واضح. ثم و بالاقتراب من نسبة 0.5 للمقدار $\frac{L_1}{L_1+L_2}$ يتناقص الخطأ مرة أخرى نتيجة لأن مساحتي جزأي الدائرة تقتربان من أن تساوي إحداهما الأخرى. لنجد أن الخطأ عند القيمة 0.5 يعود للصفر، (في الواقع يبقى خطأ صغير جداً ناتجاً عن التقريبات المتبعة في استنتاجات المعادلة (3))،

ومن ثم تعاد الكرة مرة أخرى و لكن شكل المنحني يصبح أكثر تسطحا و القيمة العظمى أقل، و ذلك لأن هذا الجزء من المنحني يتعلق بالسرعة الأصغر، و بالتالي يكون تأثير الخطأ في حساب معدل السرعة أقل.

تأثير اختلاف سرعة الصوت:

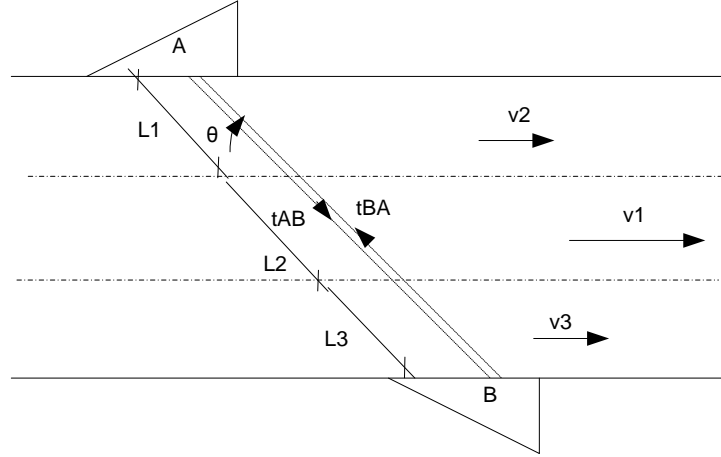
اختلاف سرعة الصوت في السائل ينتج عن وجود أكثر من سائل متدفق، بحيث تكون هذه السوائل غير قابلة للانحلال بعضها ببعض. مثلا السائل الذي يخرج من الآبار النفطية هو مزيج من الماء و النفط. في ما يلي سنتفحص حالة من سائلين، سرعة الصوت في أحدهما 1000 متر في الثانية و سرعة الصوت في الآخر هي 1400 متر في الثانية، و يحتل كل منهما جزءا من مقطع الأنبوب، و سنعتبر أنهما يسيران بنفس السرعة و قيمتها متر واحد في الثانية، و سنجد في ما يلي أن إجرائية حساب التدفق المدروسة تبرز خطأ غير مقبول أيضا و إن كان أقل من حالة الجريان الصفائحي السابق. باعتماد نفس القيم التي استخدمت في المنحني السابق فيما يتعلق بقطر الأنبوب و زاوية ميلان شعاع الموجة فوق الصوتية، وبتبديل قيمة النسبة $\frac{L_1}{L_1+L_2}$ بنفس الأسلوب السابق مع الانتباه أن L_1 هنا توافق الجزء من المقطع الأنبوب الذي يسير فيه السائل الذي سرعة الصوت فيه هي 1400 متر في الثانية. و L_2 توافق مقطع الأنبوب الذي يجري فيه السائل بسرعة 1000 متر في الثانية. الواقع أن القيمتين المعتمدتين للسرعة قريبتان من القيمتين الواقعتين لسرعة انتشار الصوت في الماء و النفط. حصلنا من Matlab على المنحني في الشكل (5)، حيث نلاحظ بوضوح أن معظم المنحني يوافق قيمة مطلقة للخطأ أكبر من 1%.



الشكل (5) حالة سائلين سرعة الصوت في أحدهما مختلفة عن الآخر، تسير النبضة الصوتية في أحدهما المسافة L_1 و في الآخر المسافة L_2

حالة عدة طبقات من الجريان:

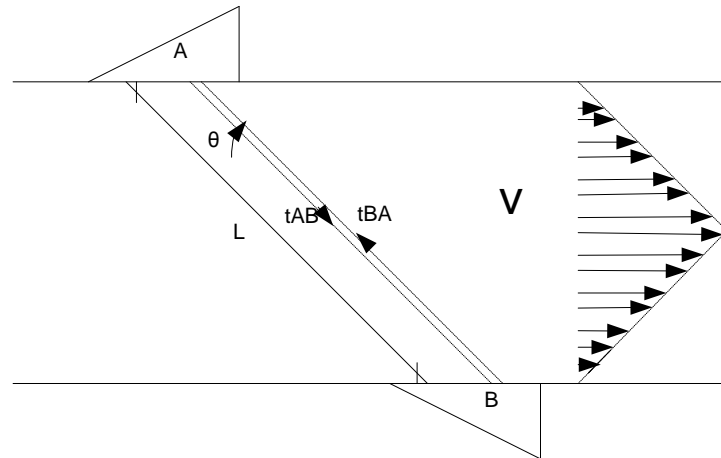
الحالة فيما يلي هي حالة ثلاث طبقات ذات ثلاث سرعات، هي على التوالي 1 و 3 و 1 متر و هي مبينة في الشكل(6).



الشكل (6) ثلاث طبقات للجريان بثلاث سرعات السرعة في الوسط أكبر منها على الجانبين

هذه الحالة أكثر شيوعاً و هي تقريب مقبول لحالة الجريان في معظم الأنابيب، حيث تكون السرعة في المركز أكبر منها قرب الجدران. بالاعتماد على المعادلات التي تصف الجملة المدروسة و باستخدام Matlab، قمنا بكتابة برنامج يقوم بحساب التدفق الحقيقي و التدفق المقيس بواسطة المقياس، و ذلك لعدد غير محدود من الطبقات. ومن الواضح أن الحالة هنا تمثل حالة خاصة، إذ عدد الطبقات يساوي ثلاثة. اعتمدنا نفس القيم لقطر الأنبوب و زاوية ميلان شعاع الموجة فوق الصوتية، واعتبرنا سرعة الصوت منتظمة و تساوي 1000 متر في الثانية و أن $L_1 = L_2 = L_3$.

حصلنا من برنامج Matlab على قيمة التدفق الحقيقي و تساوي: 0.0143950 متراً في الثانية، و حصلنا كذلك على قراءة الجهاز و تساوي 0.0130900 ، و بالتالي حصلنا على قيمة الخطأ و تساوي 9.5%. مع هذه القيمة لم نعد نكتفي بوصف القياس بأنه غير دقيق لكن بأنه مرفوض كلياً. فإن خطأ يقارب العشرة بالمائة يحول القياس إلى عملية "إعطاء فكرة" بدلاً من عملية قياس. حالة سائل تتغير سرعته بانتظام على طول المقطع:



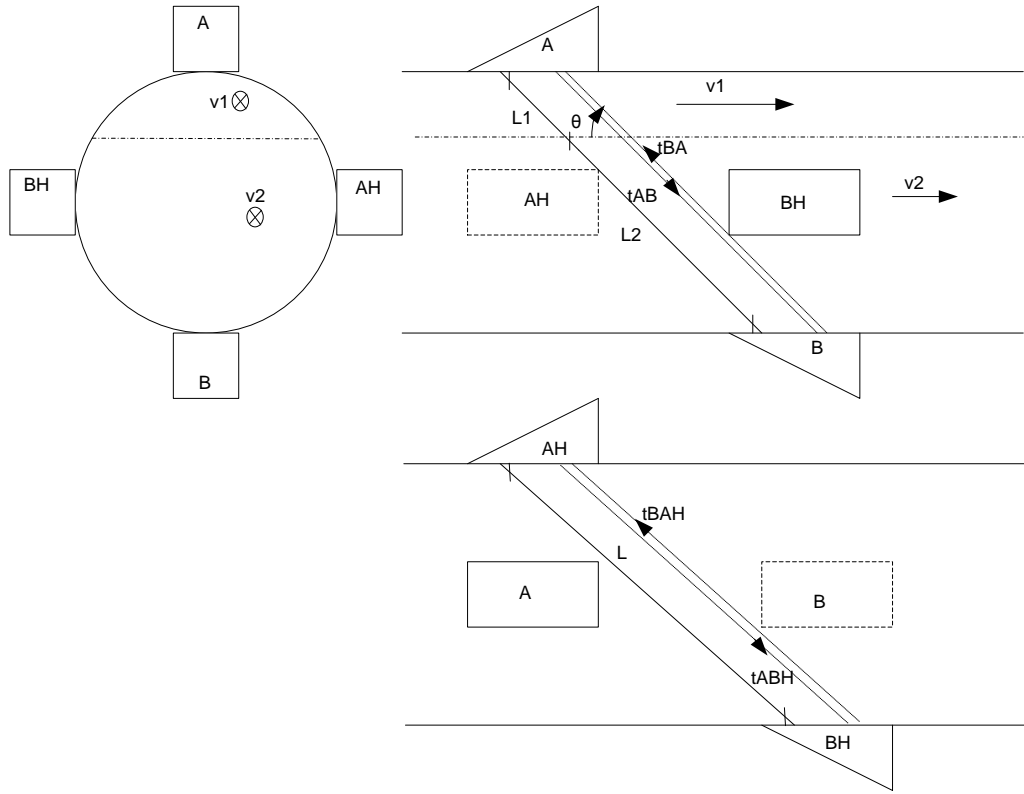
الشكل (7) سائل تتغير سرعته بانتظام على طول المقطع

الحالة هذه أقرب دقة في تقريب التدفق في الأنابيب، حيث تكون السرعة صغيرة قرب الجدران بسبب التصاق السائل بالجدران و تتزايد تدريجيا باتجاه المركز. نموذج تزايد السرعة ليس خطيا بالضرورة و لكن هذا الشكل الخطي هو تقريب جيد. فيما يلي سنأخذ حالة سائل تتزايد سرعته كما هو موضح في الشكل (7) من 0.5 متر في الثانية إلى 3 أمتار في الثانية. بما أن برنامج Matlab مصمم بالأصل لحساب التدفق الحقيقي، والتدفق المقيس من المقياس الفوق صوتي في حالة تدفق صفائحي متعدد الطبقات، فقد قمنا بإعطاء برنامج Matlab مائة قيمة للسرعة تتدرج بانتظام من 0.5 إلى 3 أمتار في الخمسين قيمة الأولى، و تتناقص مرة أخرى إلى 0.5 متر في الثانية في الخمسين قيمة الثانية.

حصلنا برمجيا باستخدام Matlab على قيمة التدفق الحقيقي و تساوي : 0.015258 مترا مكعبا في الثانية و حصلنا على قيمة التدفق المقيس بواسطة المقياس و تساوي 0.013744 مترا مكعبا في الثانية و بالتالي الخطأ هو 10.44 % . و مرة أخرى هذا الخطأ يخرج عن نطاق التعريف المقبول للخطأ و يدخل في منطقة نسف القياس كليا.

اقتراحات لتجاوز الأخطاء الناتجة عن نموذج التدفق:

إن التجاوز الكامل لهذه الأخطاء يتطلب و لا شك الحصول على صورة كاملة للتدفق، و هذا يجب أن يتم باستخدام عدة مستقبلات و عدة مرسلات و استخدام خوارزمية مناسبة لتحصيل المعلومة من قراءات هذه الحساسات جميعها، و هذا سيكون موضوع بحث قادم لكاتبتي هذه المقالة. في هذه المقالة سنكتفي بتقديم طريقة لإلغاء الخطأ الناتج عن وجود سرعتين للسائل. الخوارزمية في هذه الحالة تقوم على الاستنتاج الرياضي المباشر للتدفق من خلال قراءة زوجين مرسل-مستقبل، أحدهما أفقي و الآخر شاقولي. بالعودة إلى الحالة الثانية للتدفق الصفائحي بسرعتين و النظر إلى الشكل (8) الذي يمثل الشكل (3) نفسه، و لكن أضفنا هنا حساسين أفقيين و أضفنا مسقطا أفقيا للشكل للتوضيح نجد إن قيمة الزمن t_{AB} تساوي مجموع قيمة الزمنين t_{AB1} و t_{AB2} ، و كل منهما يساوي كما بينا سابقا في دراسة الحالة الثانية (التدفق الصفائحي بسرعتين) $t_{BA1} = \frac{L_1}{C+V_1 \cos\theta}$ و $t_{BA2} = \frac{L_2}{C+V_2 \cos\theta}$ ، كما أن قيمة الزمن t_{BA} تساوي مجموع قيمة الزمنين t_{BA1} و t_{BA2} ، و كل منهما يساوي $t_{BA1} = \frac{L_1}{C-V_1 \cos\theta}$ و $t_{BA2} = \frac{L_2}{C-V_2 \cos\theta}$.



الشكل (8) إضافة حساسين أفقيين AH و BH .

$$\frac{L_1}{C + V_1 \cos \theta} + \frac{L_2}{C + V_2 \cos \theta} = t_{AB}$$

$$\frac{L_1}{C + V_1 \cos \theta} + \frac{L - L_1}{C + V_2 \cos \theta} = t_{AB}$$

$$\frac{L_1}{C + V_1 \cos \theta} - \frac{L_1}{C + V_2 \cos \theta} = t_{AB} - \frac{L}{C + V_1 \cos \theta}$$

المقدار $\frac{L}{C + V_1 \cos \theta}$ نحصل عليه من الحساسين الأفقيين و هو يساوي t_{ABH} .

$$\frac{L_1 * (C + V_2 \cos \theta) - L_1 * (C + V_1 \cos \theta)}{C^2 + C(V_2 \cos \theta + V_1 \cos \theta) + V_1 * V_2 * \cos^2 \theta} = t_{AB} - t_{ABH}$$

بإهمال الحد $V_1 * V_2 * \cos^2 \theta$ لصغره و ترتيب العلاقة نحصل على:

$$L_1 \left[\frac{V_2 \cos \theta - V_1 \cos \theta}{C^2 + C(V_2 \cos \theta + V_1 \cos \theta)} \right] = t_{AB} - t_{ABH} \quad (4)$$

لدينا أيضا:

$$\frac{L_1}{C - V_1 \cos \theta} + \frac{L_2}{C - V_2 \cos \theta} = t_{BA}$$

وبالأسلوب السابق بنفسه في الاستنتاج الرياضي نحصل على:

$$L_1 \left[\frac{V_2 \cos \theta - V_1 \cos \theta}{C^2 - C(V_2 \cos \theta + V_1 \cos \theta)} \right] = t_{BAH} - t_{BA} \quad (5)$$

بتقسيم المعادلة (4) على المعادلة (5) نحصل على:

$$\frac{C^2 - C(V_2 \cos\theta + V_1 \cos\theta)}{C^2 + C(V_2 \cos\theta + V_1 \cos\theta)} = \frac{t_{AB} - t_{ABH}}{t_{BAH} - t_{BA}}$$

نعرف النسبة : $A = \frac{t_{AB} - t_{ABH}}{t_{BAH} - t_{BA}}$ و نعيد ترتيب المعادلة بهدف الحصول على قيمة V_1 فنحصل على

المعادلة التالية:

$$v_1 = \frac{(1-A)C - (A+1)v_2 \cos\theta}{(A+1)\cos\theta} \quad (6)$$

هذه المعادلة التي تعطي قيمة v_1 بدلالة كل من v_2 و C ، اللتين سنحصل على قيمتهما من خلال المرسل و المستقبل الاقبيين الذين تمر النبضة فوق الصوتية بينهما ضمن سرعة واحدة متجانسة، إذ لدينا و حسب المعادلة (3) و المعادلات التي قادت إلى استنتاجها.

$$C = \frac{L}{t_{avH}} \quad \text{و} \quad V_2 = \frac{L \cdot \Delta t_H}{2t_{avH}^2 \cos\theta}$$

$$\cdot t_{avH} = \frac{t_{ABH} + t_{BAH}}{2} \quad \text{و} \quad \Delta t_H = t_{ABH} - t_{BAH} \quad \text{حيث}$$

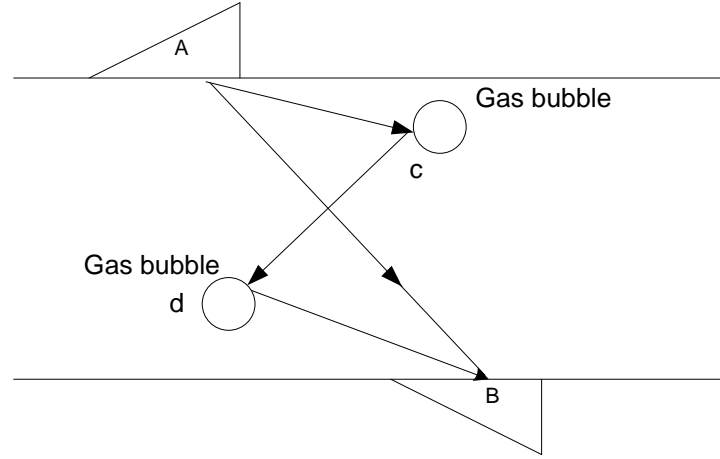
قمنا بكتابة المعادلات الآتية الذكر على برنامج *Matlab*، و ذلك بهدف الحصول على قيمة الأزمنة t_{AB} و t_{BA} و t_{ABH} و t_{BAH} و من ثم إعادة استنتاج التدفق من هذه القيم باستخدام الخوارزمية المبينة آنفا. قمنا بتطبيق هذه الخوارزمية على المثال العددي المبين في الحالة الثانية و الذي أعطى سابقاً خطأ قيمته 7.49%، و تم حذف الخطأ كلياً، إذ لم تبق سوى قيمة مهملة 4.55×10^{-10} يمكن اعتبارها مساوية للصفر.

في الاستنتاج السابق افترضنا أن النبضة فوق الصوتية تمر ضمن السرعة v_2 و نحن لا نعرف ذلك حقاً، ولكن بسبب التناظر التام في ورود v_1 و v_2 في معادلات t_{AB} و t_{BA} و علاقة حساب التدفق من السرعتين، فإن قيمة التدفق لا تتغير فيما لو كانت النبضة الصوتية تمر عبر v_1 .

الصورة ليست بهذه السهولة عندما يتعقد نموذج التدفق *Flow profile* أكثر من ذلك و هي تحتاج إلى عدد أكبر من الحساسات التي تدخل النبضة فوق الصوتية إلى نموذج التدفق بعدة زوايا مختلفة، و كما ذكرنا سابقاً فإن هذا سيكون موضوع بحث لاحق لكاتبتي هذه المقالة.

حالة وجود فقاعات غازية:

لنلاحظ الشكل (9) (الأبعاد مبالغ فيها بهدف التوضيح): إن وجود الفقاعات الغازية في السوائل المتدفقة هو شيء شائع في التطبيقات العملية و تزداد نسبة هذه الفقاعات كلما كان التدفق مضطرباً لأن التدفق المضطرب يميل إلى تحرير الغازات المنحلة في السوائل.



الشكل (9) تأثير وجود الفقاعات الغازية على دقة التدفق

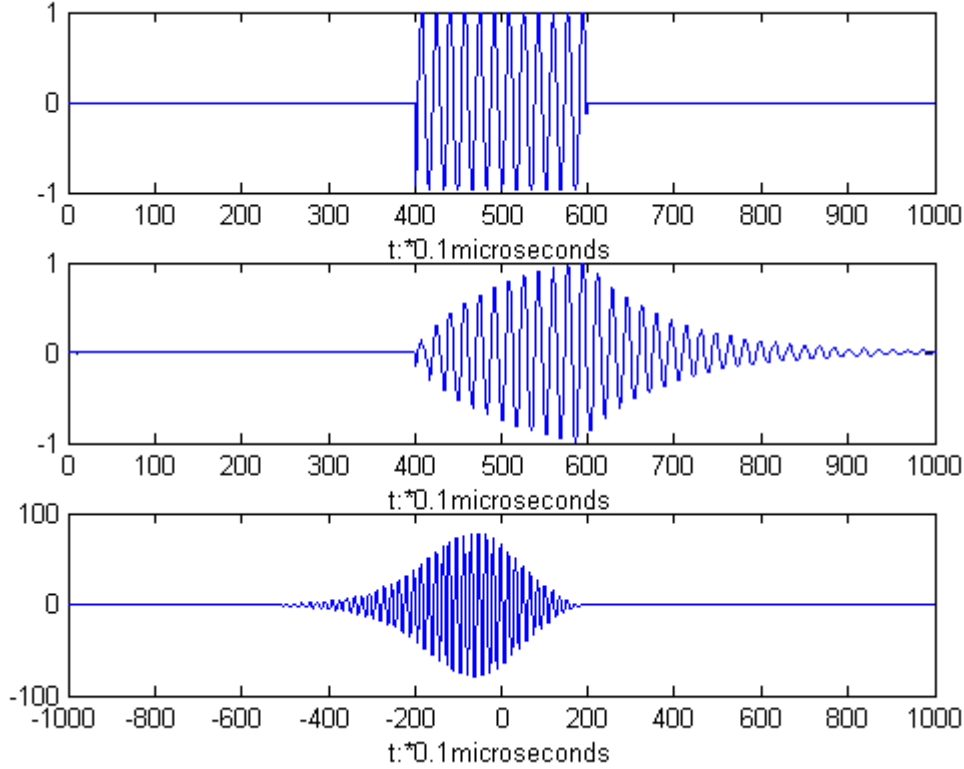
إن غالبية الدراسات التي تناولت موضوع الفقاعات الغازية ركزت على موضوع التخمين الذي تسببه، والجزئيات الصلبة المعلقة في السائل [2, 4, 5, 6].

عادة تعتبر طريقة قياس التدفق بواسطة قياس زمن وصول النبضة فاشلة إذا زادت نسبة الفقاعات الغازية عن 20% [4]. ما يهنا أن ننوه به هنا هو أنه حتى و في حالة كون نسبة الفقاعات الغازية أقل من النسبة المذكورة، فإن وجود الفقاعات الغازية يؤدي إلى انعكاس النبضة فوق الصوتية عنها، إذ إن سطح التماس ما بين السائل و الغاز يعكس الموجة الصوتية بكاملها تقريبا (معامل الانعكاس هو حوالي 100% [4])، و بالتالي هذا يؤدي إلى خلق عدة مسارات إضافية، و بالتالي وصول عدة أصداء للنبضة الصوتية، هذه الأصداء ستتراكب في المستقبل، و تجعل تمييز لحظة وصول النبضة صعبا بسبب تشويبه شكل النبضة [3].

و يجب التنويه هنا أيضا بأن وجود دقائق صلبة معلقة في المائع له تأثير مشابه للتأثير السابق، إذ إن معامل الانعكاس على السطح الفاصل ما بين المائع و الصلب يقارب الـ 90% [4].

لقد اعتمد البحث [3] طرائق لقياس زمن وصول النبضة تقوم على قياس التشابه المتبادل cross correlation بين النبضة المرسله والمستقبله، حيث تكون القيمة العظمى لتابع التشابه المتبادل عند لحظة t تمثل قيمتها الفرق الزمني بين النبضة المرسله والمستقبله. في الحقيقة نحن لا نعرف تماما أين تقع النبضة المستقبله، و لكننا نأخذ إطارا زمنيا يقع على بعد وسطي و عرضه كاف لتأكد من وجود النبضة ضمنه. هذا الإطار الزمني هو الذي يطبق عليه تابع التشابه الذاتي. لا بد أن نذكر أن النبضة لا يمكن أن تتزاح كثيرا. في الواقع إن الفرق بين أسرع النبضات وصولا وأبطأهن وصولا (بحسب سرعة السائل المتدفق) هو فرق صغير جدا بسبب الفرق الكبير بين سرعة السائل المتدفق وسرعة الصوت. طريقة التشابه الذاتي هذه أفضل من طريقة تحسس ارتفاع المطال لأنها أكثر مناعة ضد الضجيج، ولكن لا ريب أنها هنا ستعاني مشكلة حقيقية من تشويه شكل النبضة و هذا ما تؤكده النتائج التي حصلنا عليها الموضحة في الشكل (10)، الذي يبين تابع التشابه المتبادل للنبضة المشوهة و النبضة المرسله على افتراض أن الإزاحة الزمنية بينهما صفرا إذ نلاحظ بوضوح انزياح القيمة الأعظمية عن الصفر، و هذا يعني انزياحا بنفس القيمة للقيمة الأعظمية لتابع التشابه المتبادل للنبضة المشوهة و النبضة المرسله عن القيمة t التي تمثل الفرق. فيما يلي نورد الشكل (10) الذي يوضح تشويه النبضة بسبب ورود عدة أصداء، و قد حصلنا عليه بنموذج Matlab و ذلك بتكرار الإشارة مع تأخيرها زمنيا و تخميدها وفق تابع أسّي. لا بد أن نؤكد هنا أن هذا ليس هو الشكل الوحيد المتوقع للإشارة

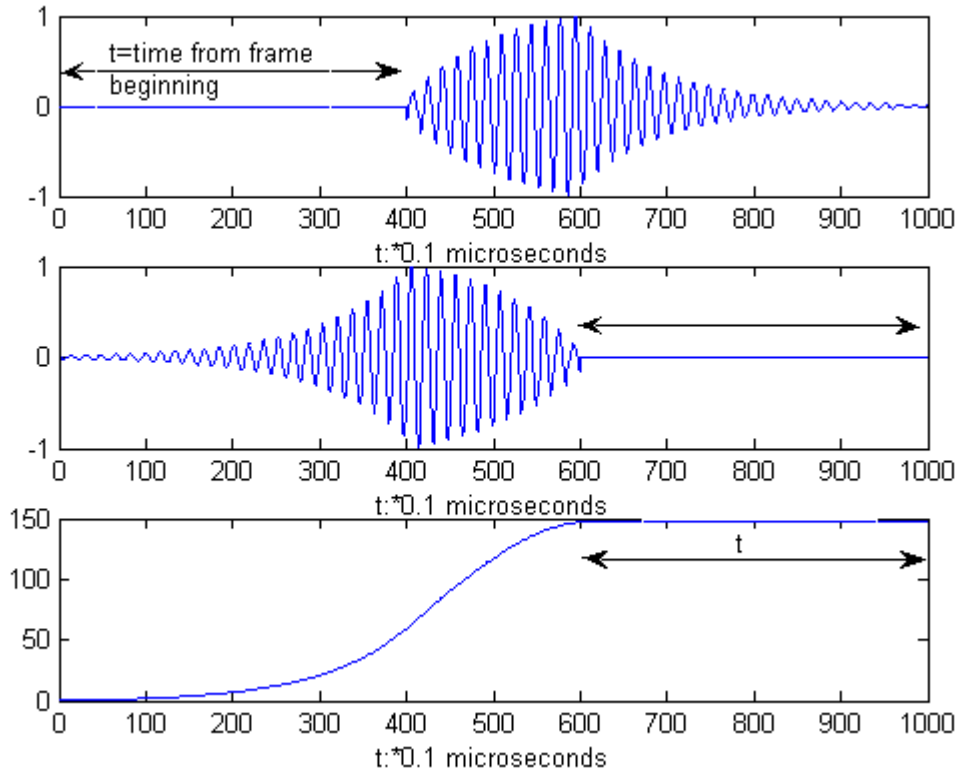
المشوهة، و لكنه فقط حالة محددة حصلنا عليها من نموذج Matlab، ولكن أشكال تشوه الإشارة متعددة و لا يمكن التنبؤ بشكل الإشارة المشوهة قبل استقبالها. الإشارة المستخدمة هي نبضة من إشارة جيبية ترددها 588KHz و تستمر لمدة 20 μ s و الإطار الزمني هنا يمتد على مسافة 100 μ s.



الشكل (10) الإشارة الأصلية على اعتبار عدم وجود أي إزاحة زمنية (الأعلى)، و الإشارة المستقبلية المشوهة (الوسط)، و تابع التشابه المتبادل بينهما.

نقترح في حالة وجود تشويه كبير على النبضة (وجود كمية كبيرة من الشوائب و الفقاعات) استبدال عملية التشابه المتبادل بعملية حساب تكامل الإطار المستقبل (بالقيمة المطلقة)، لكن بعد عكس هذا الإطار (الذي سيتم عمليا هو جمع قيمة العينات و هو ما قمنا به على برنامج Matlab). السبب في عكس الإطار هو أن بداية وصول النبضة محددة بشكل أفضل بكثير من نهايتها التي يمكن أن تأخذ شكل ذيل، نتيجة لوجود الصدى المتلاحق. تحسس المسافة الزمنية بين نهاية الإشارة (بعد العكس و أخذ القيمة المطلقة و التكامل) و نهاية الإطار يتم بواسطة تحسس المطال. لكن عملية تحسس المطال هنا ستنتمتع بالمناعة نفسها من الضجيج التي تتمتع بها عملية التشابه المتبادل، و ذلك بسبب وجود التكامل. السبب الوحيد الذي يجعل عملية التشابه المتبادل مقاومة للضجيج هي عملية التكامل التي يتضمنها حساب التشابه المتبادل. عملية التكامل للنبضة التي قمنا بها هنا لها التأثير نفسه. كما يبين الشكل (11) فإن الزمن الذي ينبغي قياسه هنا هو الزمن من نهاية الإشارة (بعد العكس و أخذ القيمة المطلقة و التكامل) حتى نهاية الإطار. هذا الزمن يساوي الزمن ما بين بداية الإطار الزمني و ورود النبضة المستقبلية، وذلك قبل العكس و التكامل. بمعرفة هذا الزمن يمكن معرفة الفارق الزمني بين الإشارة المرسل و المستقبلية. سبب أخذ القيمة المطلقة هو الحصول على أعلى قيمة تراكمية عند جمع قيمة العينات بهدف الحد من تأثير الضجيج. الضجيج لا يتراكم بسبب أن قيمه عشوائية بعضها سالب و الآخر موجب فيلغي بعضها بعضا.

تأثير الفقاعات الغازية في القياس قد ينحصر فيما سبق ذكره إذا كانت غايتنا هي حساب التدفق الحجمي للغاز و المائع معا. أي أننا نعتبر أن حجم الغاز المتدفق هو جزء من التدفق الحجمي الكلي المراد قياسه. أما في الحالة التي يكون فيها مطلوبا حساب حجم المائع المتدفق فقط، فمن الواضح جدا أن تقنية القياس بشكلها الحالي سنفشل فشلا ذريعا، لأنها تقوم بحساب حجم الغاز المتدفق على أنه جزء من التدفق الحجمي الكلي بينما المطلوب حساب تدفق المائع فقط. نلاحظ بسهولة من الأشكال (2) و (3) و المعادلات (1) و (2) و (3) أن إجرائية القياس المدروسة هنا لا تميز وجود الغاز من عدمه، وبالتالي فإنها ستعطي القراءة نفسها في حال كان الغاز يشكل مثلا 20 % من السائل المتدفق و في حال كان يشكل 0% .



الشكل (11) عكس و مكاملة القيمة المطلقة للنبضة المستقبلية بهدف تحديد موقعها من الإطار

الاستنتاجات و التوصيات:

إن دراسة إجرائية حساب التدفق بواسطة الأمواج فوق الصوتية، باعتماد زمن وصول النبضة من خلال استخدام مرسلين يعملان أيضا كمستقبلين، أظهرت أن هذه الطريقة تحتاج إلى حالة جريان منتظم لسائل متجانس لكي يمكن الوصول إلى دقة مقبولة (خطأ أقل من 1%). طبعاً إن عدم انتظام السائل ليس هو المساهم الوحيد في خطأ القياس، و لكننا نجد من هذه الدراسة أن هناك عددا من حالات عدم انتظام جريان السائل أو عدم تجانسه، وهي ليست بالحالات القليلة الانتشار، وقد أدت إلى أخطاء فادحة، وإلى وجود كمية كبيرة من الفقاعات التي أدت إلى نفس عملية القياس كليا، فيما لو أردنا قياس حجم المائع المتدفق فقط من دون الغاز. وعلى أنه قد يخطر ببالنا أن نزود المستخدم بتوصيات بأن ينصب جهازه في مكان بعيد عن الصمامات و المضخات للحصول على جريان منتظم

قدر الإمكان، فإنّ هذا ليس بالمتيسر أكثر الأحيان، كما أن الترسبات ضمن الأنابيب قد تشكل عوائق مختلفة تؤدي إلى خلق اضطرابات في جريان السائل لا يعلم المستخدم عنها شيئاً، و بالتالي هذا يؤدي إلى ضعف الوثوقية بجهاز القياس.

إذا أردنا الحصول على وثوقية و دقة في تقنية القياس هذه، فإن علينا الحصول على صورة لتوزيع شعاع السرعة على كامل مساحة مقطع الأنبوب. هذا هو الواقع إذا كنا نتوقع من الجهاز أن يقيس تدفق المائع الصافي في سائل تشكل الفقاعات الغازية حوالي خمس حجمه الإجمالي، وهو يسير بجريان مضطرب، و فيه عدد من الدوامات و المائع هو عبارة عن أكثر من طور. هذا التحدي موجود بالفعل في الكثير من التطبيقات العملية . فمثلا السائل الذي يخرج من الآبار النفطية قد يتصف بكل هذه الحالات غير المثالية.

بكلام آخر من الواضح أن المعادلة $Q = V.A$ تفترض أن المقدار V هو مقدار ثابت، و في حال عدم ثبات هذا المقدار فإننا نأمل أننا نقيس قيمة وسطية مناسبة، و هذه ليست هي الحال دائماً، و لكننا بالانتقال إلى القانون الأعم و هو $Q = \oint V.dA$ [1] ، فإننا نستطيع الحصول على التدفق الحقيقي إذا استطعنا الحصول على قيمة السرعة على كل جزء من مساحة المقطع. أما إذا أردنا معرفة تدفق المكونات المختلفة للسائل المتدفق كلا على حدة، كما في حالة مائع-غاز أو ماء-نفت، فإننا بحاجة لمعرفة سرعة الصوت أيضاً في أرجاء مقطع الأنبوب، لأن سرعة الصوت يمكن أن تكشف المادة المتدفقة.

المراجع:

- 1- الدكتور المهندس محمد يحيى رستم ،الهيدروليك التطبيقية.جامعة دمشق،1993، 449 ص.
- 2- LIPTAK, Bela.G. *Instrument Engineers Hand Book :Part-1:Process Measurement And Analysis*. 3rd .ed., CRC Press LLC, Boca Raton & London & Washington DC,1999,1365.
- 3-LATINO,Carl.D ; ANDERSEN, Niels. L ; VOSS,Frands *Detection Of Time Of Arrival Of Ultrasonic Pulses*. Journal Of Physics USA. Conference series 52 ,2006,14-26.
- 4- FAZALUL RAHIMAN, Mohd Hafez ; ABDUL RAHIM, Ruzairi; FAZALUL RAHIMAN, Mohd Hezri; TAJJIDIN, Mazidah *Ultrasonic Transmission-Mode Tomography Imaging for Liquid/Gas Two-Phase Flow*. IEEE SENSORS JOURNAL USA. Vol. 6 NO. 6, DECEMBER 2006, 1706-1715.
- 5- PAVLOVIĆ ,V; STOJČEV, M ; DIMITRIJEVIĆ,B; GOLUBOVIČ , Lj ; ZIVKOVIČ, M ; STANKOVIČ, Lj. *Ultrasonic pulse-phase method applied in Fluid measurements*. IEEE Proc-SCi.Meas. Technol USA. Vol.143 N^o.5,Septemeber 1996, 327-333.
- 6- LYNNWORTH, Lawrence.C. *Industrial Applications Of Ultrasound – A Review II. Measurement, Tests, and Process Control Using Low-Intensity Ultrasound*. IEEE Transactions On Sonics And Ultrasonics USA. Vol. SU-22 N^o. 2 ,March 1975, 71-101.