

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ ΥΓΡΩΝ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ

Κωνσταντίνος Κράλλης¹, Νικόλαος Ορφανουδάκης²

¹ Ήρων Σύμβουλοι Μηχανικοί
Χ. Τρικούπη 107
11473 ΑΘΗΝΑ

² ΤΕΙ Στερεάς Ελλάδος
ΣΤΕΦ – Τμήμα Μηχανολογίας
34400 Ψαχνά Ευβοίας
e-mail: norfan@teihal.gr

Περίληψη

Η μέθοδος μέτρησης παροχής υγρών με υπερήχους είναι μια ευέλικτη μέθοδος και μάλιστα είναι ιδιαίτερα ελκυστική σε σωληνώσεις μεγάλης διαμέτρου. Σε συνέχεια προγράμματος πειραματικών μετρήσεων, παρουσιάζεται υπολογιστική διερεύνηση των σημαντικότερων πηγών αβεβαιότητας που οφείλονται στις μετρήσεις που διεξάγει ο χειριστής της συσκευής με προσομοίωση Monte-Carlo.

Λέξεις-Κλειδιά: ταχύτητα ρευστών, προσομοίωση monte-carlo, υπέρηχοι

Abstract

Ultrasonic liquid flow measurement is an attractive method, especially for large diameter piping. Following our experimental investigation, we present an estimation of the most important contributions to the uncertainty of liquid velocity measurement due the measurements performed by the operator using a Monte-Carlo simulation.

Keywords: liquid velocity measurement, monte-carlo simulation, ultrasonics

1. Εισαγωγή

Τα όργανα μετρήσεως ταχύτητας ρευστών τύπου “transit-time flowmeters”, όπως προκύπτει και από το όνομά τους, μετρούν την διαφορά του χρόνου μετάδοσης παλμών υπερήχων προς την κατεύθυνση της ροής και αντίθετα από αυτήν. Ο τύπος αυτός οργάνου ονομάζεται επίσης “time of flight” και “time of travel”.

Κωνσταντίνος Κράλλης, Νικόλαος Ορφανουδάκης
Εκτίμηση αβεβαιότητας μέτρησης ταχύτητας ροής υγρών με υπερήχους

5ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014

Σε μια τυπική διάταξη, η ηχητική δέσμη εκπέμπεται σε γωνία περίπου 45° ως προς τον άξονα του σωλήνα. Υπάρχουν δυο γωνιακές κεφαλές εκπομπής και λήψεως υπερήχων οι οποίες είναι στερεωμένες στο εξωτερικό του σωλήνα σε απόσταση που καθορίζεται από το όργανο ή με την βοήθεια νομογραφήματος. (Considine 1993) Κάθε κεφαλή (transducer) εκπέμπει εναλλάξ και την ίδια στιγμή η άλλη λειτουργεί ως δέκτης. Η διαφορά του χρόνου διάδοσης Δt προς τις δυο κατευθύνσεις δίνει την ταχύτητα, η οποία είναι γραμμική συνάρτηση της διαφοράς χρόνου Δt . Επειδή η εσωτερική διάμετρος (και επομένως η διατομή) είναι γνωστή, τα όργανα υπολογίζουν αυτόματα και την ογκομετρική παροχή.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου παραμένει η δυνατότητα μέτρησης παροχής ακόμα και σε σωληνώσεις μεγάλης διαμέτρου χωρίς να χρειασθεί οποιαδήποτε τεχνική παρέμβαση για εγκατάσταση μετρητικής διάταξης.

Η μέθοδος είναι αποτελεσματική σε υγρά με μικρή απόσβεση των ηχητικών κυμάτων. Σωματίδια και φυσαλίδες στο υγρό είναι ανεπιθύμητα, διότι προκαλούν εξασθένηση, διασπορά και ανακλάσεις της δέσμης που δυσκολεύουν την χρονομέτρηση των παλμών. Επίσης είναι απαραίτητο ο σωλήνας να είναι πλήρης, δηλαδή να μην υπάρχει θύλακος αέρα ή φαινόμενα διασπαστικής ροής.

Οι περισσότεροι κατασκευαστές εξοπλισμού συνιστούν η μέτρηση να γίνεται σε θέση με πλήρες ανεπτυγμένο προφίλ ταχύτητας, δηλαδή σε ευθύγραμμο τμήμα μακριά από καμπύλες και εξαρτήματα όπως βάνες, φίλτρα κλπ. Επίσης ορισμένοι κατασκευαστές συνιστούν το πάχος του τοιχώματος να μην υπερβαίνει το 10% της διαμέτρου του σωλήνα, πράγμα που δεν επιτυγχάνεται πάντα σε σωλήνες μικρών διαμέτρων.

Ένας πρόσθετος περιορισμός που υφίσταται είναι η αδυναμία μέτρησης σε σωλήνες υψηλής θερμοκρασίας, επειδή οι κεφαλές υπερήχων είναι εγκλεισμένες σε σφήνες από Perspex για επίτευξη της αναγκαίας γωνίας εκπομπής (παρόμοιας διαμόρφωσης με τις κεφαλές εντοπισμού ασυνεχειών σε συγκολλήσεις).

Όσον αφορά την ακρίβεια της μεθόδου, το πλήθος των διαθέσιμων στοιχείων είναι ακόμα περιορισμένο, τουλάχιστον για βιομηχανικές χρήσεις, με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολη η σύγκριση με πρότυπες μεθόδους. Επίσης δεν είναι τεκμηριωμένη η ευαισθησία της μεθόδου σε αβεβαιότητες των εισαγομένων δεδομένων (θερμοκρασία ρευστού και τοιχώματος, διαστάσεις σωλήνα, απόσταση κεφαλών εκπομπής-λήψης) παρόλο που μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την μαθηματική ανάλυση που ακολουθεί. Έχει διερευνηθεί η επίδραση του προφίλ ταχύτητας στην ακρίβεια της ένδειξης (Moore, 2000).

2. Μεθοδολογία

2.1 Ανάπτυξη γεωμετρικού μοντέλου

Από τον νόμο του Schnell προκύπτουν οι γωνίες της δέσμης ϕ_i μέσα στο μεταλλικό τοίχωμα (ϕ_2) και στο υγρό (ϕ_3) όταν είναι γνωστή η γωνία της κεφαλής ϕ_1 και η ταχύτητα διαμήκων κυμάτων c_1 στο υλικό της κεφαλής (Perspex), στο μεταλλικό τοίχωμα και στο υγρό.

$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{c_1}{c_2}, \quad \frac{\sin \phi_3}{\sin \phi_2} = \frac{c_3}{c_2} \quad (1)$$

Για συνήθη υλικά σε ενεργειακές εγκαταστάσεις, και στην θερμοκρασιακή περιοχή 0-80 °C που μας ενδιαφέρει, έχουμε:

Πίνακας 1: Ταχύτητα διαμήκων ηχητικών κυμάτων σε διάφορα υλικά

1	Perspex	2680 m/s ± 1.0%
2	Χάλυβας	5920 m/s ± 0.5%
3	Υδωρ	1400-1550 m/s (0-70 °C)

Η ταχύτητα του ήχου στο ύδωρ c_3 είναι διαθέσιμη σε μορφή πίνακα στο Engineering Toolbox (βλέπε Παράρτημα Ι). Για ευκολότερη ενσωμάτωση στο υπολογιστικό μοντέλο χρησιμοποιούμε ένα πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού που προσαρμόζεται στα δεδομένα με ακρίβεια 0.1% ή καλύτερη:

$$c_3(T) = 0.000093 \cdot T^3 - 0.041224 \cdot T^2 + 4.579692 \cdot T + 1404.3 \quad (m/s) \quad (2)$$

Ο χρόνος T_0 μετάδοσης του παλμού με το υγρό σε ακινησία προκύπτει από την γεωμετρία ίσος με:

$$T_0 = 2 \left(T_{probe} + \frac{L_2}{c_2} \right) + Z \frac{L_3}{c_3} = 2 \left(T_{probe} + \frac{t}{c_2 \cos \phi_2} \right) + Z \frac{D-2t}{c_3 \cos \phi_3} = 2\tau_0 + Z \frac{D-2t}{c_3 \cos \phi_3} \quad (3)$$

Όπου D η εξωτερική διάμετρος, t το πάχος του τοιχώματος, L_i οι διαδρομές της δέσμης στο μέσον 1 (Perspex), 2 (τοιχώμα, χάλυβας) και 3 (υγρό) και c_i οι ταχύτητες του ήχου στα τρία μέσα.

Η ίδια σχέση δίνει και το χρόνο μετάδοσης του παλμού στην κατεύθυνση της ροής t_{AB} και αντίθετα t_{BA} προς αυτήν, με τροποποίηση του όρου c_3 στον παρονομαστή:

$$t_{AB} = 2\tau_0 + Z \frac{D-2t}{(c_3 + u) \cdot \cos \phi_3} \quad (4a)$$

$$t_{BA} = 2\tau_0 + Z \frac{D-2t}{(c_3 - u) \cdot \cos \phi_3} \quad (4b)$$

Η διαφορά των δυο χρόνων είναι σχετικά ανεξάρτητη από τα στοιχεία της κεφαλής και του τοιχώματος (παραμένει η επίδραση στον υπολογισμό του ϕ_3):

$$\Delta t = Z \frac{D-2t}{\cos \phi_3} \left(\frac{1}{c_3 - u} - \frac{1}{c_3 + u} \right) \cong Z \frac{D-2t}{\cos \phi_3} \cdot \frac{2u}{c_3^2} \quad (5)$$

Επιλύοντας ως προς u λαμβάνουμε:

Κωνσταντίνος Κράλλης, Νικόλαος Ορφανουδάκης
Εκτίμηση αβεβαιότητας μέτρησης ταχύτητας ροής υγρών με υπερήχους

5ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014

$$u = \frac{\cos \phi_3}{Z \cdot (D - 2t)} \cdot \frac{c_c^2}{2} \cdot \Delta t \quad (6a)$$

$$u_{axial} = \frac{u}{\sin \phi_3} \quad (6b)$$

Η απόσταση d των σημείων εξόδου της δέσμης των δυο κεφαλών κατά μήκος του άξονα της ροής δίνεται από την σχέση:

$$d = 2t \cdot \tan \phi_2 + Z \cdot (D - 2t) \cdot \tan \phi_3 \quad (7)$$

2.2 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων

Οι σημαντικότερες πηγές αβεβαιότητας έχουν καταγραφεί ως εξής (Cermakova et al, 2004):

- Αβεβαιότητα στην μέτρηση της εξωτερικής διαμέτρου.
- Αβεβαιότητα στην μέτρηση του πάχους του τοιχώματος.
- Αβεβαιότητα στην γωνία της υπερηχητικής δέσμης.
- Αβεβαιότητα στην μέτρηση της διαφοράς χρόνου.
- Αβεβαιότητες λόγω απόκλισης του σωλήνα από το κυλινδρικό σχήμα. Αυτή μπορεί να είναι σημαντική σε σωλήνες με λεπτά τοιχώματα.

Επιπλέον με βάση την μαθηματική ανάλυση που προηγήθηκε, έχουμε εντοπίσει μια ακόμα πηγή αβεβαιότητας η οποία είναι η διαφοροποίηση της ταχύτητας του ήχου μέσα στο υγρό λόγω της θερμοκρασίας. Όπως προκύπτει από το σχήμα I.1 και την εξίσωση 2, η αβεβαιότητα αυτή είναι αμελητέα στην περιοχή των 70-80 °C (π.χ. εγκαταστάσεις κεντρικών θερμάνσεων, τροφοδοσία ατμολεβήτων), όπου η ταχύτητα του ήχου είναι σχετικά σταθερή.

Υποτέθηκαν οι ακόλουθες εύλογες εκτιμήσεις για τις μετρήσεις των χαρακτηριστικών της εγκατάστασης θεωρούνται ρεαλιστικές σε συνθήκες βιομηχανικού χώρου:

- Η μέτρηση της εξωτερικής διαμέτρου ακολουθεί κανονική κατανομή με $\sigma \leq 2$ mm. Η αβεβαιότητα μπορεί να είναι μεγαλύτερη αν προκύπτει από μέτρηση της περιμέτρου με εύκαμπτη μετροταινία
- Το πάχος του σωλήνα, εφόσον πρόκειται για τυποποιημένους χαλύβδινους σωλήνες ακολουθεί τριγωνική κατανομή $\pm 10\%$ της ονομαστικής διαμέτρου, με βάση τις προδιαγραφές σωλήνων.
- Η γωνία της δέσμης μέσα στο υγρό π ακολουθεί κανονική κατανομή με $\sigma = 0.5^\circ$
- Η μέτρηση θερμοκρασίας ακολουθεί κανονική κατανομή με $\sigma = 2.5$ °C

Προφανώς οι παράμετροι των κατανομών αυτών μπορούν να τροποποιηθούν κατά περίπτωση και μάλιστα πολύ εύκολα. Η ακρίβεια μέτρησης της θερμοκρασίας μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά σε πολλές περιπτώσεις ενώ η αβεβαιότητα της γωνίας της δέσμης είναι μάλλον αισιόδοξη σε περιπτώσεις με ανώμαλη εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα.

2.3 Η αβεβαιότητα στην μέτρηση χρόνου

Η μέτρηση χρόνου στα πρώτα όργανα αυτής της κατηγορίας ήταν βασισμένη σε απλή μέτρηση χρόνου άφιξης ενός μεμονωμένου παλμού υπερήχων. Όμως η τύρβη και η παρουσία διαφασικών καταστάσεων (φυσαλίδες, σωματίδια) οδηγεί σε χρονική διασπορά του παλμού και εισαγωγή αβεβαιότητας ως προς τον χρόνο άφιξης του. Για να αντιμετωπισθεί αυτό το πρόβλημα τα νεότερα όργανα εκπέμπουν ακολουθίες παλμών και προσδιορίζουν τον πιθανότερο χρόνο άφιξης με τεχνικές συσχέτισης. Οι κατασκευαστές δεν παρέχουν επαρκή στοιχεία για τις μεθόδους και την ακρίβειά τους. Πάντως όπως προκύπτει από την εξίσωση 6, η σχέση μεταξύ u και Δt είναι απλή γραμμική και επομένως η αβεβαιότητα στην μέτρηση χρόνου αντανακλάται άμεσα στην υπολογιζόμενη ταχύτητα.

2.4 Μεταφορά σε περιβάλλον GNU Octave

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον GNU Octave σε λειτουργικό σύστημα Linux. Το Octave είναι ένα πρόγραμμα ανοικτού κώδικα (FOSS – free and open source software) για μαθηματικούς υπολογισμούς που χρησιμοποιεί την ίδια γλώσσα προγραμματισμού με το πολύ γνωστό MATLAB.

Το πρόγραμμα παράγει διανύσματα διάστασης IMAX με κανονικές κατανομές εξωτερικής διαμέτρου, γωνίας δέσμης και θερμοκρασίας καθώς και τριγωνική κατανομή για το πάχος του τοιχώματος. Η θερμοκρασία επηρεάζει την ταχύτητα του παλμού μέσα στο υγρό. Αγνοήθηκαν δευτερογενείς επιδράσεις της θερμοκρασίας στις διαστάσεις του σωλήνα, δεδομένου ότι ο διαθέσιμος εξοπλισμός (κεφαλές κατασκευασμένες από Perspex) μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο στην περιοχή 0-80 °C.

Δεχόμαστε τυπική διαφορά χρόνου $\Delta t = 100\text{ns}$, τυπική για μικρές εγκαταστάσεις. Το πρόγραμμα παράγει IMAX τιμές ταχύτητας, για τις οποίες προσδιορίζει μέση τιμή και τυπική απόκλιση.

3. Αποτελέσματα

Αρχικά έγιναν προσομοιώσεις Monte-Carlo με 10^6 σημεία, με μεταβολή μόνο ενός μεγέθους (θερμοκρασία, γωνία δέσμης, διάμετρος) διατηρώντας πάντα μια τριγωνική κατανομή στο πάχος τοιχώματος.

Υποτέθηκε μια διαφορά χρόνου $\Delta t = 100\text{ ns}$, τυπική τιμή για κεντρικές σωληνώσεις εγκαταστάσεων κεντρικής θέρμανσης κλπ.

Σε εξωτερική διάμετρο 150 mm, πάχος τοιχώματος 3 mm, γωνία δέσμης 23.8° και θερμοκρασία 25 °C αντιστοιχεί σε ταχύτητα ρευστού 1.759 m/s

Στη συνέχεια εισήχθησαν ταυτόχρονα οι διασπορές και στις τέσσερες παραμέτρους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

4. Συμπεράσματα – Πρόταση

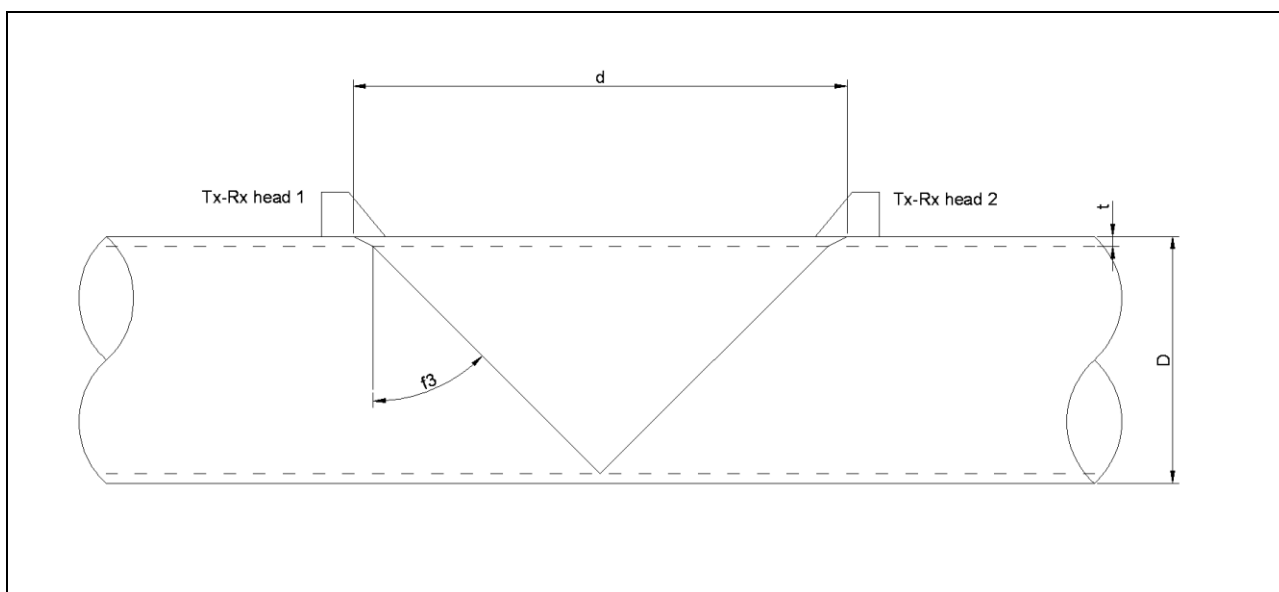
Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η μέθοδος είναι σχετικά αναισθητη σε μεταβολές της

θερμοκρασίας, μετρίως ευαίσθητη στον προσδιορισμό της διαμέτρου και αρκετά ευαίσθητη στην γωνία της δέσμης. Σφάλματα στη γωνία της δέσμης μπορούν εύκολα να εισαχθούν είτε λόγω κακής τοποθέτησης, είτε λόγω ανωμαλιών στην εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα, είτε λόγω φυσικής φθοράς των κεφαλών.

Δεν διερευνήθηκε η επίδραση της «εσωτερικής αβεβαιότητας» που οφείλεται στην ακρίβεια μέτρησης χρόνου από την συσκευή, δεδομένου ότι οι κατασκευαστές δεν παρέχουν σχετικά στοιχεία, είναι όμως εύκολο να εισαχθεί και αυτή η παράμετρος με την ίδια μεθοδολογία. Η εκτίμηση της όμως είναι μάλλον προφανής δεδομένου ότι η προσδιοριζόμενη ταχύτητα είναι ευθέως ανάλογη της διαφοράς χρόνου διάδοσης του παλμού προς τις δυο κατευθύνσεις.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα σειράς προσομοιώσεων Monte-Carlo

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	σ			
	Temp (oC)	F3 (deg)	D (m)	Vt (m/s - %)
1.1	2.5	0	0	0.016 – 0.9%
1.2	0	0.5	0	0.042 – 2.4%
1.3	0	0	0.002	0.025 – 1.4%
2.1	2.5	0.5	0.002	0.051 – 2.9%

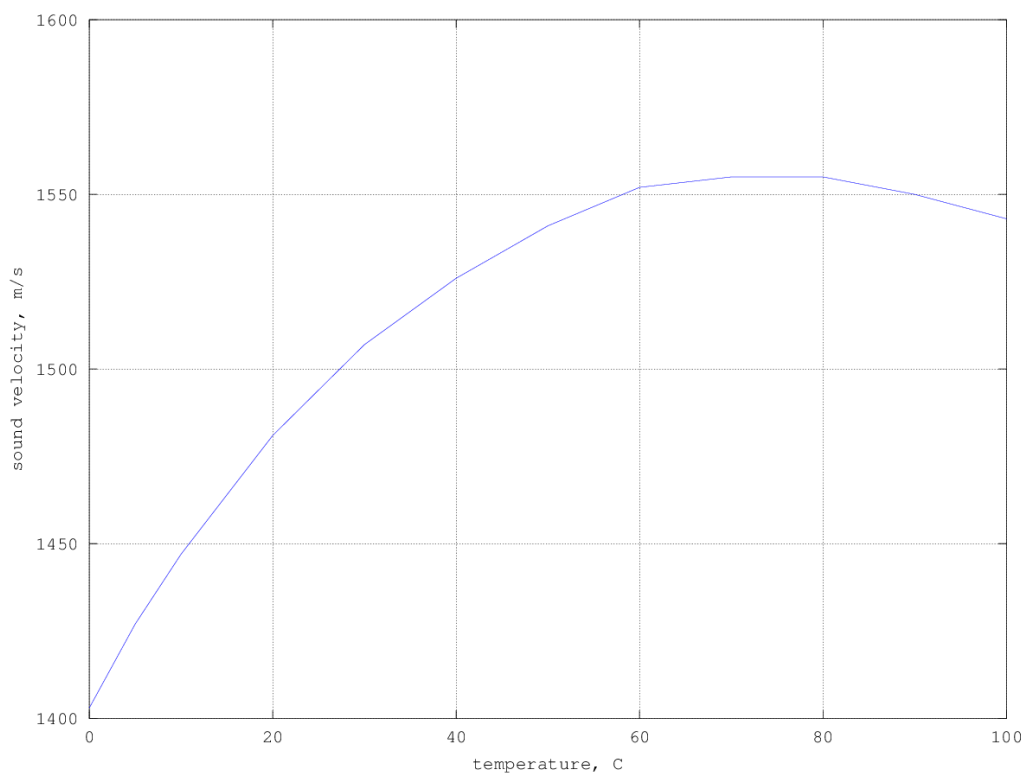


Σχήμα 1: Γεωμετρία της μέτρησης ταχύτητας υγρού με υπερήχους ($Z=2$)

5. Παράρτημα 1 – επίδραση θερμοκρασίας στην ταχύτητα του ήχου

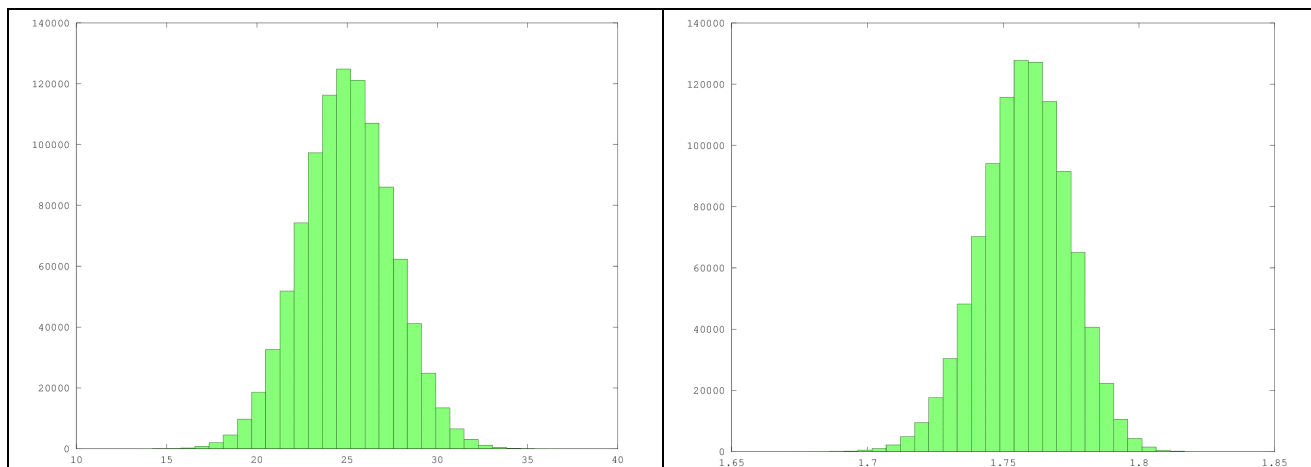
Πίνακας I.1 - Ταχύτητα ήχου στο ύδωρ συναρτήσει της θερμοκρασίας

T (°C)	C ₃ (m/s)
0	1403
5	1427
10	1447
20	1481
30	1507
40	1526
50	1541
60	1552
70	1555
80	1555
90	1550
100	1543

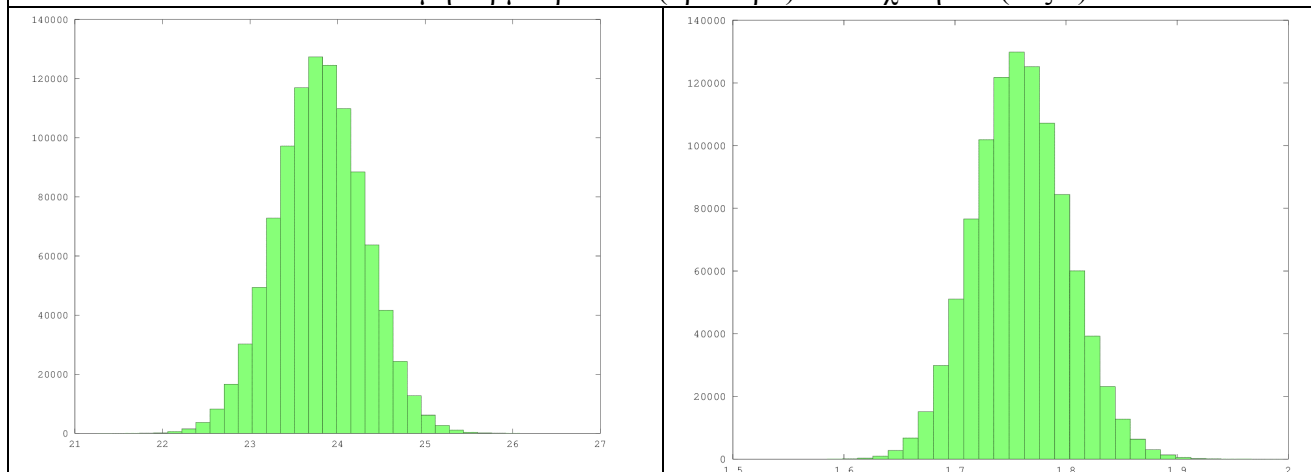


Σχήμα I.1 - Ταχύτητα ήχου στο ύδωρ συναρτήσει της θερμοκρασίας

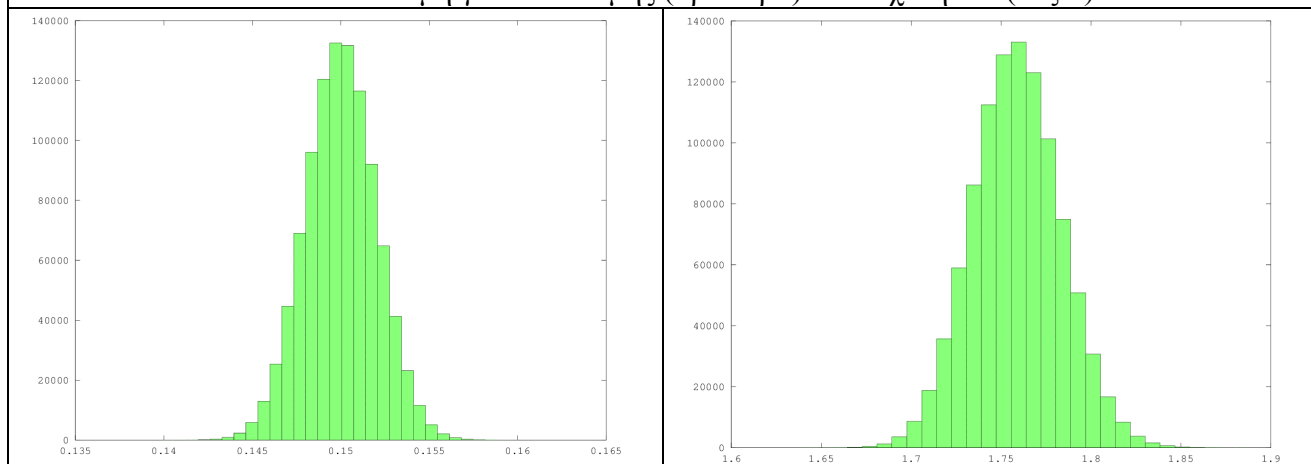
6. Παράρτημα 2 – Γραφική παράσταση αποτελεσμάτων



ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 1.1: Κατανομή θερμοκρασιών (αριστερά) και ταχυτήτων (δεξιά)



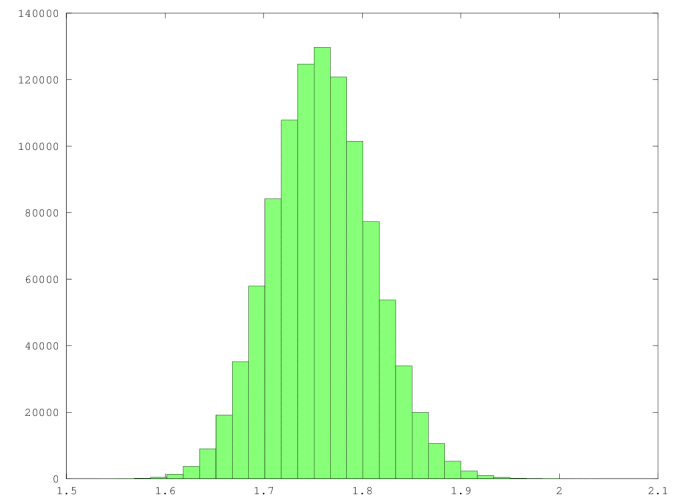
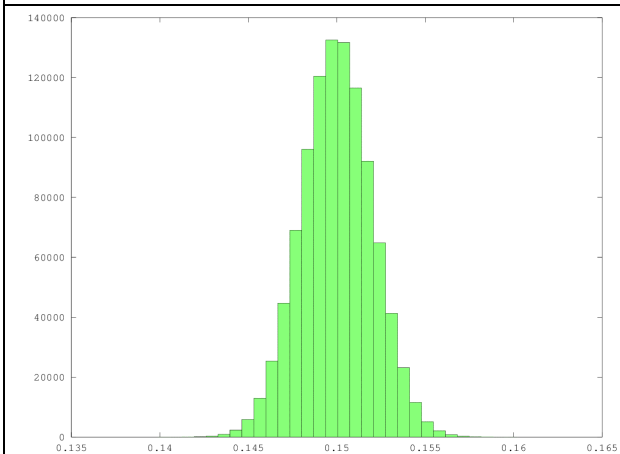
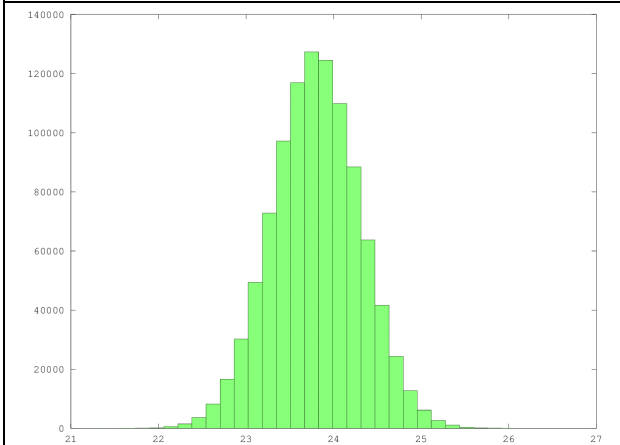
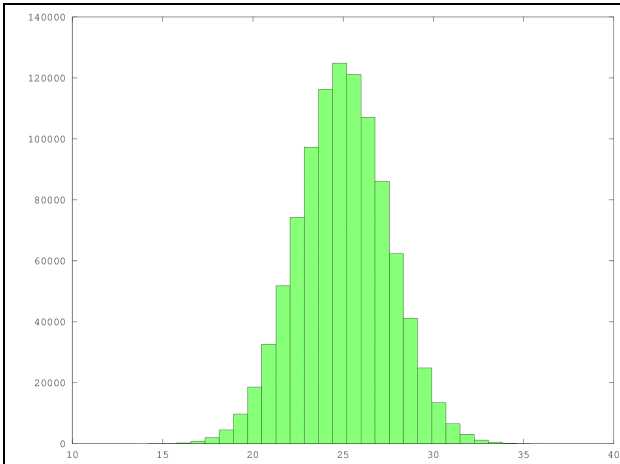
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 1.2: Κατανομή γωνιών δέσμης (αριστερά) και ταχυτήτων (δεξιά)



ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 1.3: Κατανομή διαμέτρων (αριστερά) και ταχυτήτων (δεξιά)

Κωνσταντίνος Κράλλης, Νικόλαος Ορφανουδάκης
Εκτίμηση αβεβαιότητας μέτρησης ταχύτητας ροής υγρών με υπερήχους

5ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014



ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 2.1: Αριστερά: κατανομή θερμοκρασιών (άνω), γωνιών δέσμης (μέσον) και διαμέτρων (κάτω). Δεξιά: κατανομή ταχυτήτων

Κωνσταντίνος Κράλλης, Νικόλαος Ορφανουδάκης
 Εκτίμηση αβεβαιότητας μέτρησης ταχύτητας ροής υγρών με υπερήχους

5ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014

7. Βιβλιογραφία

Cermakova M., Kris, J., Cermak, O., Bozikova, J.: “Uncertainty in the measurements of clamp-on ultrasonic flowmeters”, Slovak Journal of Civil Engineering, 1, 2004, pp. 7-12.

Considine, D.M.: “Ultrasonic Flowmeters”, Process/Industrial Instruments & Controls Handbook, 4th Ed., McGraw-Hill, New York, NY:4.115-4.119 (1993).

Estrada, H.: “Theory of ultrasonic flow measurement – gases and liquids”, 76th International School on Hydrocarbon Measurement (class 3175), Oklahoma City, 2001.

Moore, et al: “Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles: methodology”, Meas. Sci. Technol. **11** 1802 (2000)

Rabalais, R.A.: “Ultrasonic flow measurement: Technology and applications in process and multiple vent stream situations”, Proceedings of the Texas A&M Symposium, 2002.