

Σύγκριση πρωτογενών με μη παρεμβατικές μεθόδους μέτρησης παροχής: Ευαισθησία μεθόδου μέτρησης παροχής με υπερήχους

Κ. Κράλλης¹, Ν. Γ. Ορφανουδάκης², Χρ. Ζιώγας³

¹ Ήρων Σύμβουλοι Μηχανικοί, Χ. Τρικούπη 107, 11473 Αθήνα

² Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας, Εργαστήριο ατμοκινητήρων και λεβήτων, 34400 Ψαχνά Ευβοίας, e-mail: norfan@teihal.gr

³ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός ΕΔΕ,

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η διερεύνηση της μετρολογικής ευαισθησίας των μετρήσεων μιας συσκευής μέτρησης παροχής με υπερήχους (transit-time flowmeters) στα εισαγόμενα δεδομένα θερμοκρασίας, διαμέτρου σωλήνωσης και πάχους τοιχώματος σωλήνωσης. Η πειραματική διερεύνηση παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον διότι το μετρητικό μοντέλο, και κατά συνέπεια το μοντέλο διάδοσης των αβεβαιοτήτων, δεν είναι επαρκώς γνωστά.

Abstract

This paper describes the evaluation of the metrological sensitivity of flow measurements using an transit-time flowmeter to the data entered by the operator: fluid temperature, pipe diameter and pipe wall thickness. The experimental evaluation of the sensitivity is useful because the uncertainty propagation model and its dependence of these parameters is not available to the users of such instruments.

Λέξεις-Κλειδιά: transit-time flowmeter, flow rate measurement, ultrasonics, non intrusive methods

1. Περιγραφή της μεθόδου

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”.

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

Κ. Κράλλης, Ν. Γ. Ορφανουδάκης, Χρ. Ζιώγας

Σύγκριση πρωτογενών με μη παρεμβατικές μεθόδους μέτρησης παροχής: Ευαισθησία μεθόδου μέτρησης παροχής με υπερήχους

διαφορά του χρόνου διάδοσης προς τις δυο κατευθύνσεις δίνει την ταχύτητα ροής με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$V = K \cdot \frac{D}{\sin(2\theta)} \cdot \frac{1}{(T_0 - \tau)^2} \cdot \Delta T \quad (1)$$

όπου:

V: μέση ταχύτητα του ρευστού

K: σταθερά

D: εσωτερική διάμετρος σωλήνα

θ : γωνία πρόσπτωσης ηχητικής δέσμης

T_0 : χρόνος μετάδοσης παλμού με το ρευστό σε ακινησία

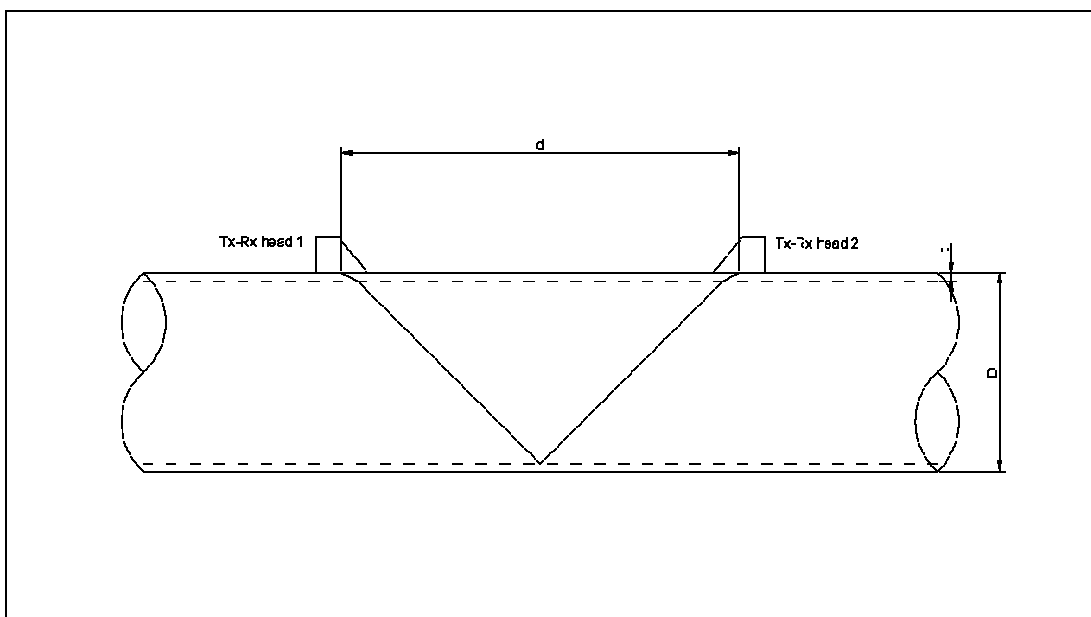
$\Delta T = T_2 - T_1$:

T_1 : χρόνος μετάδοσης του παλμού κατά την διεύθυνση της ροής

T_2 : χρόνος μετάδοσης του παλμού αντίθετα από την διεύθυνση της ροής

τ : νεκρός χρόνος όδευσης του παλμού μέσα από το τοίχωμα του σωλήνα και τις τυχόν επικαλύψεις

Η εξίσωση (1) δίνει την ταχύτητα ροής, V, σαν μια γραμμική συνάρτηση της διαφοράς χρόνου ΔT . Επειδή η εσωτερική διάμετρος (και επομένως η διατομή) είναι γνωστή, τα όργανα υπολογίζουν αυτόματα και την ογκομετρική παροχή.



Σχήμα 1: Μετρητική διάταξη σωλήνα – κεφαλών

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.

Κ. Κράλλης, Ν. Γ. Ορφανουδάκης, Χρ. Ζιώγας

Σύγκριση πρωτογενών με μη παρεμβατικές μεθόδους μέτρησης παροχής: Ευαισθησία μεθόδου μέτρησης παροχής με υπερήχους

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Επίσης είναι απαραίτητο ο σωλήνας να είναι πλήρης, δηλαδή να μην υπάρχει θύλακος αέρα ή φαινόμενα διφασικής 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 γνωστή η ευαισθησία της μεθόδου σε αβεβαιότητες των εισαγομένων δεδομένων (θερμοκρασία ρευστού και τοιχώματος, διαστάσεις σωλήνα, απόσταση κεφαλών εκπομπής-λήψης) παρόλο που για μερικές από αυτές μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση (1), καθώς και οι αλληλεπιδράσεις τους. Έχει διερευνηθεί η επίδραση του προφίλ ταχύτητας στην ακρίβεια της ένδειξης (Moore, 2000).

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.

2. Το όργανο GE Panametrics PT-878

Η συγγραφική ομάδα διαθέτει ένα φορητό όργανο μετρήσεως παροχής του τύπου αυτού, κατασκευής GE Panametrics, τύπος TransPort PT-878. Το όργανο χρησιμοποιεί την τεχνική ψηφιακής επεξεργασίας σήματος “Correlation Transit-Time”™ για βελτίωση της ακρίβειας ανάγνωσης του χρόνου μετάδοσης της ηχητικής δέσμης, ακόμα και σε συνθήκες παρουσίας περιορισμένης διφασικής ροής ή φυσαλίδων.

Η τυπική ακρίβεια του οργάνου δίνεται από τον κατασκευαστή ως $\pm 1\%$ έως 2% (για σωλήνες διαμέτρου μεγαλύτερης των 150 mm ή 6 in, και $\pm 2\%$ έως 5% για σωλήνες μικρότερων διαμέτρων. Το κόστος ετήσιας επιθεώρησης και διακρίβωσης του οργάνου με δυο σετ κεφαλών είναι US\$ 590,00 συν έξοδα μεταφοράς, ασφάλισης και Φ.Π.Α.

3. Μεθοδολογία

Το όργανο PT-878 εγκαταστάθηκε στο δοκιμαστήριο αντλιών και κυκλοφορητών της Wilo στην Άνοιξη Αττικής. Το δοκιμαστήριο αποτελείται από δυο συλλέκτες

Κ. Κράλλης, Ν. Γ. Ορφανουδάκης, Χρ. Ζιώγας

Σύγκριση πρωτογενών με μη παρεμβατικές μεθόδους μέτρησης παροχής: Ευαισθησία μεθόδου μέτρησης παροχής με υπερήχους

παράλληλους ονομαστικής διαμέτρου NPS 3½ in, schedule 5 (Ø101.6x2.1 mm) από ανοξείδωτο χάλυβα ANSI 304.

Ανάμεσα στους συλλέκτες είναι εγκατεστημένοι διάφοροι κυκλοφορητές και αντλίες με σκοπό την επίδειξη των χαρακτηριστικών καμπυλών τους Q-h σε εκπαιδευόμενους τεχνικούς και ενδιαφερόμενους αγοραστές και μεταπωλητές.

Το κύκλωμα του δοκιμαστηρίου κλείνει με την παρεμβολή ρυθμιζόμενης βάνας και μετρητή ροής ηλεκτρομαγνητικού τύπου Siemens SITRANS FM MAG 5100W. Ο μετρητής αυτός λειτουργεί με βάση την επαγωγή ηλεκτρικής τάσης όταν το υγρό ρέει μέσα από μαγνητικό πεδίο.

Ο μετρητής MAG 5100W χρησιμοποιήθηκε σαν συγκριτικό όργανο αναφοράς, με βάση το οποίο συγκρίνονται οι ενδείξεις του PT-878 ώστε να απαλειφθούν οι διακυμάνσεις της ροής μέσα στην σωλήνωση.

4. Συγκριτική βαθμονόμηση των δυο οργάνων

Πίνακας 1: Συγκριτική βαθμονόμηση των δυο οργάνων

	MAG 5100W	PT-878	Διαφορά
	Q_S (m³/h)	Q_G (m³/h)	
1	6.0	6.206	3.4%
2	6.0	5.900	-2.2%
3	6.1	6.052	-0.8%
4	10.4	10.040	-3.5%
5	15.2	14.327	-5.5%
6	15.5	14.680	-5.3%
7	19.6	18.990	-3.1%

5. Πρόγραμμα δοκιμών

Το προσωπικό του Εργαστηρίου διεξήγαγε ένα σύντομο πρόγραμμα διερεύνησης της ευαισθησίας της ενδείξεως του οργάνου σε εισαγωγή εσφαλμένων στοιχείων από τον χειριστή.

Διεξήχθη σειρά τριών δοκιμών, κατά τις οποίες εισήχθησαν ορθές και “λανθασμένες” τιμές για την θερμοκρασία του ρευστού (επηρεάζει την ταχύτητα του ήχου και επομένως το T₀), πάχος τοιχώματος (επηρεάζει το “τ”) και εξωτερικής διαμέτρου (εισέρχεται άμεσα στον υπολογισμό και επιπλέον επηρεάζει το T₀). Σε κάθε περίπτωση καταγράφησαν οι ενδείξεις παροχών των δυο οργάνων.

Επειδή δεν είναι δυνατόν να διατηρείται η παροχή απόλυτα σταθερή, η παράμετρος ελέγχου είναι ο λόγος της ένδειξης παροχής του μετρητή PT-878 προς την ένδειξη του μετρητή Siemens MAG 5100W, στον οποίο δεν έγινε καμιά επέμβαση κατά την διάρκεια

Κ. Κράλλης, Ν. Γ. Ορφανουδάκης, Χρ. Ζιώγας

Σύγκριση πρωτογενών με μη παρεμβατικές μεθόδους μέτρησης παροχής: Ευαισθησία μεθόδου μέτρησης παροχής με υπερήχους

των δοκιμών. Σε κάθε θέση ελήφθησαν 5-7 ζεύγη μετρήσεων, των οποίων ελήφθησαν οι μέσοι όροι.

Πίνακας 2 Συνοπτικά αποτελέσματα δοκιμών

1. ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ					
T (°C)	d (mm)	Q_S (m³/h)	Q_G (m³/h)	Ratio	StDev
18	92	19.60	19.980	0.968	
65	97	19.64	19.623	0.999	0.011
90	97	19.58	19.455	0.994	0.011
2. ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ					
t (mm)	d (mm)	Q_S (m³/h)	Q_G (m³/h)	Ratio	StDev
1.5	92	19.75	19.606	0.993	0.004
2.1	92	19.69	19.281	0.979	0.007
3.2	93.5	19.72	18.629	0.945	0.003
3.6	94	19.76	18.280	0.925	0.005
3. ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ					
D (mm)	d (mm)	Q_S (m³/h)	Q_G (m³/h)	Ratio	StDev
95.0	85	18.79	15.864	0.844	0.019
101.6	93	18.79	18.193	0.968	0.003
109.0	97.3	18.80	19.848	1.056	0.002

T: Εισαχθείσα θερμοκρασία ρευστού

t: Εισαχθέν πάχος τοιχώματος

D: Εισαχθείσα διάμετρος σωλήνα

d: Απόσταση κεφαλών, συνιστώμενη από όργανο PT-878

Q_S: Ένδειξη οργάνου Siemens MAG 5100W

Q_G: Ένδειξη οργάνου GE Panametrics PT-878

Ratio: Λόγος Q_G/Q_S

StDev: Τυπική απόκλιση του λόγου Q_G/Q_S

6. Συμπεράσματα

Από την παραμετρική διερεύνηση προέκυψε ότι υπάρχει σχετικά ασθενής εξάρτηση των ενδείξεων από την εισαγόμενη θερμοκρασία, μέτρια εξάρτηση από το εισαγόμενο πάχος τοιχώματος και έντονη εξάρτηση από την εισαγόμενη διάμετρο.

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, κατά την χρήση του οργάνου πρέπει να εισάγονται με καλή ακρίβεια η διάμετρος και το πάχος τοιχώματος του σωλήνα, ενώ για την θερμοκρασία αρκεί μια καλή εκτίμηση της.

7. Βιβλιογραφία

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

Κ. Κράλλης, Ν. Γ. Ορφανουδάκης, Χρ. Ζιώγας

Σύγκριση πρωτογενών με μη παρεμβατικές μεθόδους μέτρησης παροχής: Ευαισθησία μεθόδου μέτρησης παροχής με υπερήχους

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

“The flow and liquid level handbook”. Vol. 29 “Ultrasonic Doppler Flow-meters”, Omega Engineering, Inc., Stamford, CT (1995).

Liptak, Bela: “Instrument Engineers Handbook, 3rd edition. Volume 1, Process Measurement and Analysis”, Chilton Book Co 26-232 (1995).

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

8. Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς ευχαριστούν την διοίκηση της Wilo Ελλάς για την διάθεση του δοκιμαστηρίου της και την υποστήριξη της ομάδας μας, η οποία ήταν απαραίτητη για την διεξαγωγή της παρούσας σειράς δοκιμών.

Κ. Κράλλης, Ν. Γ. Ορφανουδάκης, Χρ. Ζιώγας
Σύγκριση πρωτογενών με μη παρεμβατικές μεθόδους μέτρησης παροχής: Ευαισθησία μεθόδου μέτρησης παροχής με υπερήχους

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012