

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΡΟΟΜΕΤΡΩΝ

Ζωή Μεταξιώτου, Χρήστος Μήτσας

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ (Ε.Ι.Μ.)

Δ/ση Μηχ/κών Μεγεθών, Οικ. Τετρ. 45, ΒΠΠΕΘ, Σίνδος, 57 022 Θεσ/νίκη, zoe@eim.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια ανασκόπησης των κυριότερων πορισμάτων που προέκυψαν από την τρέχουσα επιστημονική δραστηριότητα πάνω στην επίδραση διαταραχών του πεδίου ροής στη μετρητική συμπεριφορά ροομέτρων. Παρουσιάζονται οι βασικές μορφές διαταραχών που παρατηρούνται και ταυτοποιούνται τα στοιχεία εγκατάστασης που τις προκαλούν. Με βάση τα αποτελέσματα αυτών των μελετών γίνεται μια προσπάθεια αξιολόγησης των υφιστάμενων διεθνών προτύπων και συστάσεων όσον αφορά τις προτεινόμενες συνθήκες εγκατάστασης και τη διασφάλιση συνθηκών αξιόπιστης λειτουργίας βασικών τύπων ροομέτρων. Τέλος γίνεται σύντομη αναφορά στην προσπάθεια παραμετροποίησης του είδους και του μεγέθους των διαταραχών και την ανάπτυξη μοντέλων συσχέτισης των διαταραχών με την αλλαγή στη μετρητική συμπεριφορά διαφόρων ροομέτρων.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα όργανα μέτρησης ροής είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν σε συνθήκες πλήρως διαμορφωμένου πεδίου ροής, κάτω από τέτοιες συνθήκες διακριβώνονται και υπό αυτές τις προϋποθέσεις πληρούνται οι προδιαγραφές τους. Οι συνθήκες αυτές προϋποθέτουν την ύπαρξη ευθύγραμμου τμήματος αγωγού, ικανού μήκους, πριν και μετά το ροόμετρο προκειμένου να εξομαλυνθούν τυχόν διαταραχές του πεδίου ροής που προκαλούνται από στοιχεία της εγκατάστασης όπως βάνες, γωνίες, συστολές, διαστολές, σημεία προσαρμογής αισθητηρίων, κλπ. Οι προϋποθέσεις αυτές, για λόγους οικονομίας στο σχεδιασμό της εγκατάστασης, συχνά δεν πληρούνται με αποτέλεσμα η συμπεριφορά των ροομέτρων κάτω από την επίδραση διαταραχών να μην είναι προβλέψιμη και να χαρακτηρίζεται από μετρητικά σφάλματα αγνώστου μεγέθους. Τις τελευταίες δεκαετίες η ανάπτυξη και διατήρηση πρωτεύοντων προτύπων ροής υψίστης ακρίβειας σε Εθνικά Ινστιτούτα Μετρολογίας αφ' ενός και η αξιοποίηση ισχυρών πειραματικών και υπολογιστικών εργαλείων μελέτης του πεδίου ροής αφετέρου έδωσε τη δυνατότητα της εις βάθος διερεύνησης της συμπεριφοράς διαφόρων τύπων ροομέτρων κάτω από την επίδραση διαταραχών του πεδίου ροής. Οι μελέτες των τελευταίων ετών επικεντρώνονται κυρίως στα εξής:

1. Στην απόκτηση βασικής γνώσης και κατανόησης των ρευστομηχανικών φαινομένων που παρατηρούνται κάτω από μη ιδανικές συνθήκες ροής και την ποσοτικοποίηση αυτών των φαινομένων σε σχέση με κάποιες συνθήκες αναφοράς.
2. Στην καθιέρωση συσχετίσεων μεταξύ συγκεκριμένων και ποσοτικοποιημένων διαταραχών του πεδίου ροής και των αντίστοιχων αποκλίσεων διαφόρων τύπων ροομέτρων εγκατεστημένων μετά από στοιχεία που παράγουν τις συγκεκριμένες διαταραχές.
3. Στη διερεύνηση της ισχύος των υφιστάμενων οδηγιών εγκατάστασης στα σχετικά διεθνή πρότυπα και την ανάπτυξη επιστημονικής τεκμηρίωσης για την πιθανή αναθεώρησή τους.

4. Στην προσπάθεια ανάπτυξης κριτηρίων και μεθόδων για την πρόβλεψη και τη βελτίωση της μετρητικής συμπεριφοράς ροομέτρων σε μη ιδανικές συνθήκες ροής.

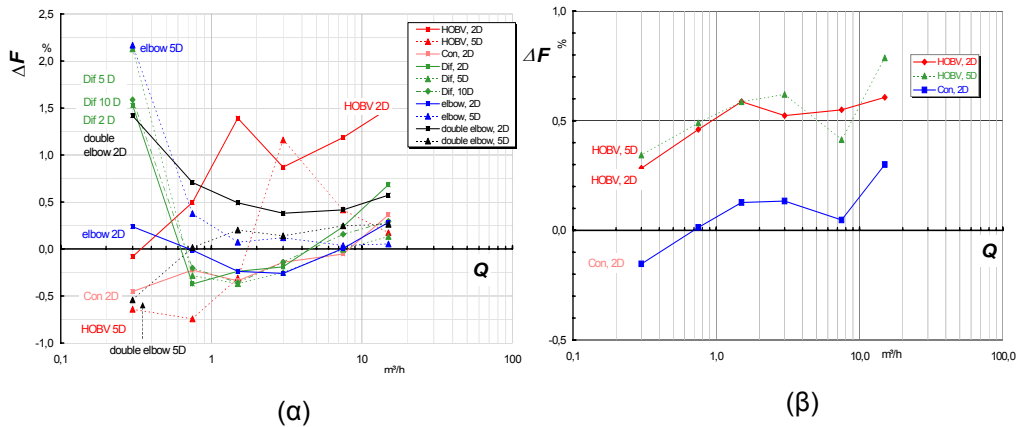
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι διαταραχές που προκαλούνται από στοιχεία εγκατάστασης αναφέρονται πάντα σε σχέση με την κατανομή ταχύτητας σε ένα πεδίο πλήρως διαμορφωμένης μονοδιάστατης τυρβώδους ροής. Η ανάπτυξη ισχυρών πειραματικών εργαλείων όπως η τεχνική Laser Doppler Velocimetry (LDV) και πρόσφατα η τεχνική Doppler Global Velocimetry (3D-DGV) έδωσε τη δυνατότητα της χαρτογράφησης του πεδίου ροής μετά από στοιχεία διαταραχών όπως βάνες, απλές γωνίες (single bends), διπλές γωνίες σε διαφορετικό επίπεδο (double bends out-of-plane) [1-5]. Το πεδίο ροής μετά από τέτοια στοιχεία εμφανίζει μέρος ή το σύνολο των παρακάτω βασικών χαρακτηριστικών σε σχέση με ένα πλήρως διαμορφωμένο πεδίο ροής.

- Η κατανομή της αξονικής ταχύτητας σε μικρή απόσταση από το στοιχείο της διαταραχής παρουσιάζει έντονη *ασυμμετρία* ως προς το επίπεδο συμμετρίας του αγωγού η οποία τείνει να αποσβεσθεί μετά από απόσταση περίπου ίση με 10 διαμέτρους (10D).
- Εκτός της ασυμμετρίας η κατανομή της αξονικής ταχύτητας αποκτά και *επιπεδότητα* η οποία παρά το γεγονός ότι μειώνεται σταδιακά εξακολουθεί να υφίσταται και μετά από απόσταση 10D.
- Μη μηδενική ταχύτητα στην κατεύθυνση της γωνιακής συνιστώσας που δηλώνει την ύπαρξη δευτερεύουσας ροής *περιδίνησης* η οποία στην περίπτωση της διπλής γωνίας τείνει να αποσβεσθεί πολύ αργά με την απόσταση.

Ενα από τα κύρια ζητήματα που προκύπτουν από τις παραπάνω μελέτες αφορά το μήκος απόσβεσης των διαφόρων τύπων διαταραχών το οποίο καθορίζει μεταξύ άλλων και το πλαίσιο των κανόνων εγκατάστασης των ροομέτρων έτσι ώστε να διασφαλίζεται η αξιόπιστη λειτουργία τους. Ένας κανόνας ο οποίος χρησιμοποιείται σε υφιστάμενα διεθνή πρότυπα χρησιμοποιεί ως κριτήριο την ύπαρξη δευτερεύουσας ροής περιδίνησης και καθορίζει ότι στο σημείο εγκατάστασης του ροομέτρου η γωνία περιδίνησης (swirl angle) θα πρέπει να είναι μικρότερη από 2° χωρίς ωστόσο να λαμβάνει υπόψη άλλες παραμέτρους του πεδίου ροής όπως ο αριθμός Re και η σχετική τραχύτητα του αγωγού [6]. Η μέση χρονική τιμή της γωνίας περιδίνησης μπορεί, μεταξύ άλλων, να ορισθεί ως η εφαιπτομένη τόξου του λόγου της μέσης γωνιακής συνιστώσας προς την μέση αξονική συνιστώσα της ταχύτητας [2]. Για την περίπτωση διαταραχών μετά από απλή γωνία, πειραματικές μελέτες δείχνουν ότι παρατηρούνται γωνίες περιδίνησης από -14° στο κέντρο του αγωγού έως και +8° κοντά στα τοιχώματα σε $Re = 10^5$ οι οποίες απαιτούν περίπου 10 διαμέτρους για να αποσβεσθούν σε επίπεδα κάτω των 2°. Αντίθετα, στην περίπτωση διαταραχών μετά από διπλή γωνία παρατηρούνται γωνίες περιδίνησης έως και $\pm 20^\circ$ κοντά στα τοιχώματα του αγωγού με αποτέλεσμα να απαιτούνται μήκη εξομάλυνσης έως και 90 διαμέτρων προκειμένου να ικανοποιηθεί η απαίτηση των 2° [2]. Το πρότυπο ISO 5167 καθορίζει για μετρητές διαφράγματος $\beta=0,75$ απαιτούμενο μήκος εξομάλυνσης ισοδύναμο 36 διαμέτρων το οποίο στην περίπτωση της απλής γωνίας είναι υπερβολικό ενώ το πρότυπο ANSI/API-2530 καθορίζει μήκος ισοδύναμο 13,5 διαμέτρων το οποίο κρίνεται οριακό. Αντίθετα, για την περίπτωση διαταραχών μετά από διπλή γωνία κανένα από τα παραπάνω πρότυπα δεν φαίνεται να παρέχει ασφαλείς συστάσεις εγκατάστασης [6,7]. Η λειτουργία ροομέτρων κάτω από την επίδραση τέτοιων διαταραχών έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή στη μετρητική τους συμπεριφορά η οποία ποσοτικά εκφράζεται με τη μετατόπιση της καμπύλης σφάλματος σε σχέση με την αντίστοιχη καμπύλη που προκύπτει κάτω από ιδανικές συνθήκες εγκατάστασης δηλαδή κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης. Η μετατόπιση έχει βρεθεί πειραματικά ότι δεν είναι

συστηματική, διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του ροομέτρου ενώ εξαρτάται από το είδος και το μέγεθος της διαταραχής καθώς και τον αριθμό Re. [2,3,8]. Για παράδειγμα, σε ροόμετρα τύπου διαφράγματος εγκατεστημένα σε αποστάσεις μεταξύ 20 και 2,5 διαμέτρων μετά από απλή γωνία έχουν παρατηρηθεί μετατοπίσεις από -0,1% έως και -5,0% ανάλογα με τον αριθμό Re και τον συντελεστή β του ροομέτρου [2]. Δύο άλλα παραδείγματα μετατόπισης της καμπύλης σφάλματος ως συνάρτησης του μήκους εξομάλυνσης μετά από διαφορετικά στοιχεία εγκατάστασης δίνονται στα Σχήματα 1(α) και (β), αντίστοιχα [9].



Σχήμα 1. Μετατόπιση καμπύλης σφάλματος υδρομέτρου τύπου Woltman WS (α) και ηλεκτρομαγνητικού ροομέτρου (β) κάτω από επίδραση διαταραχών που προκαλούνται από ημιανοικτή βάννα (HOBV), συστολή (Con), διαστολή (Dif), απλή γωνία (elbow) και διπλή γωνία (double elbow)[9].

Η μη συστηματική, όπως φαίνεται παραπάνω, επίδραση των διαταραχών του πεδίου ροής στη μετρητική συμπεριφορά των ροομέτρων οδήγησε το πεδίο έρευνας στην προσπάθεια ανάπτυξης εμπειρικών μοντέλων συσχέτισης της μετατόπισης της καμπύλης σφάλματος διαφόρων τύπων ροομέτρων με συγκεκριμένες διαταραχές [3,10,11]. Προκειμένου ωστόσο να καταστεί αυτό εφικτό είναι απαραίτητη η παραμετροποίηση των διαταραχών του πεδίου ροής. Στην κατεύθυνση αυτή έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες [1,3] οι οποίες επικεντρώνονται στην περιγραφή χαρακτηριστικών μορφών διαταραχών του πεδίου ροής όπως η περιδίνηση, η επιπεδότητα και η ασυμμετρία με τη βοήθεια ποσοτικών παραμέτρων οι οποίες πηγάζουν από τη γεωμετρία του πεδίου ροής. Για παράδειγμα ο βαθμός ασυμμετρίας του πεδίου ροής εκφράζεται ποσοτικά από τη μετατόπιση του κέντρου βάρους του πεδίου ροής από τον άξονα συμμετρίας του αγωγού ενώ για την περίπτωση πλήρως διαμορφωμένου πεδίου ροής είναι μηδέν. Μια διαφορετική προσέγγιση είναι αυτή των Gersten και Klika οι οποίοι στη θεωρητική τους ανάλυση υποστηρίζουν ότι όλες οι διαταραχές που προκαλούνται από στοιχεία εγκατάστασης μπορούν να θεωρηθούν ως γραμμικός συνδιασμός ενός πεπερασμένου αριθμού στοιχειωδών διαταραχών [12]. Η παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών του μη διαμορφωμένου πεδίου ροής οδήγησε στην ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων πρόβλεψης της μετατόπισης της καμπύλης σφάλματος ικανοποιητικής ακρίβειας τα οποία ωστόσο για την εφαρμογή τους προϋποθέτουν τη χαρτογράφηση του πεδίου ροής πριν το ροόμετρο [2,3]. Πρόσφατα, η προσέγγιση του προβλήματος της πρόβλεψης της μετρητικής συμπεριφοράς ροομέτρων κάτω από την επίδραση διαταραχών του πεδίου ροής γίνεται και με την εφαρμογή μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) με αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα [13,14].

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Απο τη σύντομη ανασκόπηση που επιχειρείται στην παρούσα εργασία προκύπτουν τα εξής:

1. Πειραματικές μελέτες σε πρότυπες μετρολογικές διατάξεις δείχνουν ότι η παρουσία στοιχείων εγκατάστασης κοντά σε ροόμετρα οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα μέτρησης της παροχής με προφανείς τεχνικές και οικονομικές επιπτώσεις.
2. Προηγμένες πειραματικές και υπολογιστικές τεχνικές για τη χαρτογράφηση του πεδίου ροής μετά από τέτοια στοιχεία δείχνουν την ύπαρξη συγκεκριμένων δομών διαταραχών της ροής που απαιτούν μεγάλο μήκος αγωγού για να αποσβεσθούν.
3. Τα υφιστάμενα διεθνή πρότυπα καθώς και οι συστάσεις των κατασκευαστών σε πολλές περιπτώσεις υποεκτιμούν το απαιτούμενο μήκος απόσβεσης των διαταραχών και είναι προφανής η ανάγκη αναθεώρησής τους.
4. Σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες γίνονται τόσο στον τομέα της καθιέρωσης συσχετισμών ανάμεσα στην απόκλιση των ροομέτρων και σε κατάλληλες παραμέτρους που περιγράφουν ποσοτικά τις διαταραχές της ροής όσο και της ανάπτυξης διατάξεων που υποβοηθούν την ταχύτερη απόσβεση των διαταραχών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Yeh, T. T. and Mattingly, G. E., Laser doppler velocimetry studies of the pipe flow produced by a generic header, *NIST Technical Note 1409*, April 1995.
- [2] Mattingly, G. E. and Yeh, T. T., Flowmeter Installation Effects Due to Several Elbow Configurations, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Fluid Flow Measurement*, pp 271-283, 1992.
- [3] Mickan, B., Wendt, G., Kramer, R. and Dopheide, D., Systematic Investigation of Pipe Flows and Installation Effects Using Laser Doppler Anemometry-Part II. The effect of Disturbed Flow Profiles on Turbine Gas Meters-A describing Empirical Model. *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 7, No 3/4, pp 151-160, 1996.
- [4] Muller, H., Lehmacher, T., Pape, N., Strunck, V. and Dopheide, D., 3D-DGV for Flow Field Investigation in Pipes, *11th International Symposium in Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, 2002.
- [5] Merzkirch, W., Flow Metering in Non-Developed Pipe Flow, *6th Asian Symposium on Visualization*, Pusan, Korea, May 2001.
- [6] ISO 5167: Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and venture tube inserted in circular cross section conduits running full, 1980 (E), 1st edition.
- [7] Orifice Metering of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Fluids, A.G.A. report No. 3, Second Edition, 1985, American Gas Association, Arlington, Virginia.
- [8] Yeh, T. T. and Mattingly, G. E., Pipe flow Downstream of a Reducer and its Effects on Flowmeters, *Flow Meas. Instrum.*, 1994, Vol 5, 3, 181-187.
- [9] Adunka, F. and Lederer, T., Investigations on installation disturbances of flow sensors. *6th International Symposium of Flow Measurement*, Queretaro, Mexico, May 2006.
- [10] Klein, A. Review: Effects of Inlet Conditions on Conical Diffuser performance, *J. Fluids Eng.* 103 (1981) 250.
- [11] Morrison, G. L., Hauglie, J. and DeOtte, R. E., Beta Ratio, Axisymmetric Flow Distortion and Swirl Effects Upon Orifice Flowmeters. *Flow Meas. Instrum.*, 1995, 6, 207-216.
- [12] Gersten, K and Klika, M., The decay of three-dimensional deviations from the fully developed state in laminar pipe flow, *Advances in Fluid Mechanics and Turbomachinery*, eds. H.J. Rath and C. Egbers, pp 17-28, Springer-Verlag, (1998).
- [13] Hilgenstock, A. and Ernst, R., Analysis of Installation Effects by Means of Computational Fluid Dynamics-CFD vs Experiments? *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 7, No 3/4, pp. 161-171, 1996.
- [14] Lim, K. W. and Chung M. K., Numerical Investigation on the Installation Effects of Electromagnetic Flowmeter Downstream of a 90o Elbow-Laminar Flow Case. *Flow Meas. Instrum.*, 10 (1999) 167-174.

