

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΑΡΟΧΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Χ.Ε. Παπαδόπουλος¹, Ν.Α. Τσοχατζίδης², Α. Λευκόπουλος³

1. Τμήμα Τεχνολογίας Πετρελαίου & Φ. Αερίου, ΣΤΕΦ, ΤΕΙ Καβάλας, 65404 Καβάλα
2. Δημόσια Επιχείρηση Αερίου (ΔΕΠΑ) ΑΕ. – Τμ. Λ&Σ ΜΣΣ, 62300 Σιδηρόκαστρο
3. Αν. Γεν. Δ/της Ergogroup ΑΕ, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον βελτίωσης της ακρίβειας μέτρησης των πηγών ενέργειας και μεταξύ αυτών του Φυσικού Αερίου, συνοδεύεται από την ανάγκη ανάπτυξης αξιόπιστων μεθόδων εκτίμησης της αβεβαιότητας (uncertainty) των μετρητών. Η συνολική αβεβαιότητα μέτρησης είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή μετρητών κυρίως σε εφαρμογές κοστολόγησης. Στην εργασία αναφέρονται οι παράγοντες που υπεισέρχονται στον προσδιορισμό της αβεβαιότητας μέτρησης παροχής Φυσικού Αερίου. Αναλύονται οι πηγές λάθους και υπολογίζεται η σχετική συνεισφορά της κάθε μίας στη συνολική αβεβαιότητα. Εξετάζονται οι μετρητές διαφράγματος (orifice) που βασίζονται στον προσδιορισμό της αναπτυσσόμενης διαφορικής πίεσης κατά τη ροή. Παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα υπολογισμού της αβεβαιότητας για συγκεκριμένη μετρητική διάταξη.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με δεδομένο ότι καμία μέτρηση δεν μπορεί να είναι απόλυτα ακριβής, είναι απαραίτητες οι μέθοδοι εκτίμησης της σχετικής ακρίβειας των μετρήσεων. Είναι γενικά παραδεκτό ότι η κατάλληλη έννοια που εκφράζει αυτή την ακρίβεια είναι η *αβεβαιότητα* της μέτρησης και ότι το μέγεθος της προσδιορίζεται με *ανάλυση* αβεβαιότητας [1] [2]. Τονίζεται ότι η αβεβαιότητα μέτρησης δεν σημαίνει το σφάλμα μέτρησης, το οποίο είναι η διαφορά της πραγματικής τιμής του μεγέθους από το αποτέλεσμα της μέτρησης. Επειδή η πραγματική τιμή του μεγέθους είναι άγνωστη, πρακτικά χρησιμοποιείται η λεγόμενη τιμή αναφοράς, που συνοδεύεται από μία αβεβαιότητα. Με τον τρόπο αυτό αντί του σφάλματος μέτρησης αναφέρεται η αβεβαιότητα μέτρησης, η οποία είναι αποτέλεσμα στατιστικής επεξεργασίας.

Η μέτρηση παροχής Φυσικού Αερίου, σε αντίθεση με άλλες μετρήσεις φυσικών μεγεθών, παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα και επιπρόσθετη δυσκολία, του ότι δεν είναι 'απλή' μέτρηση και έτσι δεν υπάρχει απευθείας συσχετισμός των μετρήσεων με διεθνή πρότυπα, που προκύπτει από αδιάσπαστη αλυσίδα συγκρίσεων. Σε κάθε στάδιο της αλυσίδας αυτής είναι απαραίτητη η διακρίβωση του μετρητή με ένα πρότυπο, του οποίου η ποιότητα από μετρολογικής άποψης έχει προσδιοριστεί με διακρίβωση με υψηλότερου επιπέδου πρότυπο. Υπάρχει συνεπώς μία ιεραρχία διακρίβωσης. Για τη μέτρηση απλών μεγεθών (μήκος, χρόνος κλπ.) υπάρχουν σαφή και καθορισμένα πρότυπα αναφοράς. Αντίθετα τα πρότυπα αναφοράς μετρήσεων παροχής είναι στην ουσία διαπιστευμένα εργαστήρια που διαθέτουν σύνθετο

εξοπλισμό και συστήματα οργάνων μέτρησης. Οι δύο βασικές παραδοχές στη μέτρηση παροχής είναι [3]:

- Κανένα μετρητικό σύστημα παροχής δεν μπορεί να παρουσιάζει μικρότερη αβεβαιότητα από τη βέλτιστη ικανότητα μέτρησης του διαπιστευμένου εργαστηρίου που διακρίβωσε το σύστημα αυτό.
- Κανένα μη διακριβωμένο μετρητικό σύστημα παροχής δεν μπορεί να παρουσιάζει μικρότερη αβεβαιότητα από παρόμοιο σύστημα, το οποίο έχει διακριβωθεί από διαπιστευμένο εργαστήριο ροής.

Η δεύτερη περίπτωση αφορά, για παράδειγμα, συστήματα μέτρησης παροχής Φ.Α, τα οποία σύμφωνα με το πρότυπο ISO-5167 [4], μπορούν να χρησιμοποιούν την εξίσωση Stoltz (ή την εξίσωση Reader/Gallacher) για τον υπολογισμό του συντελεστή παροχής, αντί για διακριβωμένο συντελεστή παροχής.

ΠΗΓΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ Φ.Α.

Οι πηγές που εισάγουν αβεβαιότητα στη μέτρηση παροχής Φ.Α. ταξινομούνται στις επόμενες τρεις γενικές κατηγορίες:

- *Πηγές αβεβαιότητας εξωτερικές του μετρητικού συστήματος*

Αφορούν κυρίως τις επιδράσεις του περιβάλλοντος στη μέτρηση (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία), αλλά ακόμα και τη φύση και συμπεριφορά του μετρούμενου μεγέθους (π.χ. διακύμανση).

- *Πηγές αβεβαιότητας εσωτερικές του μετρητικού συστήματος*

Αφορούν την κατασκευή του μετρητικού συστήματος και ειδικότερα τα υλικά και χαρακτηριστικά του μετρητή και των στοιχείων του.

- *Πηγές αβεβαιότητας εξαιτίας υπολογιστικών μεθόδων και μετρολογικών διαδικασιών που χρησιμοποιούνται.*

Αφορούν τις αβεβαιότητες που πιθανώς υπάρχουν στις μαθηματικές σχέσεις μεταξύ των άμεσα μετρούμενων μεγεθών και αυτών που είναι απαραίτητο να υπολογιστούν, καθώς και τις παραδοχές, υπολογιστικές μεθόδους και μετρολογικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται.

Οι παραπάνω κατηγορίες πηγών αβεβαιότητας αποτελούν αντικείμενο έρευνας για τη συνεχή βελτίωση των μετρήσεων και κατ' επέκταση των γνώσεων για τα μετρούμενα μεγέθη.

Στο παρελθόν ήταν συνηθισμένη η διάκριση των πηγών αβεβαιότητας σε πηγές *τυχαίας* και πηγές *συστηματικής* αβεβαιότητας. Τελευταία όμως οι όροι αυτοί τείνουν να μην χρησιμοποιούνται πλέον στις αναλύσεις αβεβαιότητας [3]. Μια πηγή αβεβαιότητας δεν είναι ούτε τυχαία ούτε συστηματική, καθώς η φύση της εξαρτάται από το πλαίσιο στο οποίο το μετρούμενο μέγεθος χρησιμοποιείται στο μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη μέτρηση. Έτσι τους όρους τυχαίο και συστηματικό αντικατέστησαν δύο μέθοδοι εκτίμησης της αβεβαιότητας, η εκτίμηση τύπου A και B. Τύπου A είναι η μέθοδος εκτίμησης της αβεβαιότητας όπου χρησιμοποιείται στατιστική ανάλυση μιας σειράς παρατηρήσεων ή μετρήσεων, ενώ στην τύπου B εκτίμηση η αβεβαιότητα προσδιορίζεται με χρήση άλλων μεθόδων.

Επίσης ένας σημαντικός διαχωρισμός των πηγών αβεβαιότητας είναι η διάκριση σε συσχετιζόμενες και μη συσχετιζόμενες πηγές. Η συσχέτιση αυτή μπορεί να είναι ολική ή μερική και η αντιμετώπιση τέτοιων περιπτώσεων στους υπολογισμούς αβεβαιότητας σύνθετων μετρητικών συστημάτων είναι εξαιρετικά δύσκολη. Για παράδειγμα, οι αβεβαιότητες μέτρησης της εσωτερικής διαμέτρου, d , ενός μετρητή διαφράγματος, της διαμέτρου του μετρητικού σωλήνα στον οποίο τοποθετείται ο μετρητής, της πυκνότητας και του ιξώδους του Φ.Α. συσχετίζονται, αφού για όλες απαιτείται η γνώση της θερμοκρασίας του Φ.Α. που ρέει στον μετρητικό σωλήνα.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ Φ.Α.

Η μέτρηση παροχής Φ.Α. με χρήση μετρητών διαφράγματος (orifice) είναι συνηθισμένη αλλά και σύνθετη μέτρηση, που απαιτεί τον συνδυασμό πλήθους επιμέρους μετρήσεων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, όπου συνδυάζονται επιμέρους μετρήσεις σε μία τελική μέτρηση, χρησιμοποιείται ο όρος *συνδυασμένη* αβεβαιότητα μέτρησης (*combined uncertainty*). Έτσι μετρήσεις πίεσης, P , διαφορικής πίεσης, ΔP , συντελεστή παροχής, C , θερμοκρασίας, T , πυκνότητας, ρ , κ.α. χρησιμοποιούνται σε κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα για τον υπολογισμό της παροχής. Η μαζική παροχή του Φ.Α., q_m , με χρήση μετρητή διαφράγματος δίνεται από τη σχέση [4]:

$$q_m = \frac{C \varepsilon}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \Delta P \rho} \quad (1)$$

Είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι σε περιπτώσεις υπολογισμού της συνδυασμένης αβεβαιότητας δεν είναι αρκετό να γνωρίζουμε την αβεβαιότητα των επιμέρους μετρήσεων, αλλά είναι απαραίτητη και η γνώση της επίδρασης της κάθε μέτρησης στον υπολογισμό της παροχής. Οι επιδράσεις των επιμέρους μετρήσεων εκτιμούνται με τον υπολογισμό των συντελεστών ευαισθησίας (*μερικά διαφορικά*).

Έτσι η Εξίσωση 1 σε γενική μορφή είναι:

$$q_m = f(\Delta P, \rho, C, d, \dots) \quad (2)$$

και το ολικό διαφορικό της δίνει:

$$dq_m = \frac{\partial q_m}{\partial \Delta P} d\Delta P + \frac{\partial q_m}{\partial \rho} d\rho + \dots \quad (3)$$

όπου $d\Delta P$, $d\rho$, ... εκφράζουν τις αντίστοιχες αβεβαιότητες $u(\Delta P)$, $u(\rho)$, των επιμέρους μετρήσεων. Η Εξίσωση 3 (θεωρώντας απόλυτες τιμές για τα μερικά διαφορικά) εκφράζει τη μέγιστη αβεβαιότητα μέτρησης, dq_m , της παροχής. Στην πραγματικότητα η αβεβαιότητα είναι μικρότερη, καθώς θεωρείται ότι οι αβεβαιότητες των επιμέρους μετρήσεων συσχετίζονται απόλυτα μεταξύ τους, γεγονός που ασφαλώς δεν ισχύει. Συνηθέστερα για μη συσχετιζόμενες επιμέρους μετρήσεις, η αβεβαιότητα εκφράζεται ως η τετραγωνική ρίζα των τετραγώνων των αβεβαιοτήτων των επιμέρους μετρήσεων. Πολλές όμως από τις αβεβαιότητες των επιμέρους μετρήσεων μπορεί να συσχετίζονται πολλαπλά. Έτσι για μη γραμμικές εξισώσεις σύνθετων μετρήσεων εμφανίζονται δεύτερης ή τρίτης τάξης μερικά διαφορικά κάνοντας πολύπλοκους τον υπολογισμό, με συνέπεια ο προσδιορισμός των συντελεστών ευαισθησίας να είναι προσεγγιστικός. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί αριθμητικές μέθοδοι για την εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων σε σύνθετα συστήματα, με πιο πρόσφατες τις μεθόδους προσομοιώσεων Monte Carlo [6]. Το σημαντικό πλεονέκτημα των συγκεκριμένων μεθόδων είναι ότι μπορούν να επεξεργαστούν τις περιπτώσεις μερικών ή ολικών συσχετίσεων των αβεβαιοτήτων των επιμέρους μετρήσεων, οι οποίες είναι δύσκολο να επεξεργασθούν με αναλυτικό τρόπο.

Αξίζει να αναφερθεί η περίπτωση προσδιορισμού της παροχής από παράλληλες μετρήσεις με μετρητές διαφράγματος. Η διαφορά στην περίπτωση αυτή είναι ότι η ολική μέτρηση της παροχής δίνεται από το άθροισμα των επιμέρους μετρήσεων σε κάθε μετρητικό σωλήνα και η ολική αβεβαιότητα της παροχής του μετρητικού συστήματος παράλληλων μετρητών υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$u(q_{m\ total}) = \frac{\partial q_{m\ total}}{\partial q_{m1}} u(q_{m1}) + \frac{\partial q_{m\ total}}{\partial q_{m2}} u(q_{m2}) + \dots \quad (4)$$

Στο Πίνακα 1 δίνεται ένα παράδειγμα υπολογισμού της αβεβαιότητας μέτρησης ογκομετρικής παροχής Φ.Α. με έναν μετρητή διαφράγματος, ως προς μεταβλητές εισόδου τη διαφορική πίεση, στατική πίεση και θερμοκρασία. Οι υπολογισμοί στον Πίνακα 1 έγιναν με βάση το πρότυπο EA-4/02 [5], για ορθογωνική κατανομή σφάλματος και 95 % διάστημα εμπιστοσύνης (k=2) της διευρυμένης αβεβαιότητας. Όμοια μπορεί να προσδιοριστεί η επίδραση των υπολοίπων μεταβλητών που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της παροχής στην Εξίσωση 1.

Πίνακας 1. Ισοζύγιο αβεβαιοτήτων στη μέτρηση παροχής Φ.Α. με μετρητή διαφράγματος.

Μέγεθος X_i	Τιμή x_i	Τυπική αβεβαιότητα $u(x_i)$	Συντελεστής ευαισθησίας c_i	Συμμετοχή στην αβεβαιότητα $u_i(y) = u(x_i) c_i $
ΔP , Διαφορική Πίεση	350 mbar	0,289 mbar	282,23 Nm ³ /hr/mbar	81,56 Nm ³ /hr
P, Στατική Πίεση	50 bar	0,046 bar	2128,83 Nm ³ /hr/bar	97,93 Nm ³ /hr
T, Θερμοκρασία	15 °C	0,058 °C	-472,53 Nm ³ /hr/°C	27,41 Nm ³ /hr
Q , Ογκομ. παροχή	197502,93 Nm ³ /hr			130,5 Nm ³ /hr
U, Διευρ. Αβεβαιότητα				261 Nm ³ /hr (ή 0.1 %)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διασφάλιση ποιότητας των μετρήσεων προϋποθέτει τη γνώση της αβεβαιότητας του μετρητικού συστήματος. Ο υπολογισμός της παροχής Φ.Α. με χρήση μετρητών διαφράγματος είναι σύνθετη μέτρηση, για την οποία αναλύθηκαν οι πηγές αβεβαιότητας και παρουσιάστηκε ο τρόπος εκτίμησης της ολικής αβεβαιότητας μέτρησης. Στο παράδειγμα που εξετάστηκε η διευρυμένη αβεβαιότητα μέτρησης ανέρχεται σε 0.1 %. Η τιμή αυτή είναι ενδεικτική αφού εξαρτάται από τις συγκεκριμένες συνθήκες, δεν περιλαμβάνει την επίδραση όλων των μεταβλητών υπολογισμού της παροχής και θεωρεί μη συσχετιζόμενες επιμέρους μετρήσεις. Παρόλα αυτά η χρησιμότητα της μελέτης έγκειται στην παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού, καθώς και στην εξέταση της επίδρασης κάθε μεταβλητής στην ολική αβεβαιότητα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Τσοχατζίδης Ν.Α., Παπαδόπουλος Χ.Ε. και Ν. Νικολάου, *Πρακτικά 3^{ου} Πανελληνίου Επιστημονικού Συνεδρίου Χημ. Μηχανικής*, Αθήνα (2001), σελ. 917-920.
- [2] Keyser, D.R., *Journal of Fluids Engineering* **120**: 19 (1998).
- [3] Papadopoulos Ch.E., *Uncertainty analysis in the management of gas metering systems*, PhD Thesis, Cranfield University, U.K. (2000).
- [4] ISO Standard 5167-1, *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices* (1991).
- [5] EA-4 / 02, *Expression of the uncertainty of measurement in calibration* (1999).
- [6] Papadopoulos C.E. and Yeung, H., *Flow Measurement and Instrumentation Journal* **12**: 291 (2001).