

## 5 Μετρητές παροχής

### 5.1 Εισαγωγή

Τρεις βασικές συσκευές, με τις οποίες μπορεί να γίνει η μέτρηση της ογκομετρικής παροχής των ρευστών, είναι

- § ο μετρητής Venturi (ή **βεντουρίμετρο**),
- § ο μετρητής διαφράγματος (ή **διάφραγμα**), και
- § το ροτάμετρο (ή **ροόμετρο** με πλωτήρα).

Και οι τρεις αυτοί μετρητές βασίζονται στην ίδια φυσική αρχή: η πραγματική διατομή της ροής περιορίζεται με μηχανικό τρόπο, έτσι ώστε - με βάση την εξίσωση της συνέχειας του ρευστού - η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται. Η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε πτώση της πίεσης σύμφωνα με την εξίσωση του Bernoulli. Αυτή η πτώση πίεσης μετράται στο βεντουρίμετρο και στο διάφραγμα και με βάση αυτή εκτιμάται η ογκομετρική παροχή. Αντίθετα στο ροτάμετρο, το οποίο περιλαμβάνει κινούμενα μέρη, είναι η θέση της ελάχιστης διατομής η οποία μετράται και συνδέεται με την παροχή του ρευστού.

Η θέση κατά μήκος της ροής στην οποία η ουσιαστική διατομή της ροής είναι ελάχιστη λέγεται *vena contracta*. Η ακρίβεια της μέτρησης είναι παρόμοια και για τις τρεις συσκευές και η επιλογή της καταλληλότερης από αυτές για κάθε εφαρμογή καθορίζεται από άλλους παράγοντες:

- § Το **βεντουρίμετρο** συνήθως χρησιμοποιείται για υγρά, είναι δυσκολότερο στην κατασκευή και στην τοποθέτηση του, έχει υψηλό κόστος, καταλαμβάνει μεγάλο μήκος, έχει σχετικά μικρή περιοχή μέτρησης και παρουσιάζει σχετικά μικρές απώλειες λόγω τριβών,
- § το **διάφραγμα** είναι απλό στην κατασκευή και την τοποθέτηση του, έχει μεγάλη περιοχή μέτρησης αλλά παρουσιάζει μεγάλες απώλειες λόγω τριβών,
- § το **ροτάμετρο** έχει πολύ μικρές απώλειες λόγω τριβών, αλλά δίνει άμεσα την παροχή μόνο σε περιορισμένες περιοχές μέτρησης.

Καμπύλη αναφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το βεντουρίμετρο και το διάφραγμα μόνο εφόσον πριν και μετά τη συσκευή μέτρησης υπάρχει αρκετό μήκος σωλήνα ώστε να έχουμε πλήρως ανεπτυγμένη κατανομή της ταχύτητας του ρευστού στη διατομή του αγωγού. Για το ροτάμετρο η καμπύλη αναφοράς είναι ανεξάρτητη από τα τμήματα ευθύγραμμου αγωγού πριν και μετά τη συσκευή μέτρησης.

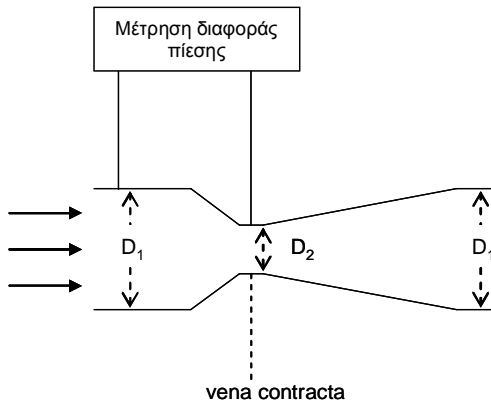
Στη συνέχεια θα περιγραφούν πρώτα το βεντουρίμετρο και το διάφραγμα, τα οποία μοιάζουν αρκετά μεταξύ τους, και έπειτα το ροτάμετρο.

### 5.2 Βεντουρίμετρο και Διάφραγμα

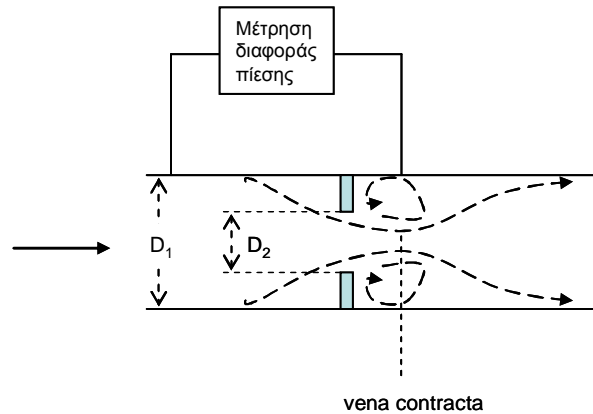
Το βεντουρίμετρο και το διάφραγμα, τα οποία φαίνονται στα Σχήματα 5.1 και 5.2 αντίστοιχα, μετράνε την παροχή μέσω της μέτρησης της πτώσης πίεσης μεταξύ εισόδου και *vena contracta*. Οι συσκευές αποτελούνται από τμήματα ευθύγραμμου σωλήνα, που προσαρμόζουμε στο μέρος του αγωγού στον οποίο θέλουμε να γίνει η μέτρηση. Το ρευστό θα πρέπει να φτάνει στη συσκευή με πλήρως ανεπτυγμένο προφίλ ταχύτητας και γι' αυτό χρειάζεται αρκετό μήκος ευθύγραμμου αγωγού προ και μετά της συσκευής.

Κατά τη διέλευση του ρευστού από τη συσκευή η διατομή της συσκευής στενεύει βαθμιαία για το βεντουρίμετρο (Σχήμα 5.1) και απότομα για το διάφραγμα (Σχήμα 5.2). Η

βαθμιαία στένωση στο βεντουρίμετρο έχει σαν αποτέλεσμα οι ροϊκές γραμμές να ακολουθούν το σχήμα της συσκευής και να αποφεύγεται η δημιουργία στροβίλων. Η *vena contracta* σχηματίζεται στο σημείο της φυσικής στένωσης του βεντουρίμετρου. Στο διάφραγμα η απότομη στένωση έχει σαν αποτέλεσμα την αποκόλληση του κύριου ρεύματος του ρευστού από τα τοιχώματα του αγωγού μετά τη στένωση (λόγω αδράνειας) και τη δημιουργία στροβίλων ανακυκλοφορίας.



**ΣΧΗΜΑ 5.1.** Σχηματική αναπαράσταση του βεντουρίμετρου.



**ΣΧΗΜΑ 5.2.** Σχηματική αναπαράσταση του διαφράγματος και της ροής του ρευστού μέσα από αυτό.

Η *vena contracta* δεν σχηματίζεται στη φυσική στένωση αλλά λίγο παρακάτω από αυτή. Κατά μήκος των δύο συσκευών όσο πλησιάζει η ροή στη στένωση, η ταχύτητα αυξάνεται βάσει της διατήρησης της μάζας του ρευστού οπότε η πίεση μειώνεται βάσει της εξίσωσης Bernoulli (ισοζύγιο μηχανικής ενέργειας). Η πίεση γίνεται ελάχιστη στη *vena contracta*. Η διαφορά πίεσης μεταξύ της ελεύθερης ροής στον αγωγό και της *vena contracta* (φυσική στένωση για το βεντουρίμετρο, κατ' εκτίμηση μετά την φυσική στένωση για το διάφραγμα) είναι το μέγεθος που μετράται άμεσα στις δύο συσκευές με τη βοήθεια μανομέτρου. Καθώς η ροή απομακρύνεται από τη στένωση η ταχύτητα μειώνεται και η πίεση αυξάνει. Η αρχική πίεση όμως δεν ανακτάται λόγω των μη αντιστρεπτών απωλειών σε τριβές. Η τελική απώλεια πίεσης είναι πολύ μεγαλύτερη στο διάφραγμα (εξαιτίας της δημιουργίας στροβίλων) από ότι στο βεντουρίμετρο.

Για να συνδέσουμε τη μετρούμενη διαφορά πίεσης στα σημεία 1 και 2 των δύο συσκευών στα Σχήματα 5.1 και 5.2 πρώτα χρησιμοποιούμε το ισοζύγιο μάζας μεταξύ των δύο σημείων:

$$Q = \frac{1}{4} \pi D_1^2 V_{1,ave} = \frac{1}{4} \pi D_2^2 V_{2,ave} \tag{5.1}$$

όπου Q είναι η ογκομετρική παροχή του ρευστού και  $D_1, D_2, V_{1,ave}, V_{2,ave}$  είναι οι διάμετροι και οι μέσες ταχύτητες στις διατομές ροής για τα σημεία 1 και 2 αντίστοιχα. Η εξίσωση του Bernoulli ανάμεσα στα σημεία 1 και 2, για οριζόντια συσκευή δίνει:

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_{2,ave}^2}{2\alpha_2} - \frac{V_{1,ave}^2}{2\alpha_1} + W = 0 \tag{5.2}$$

Όπου  $P_1, P_2$  είναι οι πιέσεις στα σημεία 1 και 2 αντίστοιχα και  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού στον αγωγό. Το  $W$  είναι ο ρυθμός απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μάζας λόγω τριβών και τα  $\alpha_1, \alpha_2$  οι συντελεστές διόρθωσης της κινητικής ενέργειας στα σημεία 1 και 2. Όπως φαίνεται από την εξίσωση (4.9) της Άσκησης 4, οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται από τις κατανομές της ταχύτητας στις αντίστοιχες διατομές. Οι κατανομές αυτές όμως είναι άγνωστες. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (5.1) και (5.2) βρίσκουμε για την ογκομετρική παροχή του ρευστού:

$$Q = \frac{\pi D_2^2}{4} \left( \frac{2(P_1 - P_2) / \rho - W}{\frac{1}{\alpha_2} - \frac{D_2^4}{D_1^4 \alpha_1}} \right)^{1/2} \quad (5.3)$$

Στην παραπάνω εξίσωση τόσο οι απώλειες λόγω τριβής  $W$  όσο και οι συντελεστές διόρθωσης της κινητικής ενέργειας  $\alpha_1, \alpha_2$  είναι άγνωστοι. Για να συνδυάσουμε όλους τους αγνώστους σε έναν ορίζουμε την ιδανική παροχή  $Q_i$ , η οποία είναι η παροχή που αντιστοιχεί στην μέτρηση μας εάν οι απώλειες ήταν μηδενικές ( $W = 0$ ) και οι συντελεστές διόρθωσης ίσοι με μονάδα ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ ), δηλαδή:

$$Q_i = \frac{\pi D_2^2}{4} \left( \frac{2(P_1 - P_2) / \rho}{1 - \frac{D_2^4}{D_1^4}} \right)^{1/2} \quad (5.4)$$

Η πραγματική παροχή συνδέεται με την ιδανική μέσω του συντελεστή εκροής  $C$ :

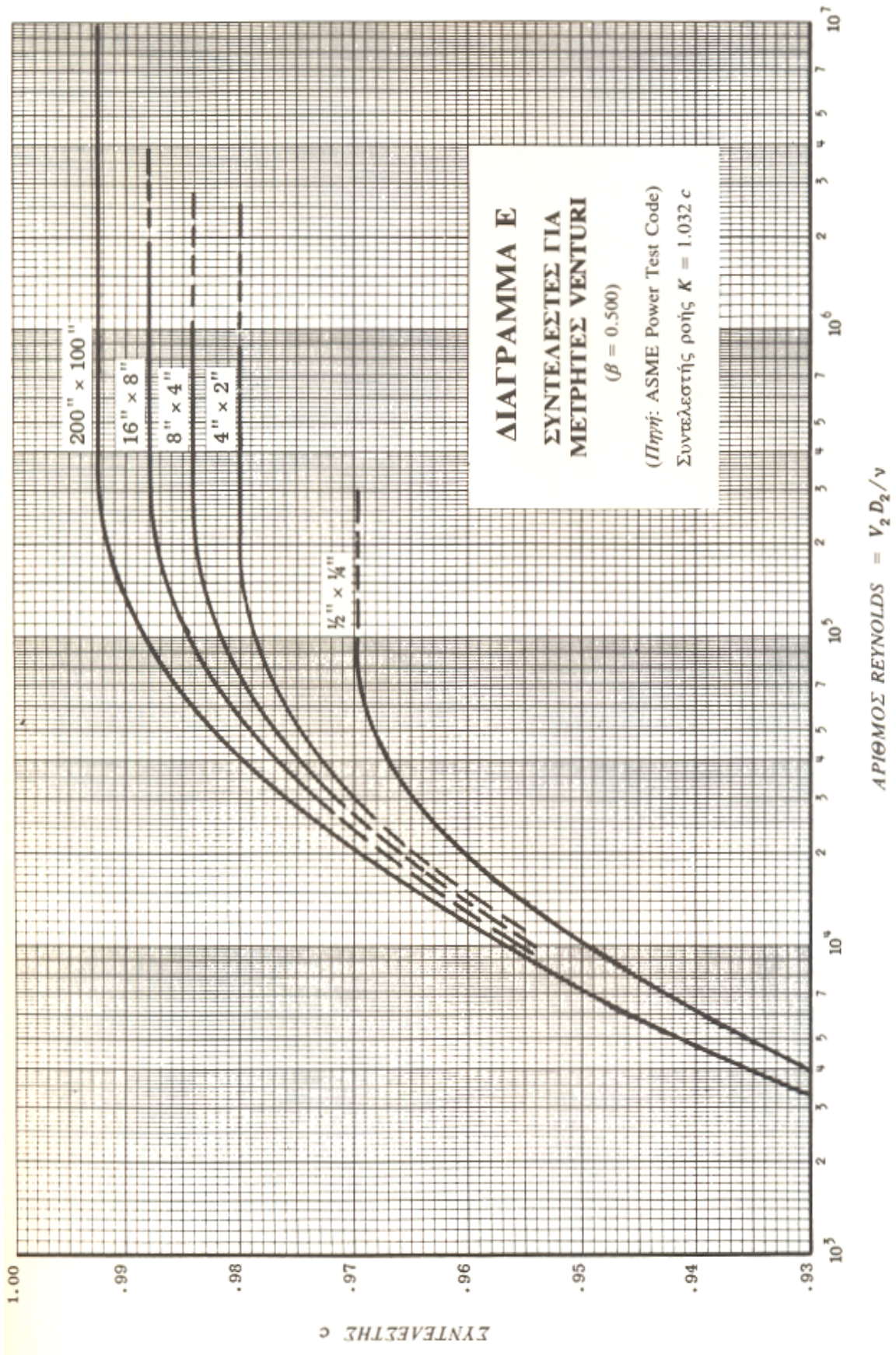
$$Q = C Q_i \quad (5.5)$$

Ο συντελεστής  $C$  εξαρτάται

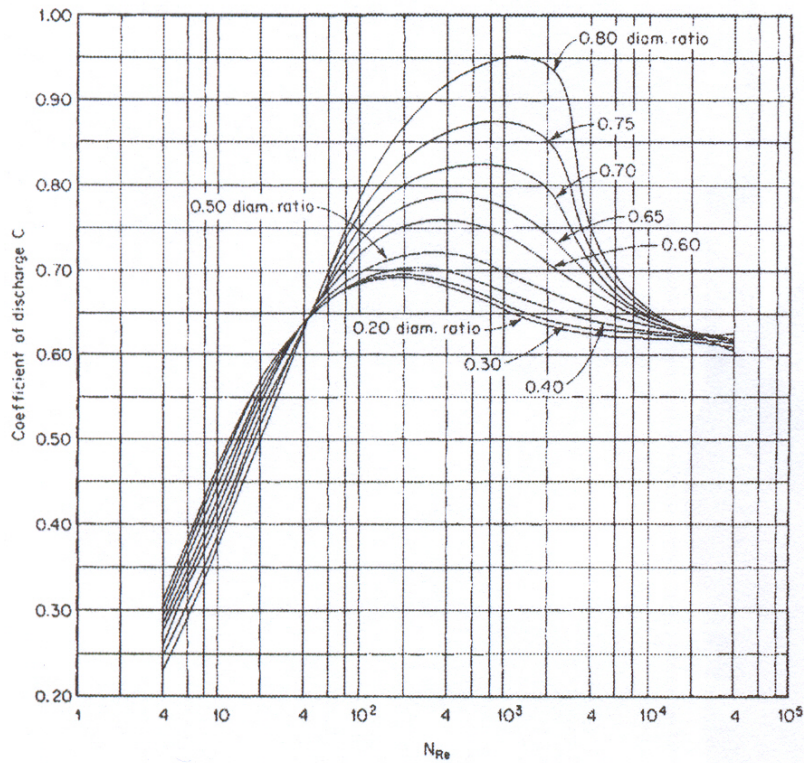
- (i) από τη γεωμετρία της συσκευής
- (ii) από τον λόγο των διαμέτρων  $\beta = D_2/D_1$ , και
- (iii) από τον αριθμό Reynolds  $N_{Re}$ .

Ο κατάλληλος τρόπος χρήσης της συσκευής μέτρησης είναι η κατασκευή πειραματικής καμπύλης του συντελεστή εκροής  $C$  συναρτήσεως του  $N_{Re}$ . Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αντίστοιχη καμπύλη που δίνεται από τον κατασκευαστή (αν υπάρχει). Τέλος υπάρχουν στην βιβλιογραφία διαγράμματα  $C$  ως προς  $N_{Re}$  για συγκεκριμένες γεωμετρίες συσκευών. Τα διαγράμματα αυτά είναι καλό να μην χρησιμοποιούνται άμεσα αλλά μόνο για συγκρίσεις. Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται ο συντελεστής εκροής για έναν τύπο βεντουρίμετρου ( $\beta = 0.5$ , διάφορα μεγέθη σωλήνα) και στο Σχήμα 5.4 για έναν τύπο διαφράγματος (διάφορες τιμές του  $\beta$ , για όλα τα μεγέθη σωλήνα). Και στα δύο διαγράμματα ο  $N_{Re}$  στον οριζόντιο άξονα ορίζεται στη στένωση της συσκευής.

Χρειάζεται προσοχή στην ανάγνωση των διαγραμμάτων  $C$  ως προς  $N_{Re}$ . Χρησιμοποιώντας το  $Q_i$  πρώτα βρίσκουμε έναν ιδανικό  $N_{Rei}$  και βρίσκουμε από το διάγραμμα τον συντελεστή  $C_i$ . Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον διορθωμένο  $N_{Re} = C_i N_{Rei}$  και βρίσκουμε από το διάγραμμα το συντελεστή  $C$ . Κανονικά η επαναληπτική διαδικασία πρέπει να συνεχιστεί μέχρι να υπάρξει σύγκλιση αλλά στην πράξη έχει φανεί ότι μια επανάληψη είναι αρκετή.



ΣΧΗΜΑ 5.3. Συντελεστής εκροής C για βεντουριμέτρο με β = 0.5. Ο NRe ορίζεται στη στένωση.



**ΣΧΗΜΑ 5.4.** Συντελεστής εκροής C Διαφράγματος για διάφορες τιμές του β. Ο  $N_{Re}$  ορίζεται στη στένωση.

Από τα Σχήματα 5.3 και 5.4 φαίνεται ότι ο συντελεστής εκροής τείνει να γίνει ανεξάρτητος του  $N_{Re}$  για μεγάλες τιμές του  $N_{Re}$ . Το γεγονός ότι είναι σημαντικά μικρότερος για το διάφραγμα από ότι για το βεντουρίμετρο επιβεβαιώνει το ότι οι απώλειες πίεσης είναι μεγαλύτερες στο διάφραγμα.

**Πίνακας 5.1.** Απαιτούμενα μήκη ευθύγραμμου αγωγού για πλήρως ανεπτυγμένη ροή για το **διάφραγμα** και το **βεντουρίμετρο**.

$\beta(=D_2/D_1)$	Διάφραγμα		Βεντουρίμετρο
	Πριν	Μετά	Πριν
0.2	$2D_1$	$8D_1$	-
0.4	$2.7D_1$	$8.5D_1$	$2D_1$
0.6	$3.4D_1$	$10.4D_1$	$3D_1$
0.8	$4D_1$	$15D_1$	$6D_1$

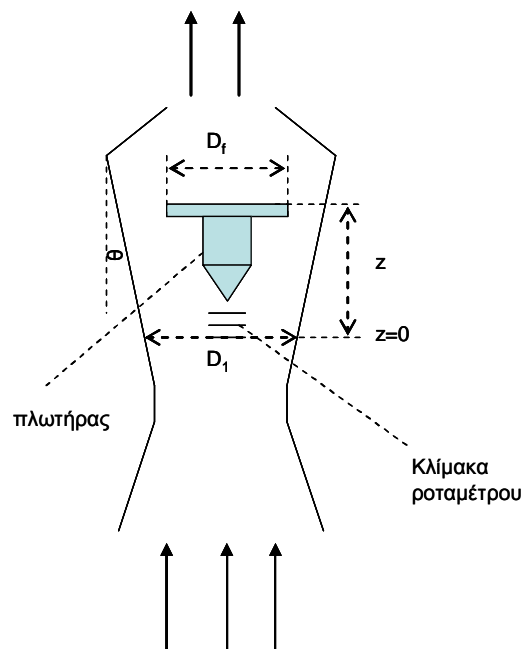
Τα διαγράμματα για τον συντελεστή εκροής ισχύουν μόνο στην περίπτωση που πριν και μετά τον μετρητή υπάρχουν ικανά μήκη ευθύγραμμου αγωγού ώστε η ροή να είναι πλήρως ανεπτυγμένη. Ο Πίνακας 5.1 δείχνει τα απαιτούμενα μήκη ευθύγραμμου αγωγού πριν και μετά το διάφραγμα και πριν το βεντουρίμετρο. Το μήκος που απαιτείται μετά το βεντουρίμετρο είναι γενικά μικρότερο από αυτό που απαιτείται πριν.

### 5.3 Ροτάμετρο

Αντίθετα με το βεντουρίμετρο και το διάφραγμα, όπου μετράται η πτώση πίεσης για σταθερή στένωση, στο **ροτάμετρο** μετράται το μέγεθος της (μεταβλητής) στένωσης για σταθερή πτώση πίεσης (Σχήμα 5.5). Το μετρούμενο μέγεθος της στένωσης συσχετίζεται με την ογκομετρική παροχή του ρευστού.

Το ροτάμετρο αποτελείται από ένα γυάλινο σωλήνα, του οποίου η διάμετρος αυξάνεται βαθμιαία. Ο σωλήνας είναι στερεωμένος κατακόρυφα σε ένα πλαίσιο με το ευρύτερο άκρο του προς τα επάνω. Το ρευστό ρέει μέσα στον σωλήνα προς τα πάνω και υποχρεώνει ένα πλωτήρα να αιωρείται ελεύθερα μέσα στην μάζα του ρευστού. Ο πλωτήρας χρησιμεύει σαν εξάρτημα ένδειξης της παροχής, και όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα ροής του ρευστού τόσο πιο ψηλά ανυψώνεται ο πλωτήρας μέσα στον σωλήνα.

Ολόκληρη η μάζα του ρευστού πρέπει να περάσει μέσα από τον δακτυλιοειδή χώρο που υπάρχει μεταξύ του πλωτήρα και του τοιχώματος του γυάλινου σωλήνα. Ο σωλήνας φέρει υποδιαίρεσεις και η ανάγνωση του ροταμέτρου γίνεται από την κλίμακα ανάγνωσης στο σημείο που φτάνει η επάνω επιφάνεια του πλωτήρα μέσα στον σωλήνα.



ΣΧΗΜΑ 5.5 Σχηματική αναπαράσταση Ροταμέτρου.

Το ροτάμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της ροής αερίων και υγρών. Ο πλωτήρας μπορεί να κατασκευασθεί από μέταλλα κάθε πυκνότητας από μόλυβδο μέχρι αλουμίνιο ή ακόμα από γυαλί και πλαστικό. Το πιο συνηθισμένο υλικό κατασκευής του είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας.

Για δεδομένη ταχύτητα ροής, όταν ο πλωτήρας βρίσκεται σε ισορροπία, τρεις δυνάμεις ενεργούν επάνω του:

- (i) το βάρος του
- (ii) η άνωση
- (iii) η δύναμη, που του ασκεί το κινούμενο ρευστό.

Μια εκτεταμένη ανάλυση του ισοζυγίου δυνάμεων κατά την ισορροπία, σε συνδυασμό με

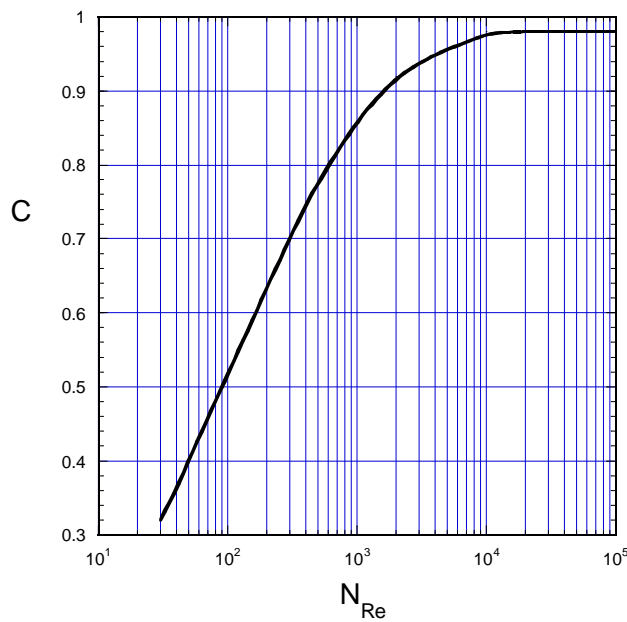
κάποιες βασικές παραδοχές, όπως οι αμελητέες τριβές και τα ομοιόμορφα προφίλ ταχύτητας στις διατομές της ροής, οδηγούν στην παρακάτω σχέση για την εκτίμηση της ιδανικής (θεωρητικής) παροχής:

$$Q_i = \left( \frac{1}{4} \pi (D_1 + 2z\theta)^2 - \frac{1}{4} \pi D_f^2 \right) \left( \frac{8gm_f (1/\rho - 1/\rho_f)}{\pi D_f^2} \right)^{1/2} \quad (5.6)$$

Στην παραπάνω σχέση  $D_1$  είναι η διάμετρος της διατομής ροής στο σημείο  $z = 0$  της κλίμακας του ροταμέτρου,  $D_f$ ,  $m_f$  και  $\rho_f$  είναι η διάμετρος, η μάζα και η πυκνότητα του πλωτήρα αντίστοιχα,  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού,  $\theta$  η γωνία απόκλισης του τοιχώματος του ροταμέτρου (σε ακτίνια) και  $z$  το σημείο στο οποίο βρίσκεται ο πλωτήρας (ένδειξη ροταμέτρου).

Η πραγματική ροή  $Q$  μέσα από το ροτάμετρο συνδέεται με την ιδανική ροή χρησιμοποιώντας τον συντελεστή εκροής  $C$ :

$$Q = CQ_i$$

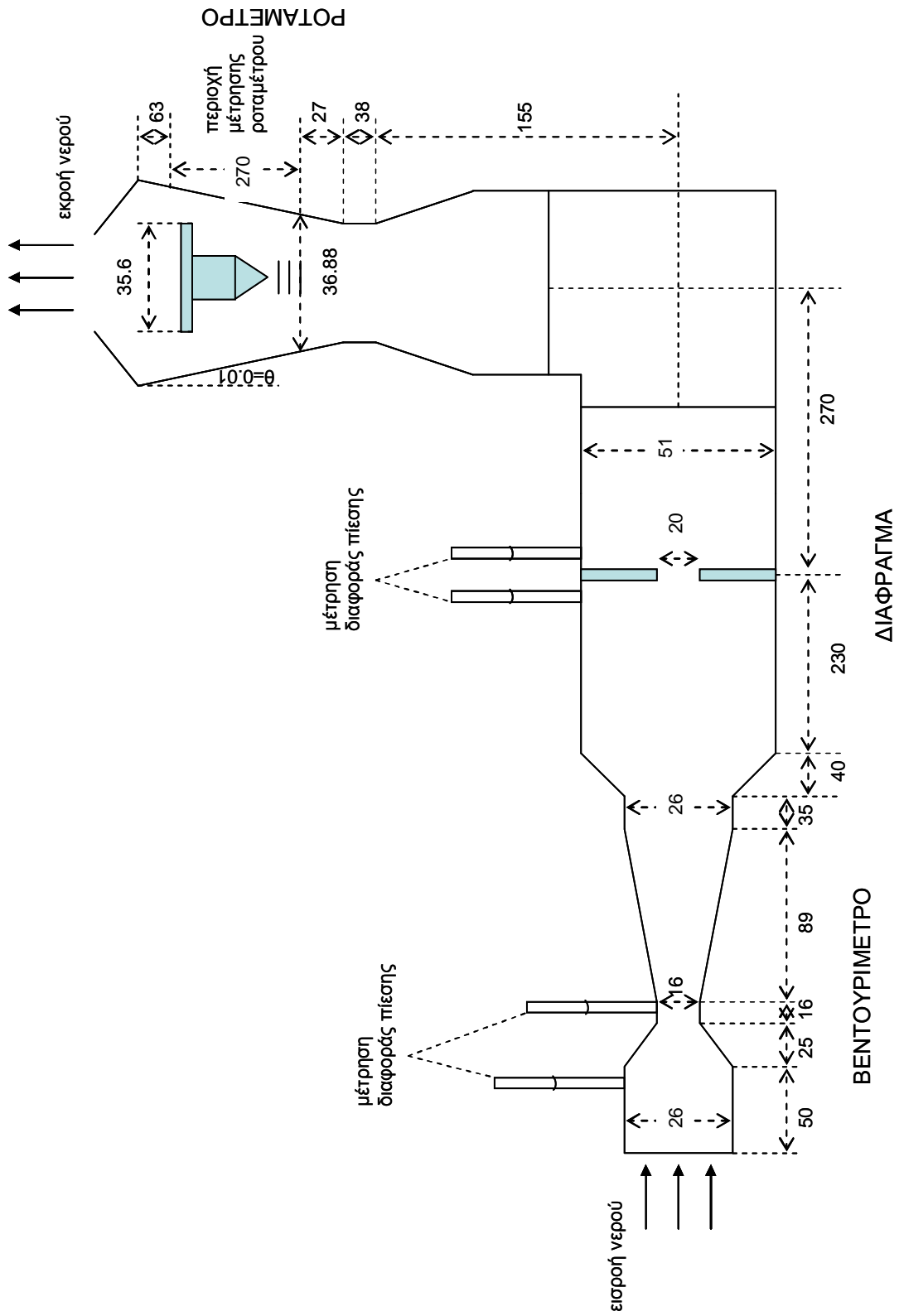


**ΣΧΗΜΑ 5.6.** Συντελεστής εκροής  $C$  Ροταμέτρου με τον τύπο πλωτήρα των συσκευών του εργαστηρίου συναρτήσει του  $N_{Re}$  που ορίζεται από την εξίσωση (5.7).

Για τον υπολογισμό του  $C$  ισχύουν όσα ειπώθηκαν για τους συντελεστές εκροής των άλλων συσκευών μέτρησης. Η μόνη διαφορά είναι ότι ο αριθμός  $N_{Re}$  για την καμπύλη  $C$  ως προς  $N_{Re}$  ορίζεται ως

$$N_{Re} = \frac{4Q\rho}{\pi(D_1 + 2z\theta + D_f)\mu} \quad (5.7)$$

όπου  $\mu$  το ιξώδες του ρευστού. Ο συντελεστής εκροής εξαρτάται από τον τύπο του πλωτήρα.



ΣΧΗΜΑ 5.7. Σχηματική αναπαράσταση της συσκευής του εργαστηρίου. Οι διαστάσεις είναι γραμμένες σε χιλιοστά.



Το Σχήμα 5.6 δείχνει τον συντελεστή εκροής για τον πλωτήρα που έχουμε στην παρούσα άσκηση συναρτήσει του  $N_{Re}$ . Είναι αξιοπρόσεκτο ότι για μεγάλους αριθμούς  $N_{Re}$  ο  $C$  είναι σταθερός, πράγμα που σημαίνει βάσει της εξίσωσης (5.6) ότι η σχέση  $Q-z$  είναι γραμμική. Αυτή η γραμμικότητα χάνεται στους μικρότερους  $N_{Re}$  (μικρές παροχές) όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.6.

Το Σχήμα 5.6 χρησιμοποιείται όπως και τα αντίστοιχα για τους άλλους μετρητές. Πρώτα υπολογίζεται η ιδανική παροχή  $Q_i$  από την εξίσωση (5.6), μετά ο αντίστοιχος  $N_{Rei}$  (από την εξίσωση (5.7) με  $Q = Q_i$ ). Στη συνέχεια, από το Σχήμα 5.6 βρίσκεται ο συντελεστής  $C_i$ . Ο διορθωμένος  $N_{Re} = C_i N_{Rei}$  υπολογίζεται και ξαναχρησιμοποιώντας το Σχήμα 5.6 βρίσκεται ο συντελεστής εκροής  $C$ .

#### 5.4 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα κλειστό κύκλωμα κυκλοφορίας νερού με τη βοήθεια μιας αντλίας. Το νερό διέρχεται πρώτα μέσα από ένα βεντουρίμετρο, μετά από ένα διάφραγμα και τέλος από ένα ροτάμετρο. Χρησιμοποιώντας κατάλληλα την βάνα του συστήματος μπορούμε να τροποποιήσουμε την παροχή του νερού. Υπάρχουν επίσης μανόμετρα νερού-αέρα για την εύρεση της πτώσης πίεσης στο βεντουρίμετρο και στο διάφραγμα.

Η πειραματική συσκευή παρουσιάζεται σχηματικά (όχι σε κλίμακα) στο Σχήμα 5.7, όπου φαίνονται και όλες οι διαστάσεις της. Η μάζα του πλωτήρα είναι  $m_f = 0.1083 \text{ kg}$  και η πυκνότητα του  $\rho_f = 7470 \text{ kg m}^{-3}$ .

#### 5.5 Πειραματική διαδικασία

Για έναν αριθμό διαφορετικών παροχών, ο οποίος καθορίζεται από τον υπεύθυνο της άσκησης, μετريέται η πτώση πίεσης στο βεντουρίμετρο και στο διάφραγμα και καταγράφεται η ένδειξη της θέσης του πλωτήρα στο ροτάμετρο.

Η παροχή μετريέται μέσω της μέτρησης του βάρους του νερού που συλλέγεται κάθε φορά για ορισμένο χρονικό διάστημα από την εκροή του συστήματος.

Τα αποτελέσματα καταγράφονται σε τέσσερις στήλες (ογκομετρική παροχή νερού - ένδειξη μανομέτρου βεντουρίμετρου - ένδειξη μανομέτρου διαφράγματος - ένδειξη ύψους πλωτήρα ροταμέτρου).

#### 5.6 Λυμένο παράδειγμα

Σε μία μέτρηση που το βάρος του δοχείου εκροής μεταβάλλεται κατά  $2.5 \text{ kg}$  σε  $10$  δευτερόλεπτα (μαζική παροχή  $\dot{m} = 0.25 \text{ kg/s}$ ) τα μανόμετρα του νερού δείχνουν διαφορά στάθμης  $80 \text{ mm}$  για το βεντουρίμετρο και  $100 \text{ mm}$  για το διάφραγμα.

Η ένδειξη του ροταμέτρου είναι στα  $12 \text{ cm}$ .

Η θερμοκρασία του νερού μετρήθηκε ότι είναι  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Η επεξεργασία των παραπάνω μετρήσεων θα πρέπει να είναι η εξής (όλοι οι υπολογισμοί γίνονται σε μονάδες SI).

§ Πρώτα υπολογίζονται τα  $Q_i$ ,  $C$  και  $N_{Re}$  για κάθε συσκευή.

§ Η πυκνότητα του νερού θεωρείται ανεξάρτητη από την θερμοκρασία ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) ενώ το ιξώδες του βρίσκεται για την θερμοκρασία του πειράματος από τον αντίστοιχο

πίνακα της Άσκησης 4.

§ Η πραγματική παροχή είναι

$$Q = \frac{1}{\rho} = 0.25 / 1000 = 0.00025 \text{ m}^3 / \text{s} .$$

### Βεντουρίμετρο

Πτώση πίεσης

$$P_1 - P_2 = \rho g h_L = 1000 \cdot 9.81 \cdot 0.08 = 784.8 \text{ Pa}$$

Ιδανική παροχή (εξίσωση 5.3)

$$Q_i = \frac{\pi D_2^2}{4} \left( \frac{2(P_1 - P_2) / \rho}{1 - \frac{D_2^4}{D_1^4}} \right)^{1/2} = \frac{3.14 \cdot 0.016^2}{4} \left( \frac{2 \cdot 784.8}{1000 \cdot (1 - (0.016 / 0.026)^4)} \right)^{1/2} = 0.000272 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Συντελεστής εκροής

$$C = \frac{Q}{Q_i} = \frac{0.00025}{0.000272} = 0.919$$

Αριθμός Reynolds

$$N_{Re} = \frac{V_{ave} \rho D_2}{\mu} = \frac{4Q\rho}{\pi D_2 \mu} = \frac{4 \cdot 0.00025 \cdot 1000}{3.14 \cdot 0.016 \cdot 0.854 \cdot 10^{-3}} = 23304$$

### Διάφραγμα

Πτώση πίεσης

$$P_1 - P_2 = \rho g h_L = 1000 \cdot 9.81 \cdot 0.1 = 981 \text{ Pa}$$

Ιδανική παροχή (εξίσωση (5.3):

$$Q_i = \frac{\pi D_2^2}{4} \left( \frac{2(P_1 - P_2) / \rho}{1 - \frac{D_2^4}{D_1^4}} \right)^{1/2} = \frac{3.14 \cdot 0.020^2}{4} \left( \frac{2 \cdot 981}{1000 \cdot (1 - (0.020 / 0.051)^4)} \right)^{1/2} = 0.000445 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Συντελεστής εκροής

$$C = \frac{Q}{Q_i} = \frac{0.00025}{0.000445} = 0.561$$

Αριθμός Reynolds

$$N_{Re} = \frac{V_{ave} \rho D_2}{\mu} = \frac{4Q\rho}{\pi D_2 \mu} = \frac{4 \cdot 0.00025 \cdot 1000}{3.14 \cdot 0.020 \cdot 0.854 \cdot 10^{-3}} = 18644$$

**Ροτάμετρο**

Ιδανική παροχή (εξίσωση (5.6))

$$Q_i = \left( \frac{1}{4} \pi (D_1 + 2z\theta)^2 - \frac{1}{4} \pi D_f^2 \right) \left( \frac{8g m_f (1/\rho - 1/\rho_f)}{\pi D_f^2} \right)^{1/2} =$$

$$= \left[ \frac{3.14}{4} (0.03688 + 2 \cdot 0.12 \cdot 0.01)^2 - \frac{3.14}{4} 0.0356^2 \right] \times$$

$$\times \left[ \frac{8 \cdot 9.81 \cdot 0.1083 \cdot (1/1000 - 1/7470)}{3.14 \cdot 0.0356^2} \right]^{1/2} = 0.000294 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Συντελεστής εκροής

$$C = \frac{Q}{Q_i} = \frac{0.00025}{0.000294} = 0.85$$

Αριθμός Reynolds (εξίσωση (5.7))

$$N_{Re} = \frac{4Q\rho}{\pi (D_1 + 2z\theta + D_f) \mu} = \frac{4 \cdot 0.00025 \cdot 1000}{3.14 \cdot (0.03688 + 2 \cdot 0.12 \cdot 0.01 + 0.0356) \cdot 0.854 \cdot 10^{-3}} = 4980$$

### 5.7 Απαιτούμενα άσκησης

1. Υπολογίζονται τα  $Q_i$ ,  $C$ ,  $N_{Re}$  για τις τρεις συσκευές μέτρησης της παροχής για όλες τις πειραματικές παροχές  $Q$  και παρουσιάζονται μαζί με το  $Q$  σε μορφή πίνακα.
2. Τα ζεύγη  $C$ ,  $N_{Re}$  για κάθε συσκευή μέτρησης (και για όλες τις παροχές) σημειώνονται σε φωτοτυπία του διαγράμματος που αντιστοιχεί σε κάθε συσκευή (Σχήμα 5.3 για το βεντουρίμετρο, Σχήμα 5.4 για το διάφραγμα, Σχήμα 5.6 για το ροτάμετρο). Να συγκριθούν οι πειραματικές τιμές με αυτές της βιβλιογραφίας και να εξηγηθούν οι αποκλίσεις.
3. Να κατασκευαστούν οι καμπύλες (αναφοράς) πειραματικής παροχής  $Q$  ως προς πτώση πίεσης για το βεντουρίμετρο και το διάφραγμα και ως προς την ένδειξη θέσης του πλωτήρα  $z$  για το ροτάμετρο.
4. Να εκτιμηθεί με χρήση του Πίνακα 5.1 το μήκος του ευθύγραμμου αγωγού που απαιτείται για την χρήση των μετρητών παροχής που χρησιμοποιούνται στην παρούσα άσκηση. Ικανοποιείται η απαίτηση για πλήρως ανεπτυγμένη ροή στους μετρητές, από τη συσκευή του εργαστηρίου;