

Συντελεστής Τραχύτητας των Κυκλικών Αγωγών Υπονόμων

Ι. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΥ

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Δ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Μηχανολόγος Μηχανικός, B.Sc.,
M.Sc. Imperial College

Περίληψη

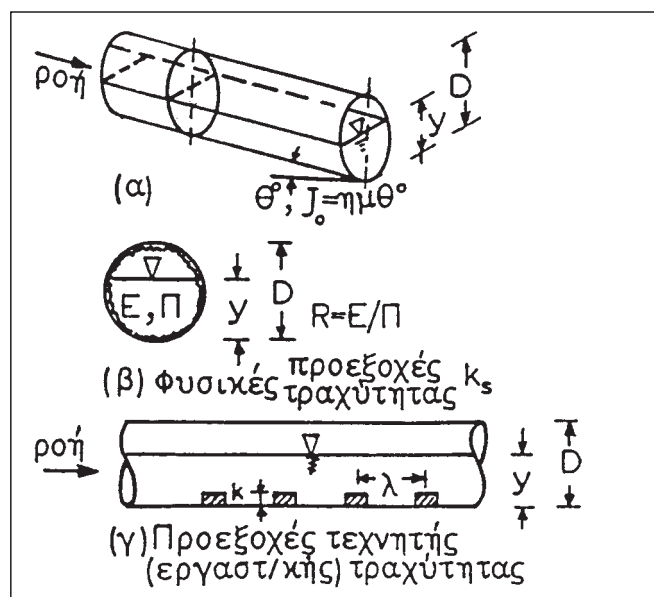
Για τον ορθότερο σχεδιασμό των κυκλικών αγωγών υπονόμων με ελεύθερη επιφάνεια νερού είναι απαραίτητη η γνώση της μεταβολής του συντελεστή τραχύτητας του Manning ανάλογα με τα διάφορα βάθη ροής. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται μεθοδικές μετρήσεις του συντελεστή τραχύτητας τόσο για λείους όσο και για τραχείς αγωγούς υπονόμων, σε αρκετά ευρέα πεδία μεταβολής των διαφόρων παραμέτρων. Παρουσιάζονται κατάλληλες εξισώσεις για τους υπολογισμούς, τα δε αποτελέσματα είναι συστηματικά και, πιστεύεται, χρήσιμα για τις πρακτικές εφαρμογές.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στους κυκλικούς αγωγούς (D) υπονόμων ομοιόμορφης ροής ($J_0 = J_E$) με ελεύθερη επιφάνεια (σχήμα 1, α) είναι γνωστό από παλιότερες μετρήσεις ότι ο συντελεστής τραχύτητας n του Manning δεν είναι σταθερός στα διάφορα βάθη ροής y , παρ' όλο που οι προεξοχές τραχύτητας του αγωγού είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλη την εσωτερική επιφάνεια αυτού.

Η ακριβής μέση τιμή του n , από $y=0$ έως τη στάθμη νερού y , έχει ιδιαίτερη σημασία στο σχεδιασμό των υπονόμων κυκλικής διατομής, κυρίως σε σύγκριση προς μια σταθερή τιμή του συντελεστή τραχύτητας (συντελεστής αναφοράς).

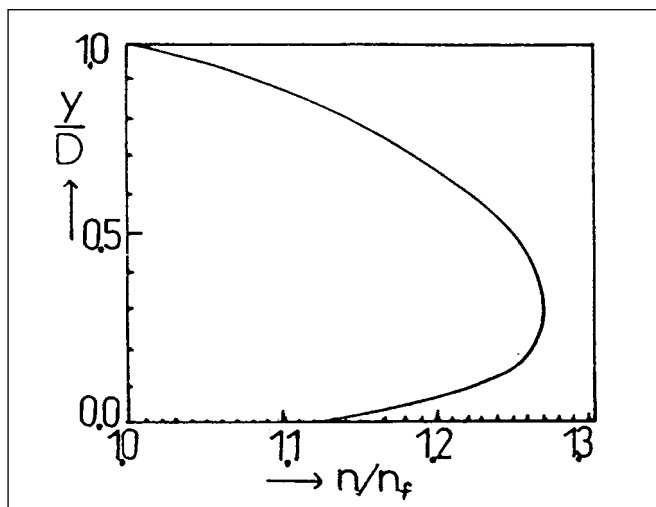
Για τις προεξοχές τραχύτητας είναι ευρύτατα γνωστή η έννοια της υδραυλικής ισοδύναμης τραχύτητας k_s (σχήμα 1, β), των ποικίλων υλικών κατασκευής των σωλήνων, την οποία εισήγαγαν οι C. Colebrook και W. White μετά από εργαστηριακή σύγκριση των διαφόρων σωλήνων προς σωλήνες εργαστηριακής τραχύτητας από επικολλημένη άμμο (J. Nikuradse): Κάθε υλικό σωλήνα συνοδεύεται πλέον από μια ιδιαίτερη τιμή k_s . Είναι, επίσης, ευρύτατα γνωστό το διάγραμμα του L. Moody, στο οποίο αποτυπώθηκαν γραφικά οι διάφορες πειραματικές εξισώσεις και παράμετροι της ροής υπό πίεση σε σωλήνες – ως συνάρτηση της σχετικής τραχύτητας k_s/D .



Σχήμα 1: Σχήμα ορισμών.

Figure 1: Definition sketch.

Λιγότερη γνωστή είναι η μέθοδος του M. Morris [13], ο οποίος υποστήριξε ότι η έννοια της ισοδύναμης τραχύτητας είναι ασαφής και αόριστη, πολλοί δε ήταν εκείνοι – όπως ο V.T. Chow [12] – που υποστήριζαν αυτή τη μέθοδο. Κατά τον Morris η σύγκριση της τραχύτητας των σωλήνων πίεσης αλλά και των αγωγών ελεύθερης επιφάνειας πρέπει να γίνεται στο εργαστήριο, όχι με τεχνητή τραχύτητα άμμου, αλλά με τεχνητή τραχύτητα δημιουργούμενη με διάφορες γεωμετρικές προεξοχές (στοιχεία ύψους k) – με ποικίλες και καθορισμένες μορφές (π.χ. μεμονωμένα σώματα σε κάποια καθορισμένη διάταξη ή λωρίδες τοποθετούμενες εγκάρσια προς τη ροή) σε συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ τους (κατά την έννοια της ροής) ίσες προς λ (σχήμα 1, γ).



Σχήμα 2: Καμπύλη του Camp.
Figure 2: Camp's curve.

Ο Μ. Morris ανέπτυξε πλήρως τη θεωρία της μεθόδου του, έκανε τις σχετικές μετρήσεις και κατασκεύασε δικά του διαγράμματα ανάλογα προς το διάγραμμα Moody. Η σχετική τραχύτητα κ_s/D του Colebrook αντικαταστάθηκε από τους λόγους κ/D (σχετικό ύψος των στοιχείων τραχύτητας) και λ/κ (σχετικές αποστάσεις). Στο διάγραμμα Morris – για λωρίδες τραχύτητας – η κύρια παράμετρος είναι ο λόγος $(D-2\kappa)/2\lambda=0,5(D/\lambda)-\kappa/\lambda$, υπάρχει δε αντιστοιχία προς το διάγραμμα Moody (κ_s/D).

Η μέθοδος Morris ακολουθείται σήμερα από πολλούς ερευνητές στα εργαστήρια Υδραυλικής, έχει δε επεκταθεί πλήρως και στους αγωγούς ελεύθερης επιφάνειας.

Στις ομοιόμορφες ροές με ελεύθερη επιφάνεια σε κυκλικό αγωγό ενδιαφέρει πολλές φορές η έννοια της ροής πλήρωσης, η οποία αναφέρεται σε μια ενδιάμεση κατάσταση ροής μεταξύ ροής πίεσης και ροής με ελεύθερη επιφάνεια. Στη ροή πλήρωσης θεωρείται ότι οριακά $y/D=1$, $J_E=J_O$ και μηδενική πίεση στο ρευστό κατά μήκος της άντυγας του σωλήνα.

Για τη ροή πλήρωσης σε σωλήνα ισχύουν κατ' αρχάς όλα όσα ισχύουν για τους σωλήνες πίεσης. Στην πράξη, ωστόσο, είναι δύσκολο να επιτευχθεί ροή πλήρωσης σε σωλήνα, κυρίως διότι για βάθη ροής $y/D>0,8$ η ελεύθερη επιφάνεια του νερού καθίσταται πολύ ασταθής. Πρόσθετες εργαστηριακές δυσχέρειες σχετίζονται με τις συνθήκες εισόδου της ροής στο σωλήνα καθώς και με το μήκος ανάπτυξης αυτής (για να καταστεί η ροή ομοιόμορφη). Γι' αυτό και η αντίστοιχη τιμή n_f του Manning είναι δύσκολο να προσδιοριστεί εργαστηριακά.

Ανάλογες εργαστηριακές δυσχέρειες υπάρχουν για πολύ μικρά βάθη ροής, π.χ. $y/D<0,1$, όπου το n του Manning αποκτά πολύ μικρές τιμές. Σε ακραίες περιπτώσεις η ροή δεν

είναι καν τυρβώδης, οπότε καθίσταται αμφίβολη η ισχύς της εξίσωσης Manning, ενώ και η ακρίβεια της μέτρησης των βαθών y αποκτά πλέον εντελώς ξεχωριστή σημασία.

Με το θέμα της μεταβολής του n καθ' ύψος, και κυρίως του λόγου n/n_f , ασχολήθηκαν αρκετοί ερευνητές στο παρελθόν. Ο T.R. Camp, με δύο εργασίες του [4], [1], τα έτη 1940 και 1946, είναι ο πιο γνωστός από όλους, βασίστηκε σε μετρήσεις των E.R. Wilcox [2] και D.J. Yarnell-S.M. Woodward [3], απέδειξε δε ότι γενικά το n αυξάνει καθ' ύψος έως κάποιο όριο. Ωστόσο ο Camp ασχολήθηκε με αγωγούς μάλ-λον μικρής διαμέτρου και από το ίδιο πάντα υλικό, κυρίως από άργιλο σταθερής τραχύτητας κ_s , και έτσι δεν ήταν σε θέση να ερευνήσει και την επιρροή από τις μεταβολές των προεξοχών τραχύτητας σε σωλήνες σταθερής διαμέτρου.

Στον σχήμα 2 παρουσιάζεται η καμπύλη των μετρήσεων του Camp.

Ο O.J. Schmidt έκανε μετρήσεις [5] σε αγωγό πολύ μεγάλης διαμέτρου από σκυρόδεμα, οι D.E. Bloodgood-J.M. Bell [6] έκαναν περιορισμένο αριθμό μετρήσεων σε διάφορους σωλήνες, ενώ ο P.D. Romero [7] έκανε μετρήσεις για μεγαλύτερα σχετικά βάθη y/D . Οι προηγούμενοι συμφώνησαν ποιοτικά με τα αποτελέσματα του Camp, ενώ οι L.C. Neale-R.E. Price [8], οι οποίοι εργάστηκαν σε λείους αγωγούς από PVC, δεν παρατήρησαν σημαντική μεταβολή του n καθ' ύψος.

Στην παρούσα εργασία έγιναν συστηματικές μετρήσεις του n με ελεγχόμενη μεταβολή των λόγων κ/D , λ/κ , οι οποίοι είχαν αρκετά σημαντικό εύρος μεταβολής.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ-MONΑΔΕΣ

B	Πλάτος ελεύθερης επιφάνειας νερού (m)
E	Εμβαδόν υγρής διατομής (m ²)
Π	Βρεχόμενη περίμετρος (m)
D	Εσωτερική διάμετρος σωλήνα (m)
n	Μέσος συντελεστής τραχύτητας κατά Manning από $y=0$ έως $y=y$
κ	Ύψος προεξοχών εργαστηριακής τραχύτητας (m)
κ_s	Ισοδύναμη τραχύτητα, μετρώμενη υδραυλικά (m)
λ	Αποστάσεις (άξονες) προεξοχών τραχύτητας κατά την έννοια της ροής (m)
ν	Κινηματική συνεκτικότητα του νερού (m ² /sec)
J_O	Κατά μήκος κλίση σωλήνα (ημθ)
J_E	Κλίση της γραμμής ενέργειας (Γ.Ε.)
Q	Παροχή (m ³ /sec)
Re	Αριθμός Reynolds= $V \cdot 4R/\nu$
Fr	Αριθμός Froude= $V \cdot (g \cdot E/B)^{-1/2}$
R	Υδραυλική ακτίνα (m)= E/Π
V	Μέση ταχύτητα ροής υγρής διατομής (m/sec)= Q/E
Άνω δείκτες:	s, για λείο αγωγό
	r, για τραχύ αγωγό

Κάτω δείκτες: f , για ροή πλήρωσης ($y/D=1$)
 $f/2$, για ροή ημι-πλήρωσης ($y/D=0,5$)

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

2.1. Διατάξεις και μετρήσεις

Οι μετρήσεις έγιναν σε αγωγό σταθερής διαμέτρου $D=475\text{mm}$ από PVC, ικανού μήκους, ο οποίος τροφοδοτείτο με νερό από μεγάλη ανάντη δεξαμενή σταθερής στάθμης με ειδική διαμόρφωση της εισόδου της ροής (συναρμογή και εσωτερικό διάτρητο διάφραγμα ελαχιστοποίησης των στροβιλισμών μεγάλης κλίμακας). Η κλίση του αγωγού ήταν σταθερή, 1:1000. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε κατάντη υπερχειλίστης, το ύψος του οποίου ρυθμιζόταν έτσι, ώστε για κάθε μία παροχή τα βάθη ροής (μετρώμενα σε έξι θέσεις κατά μήκος) παρέμεναν σταθερά (ομοιόμορφη ροή).

Οι παροχές μετρήθηκαν με διαφορικό μανόμετρο ακριβείας, οι στάθμες του νερού με ειδικό σταθμήμετρο (ακρίβεια $\pm 0,1\text{mm}$), οι δε θερμοκρασίες νερού με ακριβές θερμόμετρο (προσδιορισμός της ν).

Για περισσότερες λεπτομέρειες της διάταξης βλ. [9].

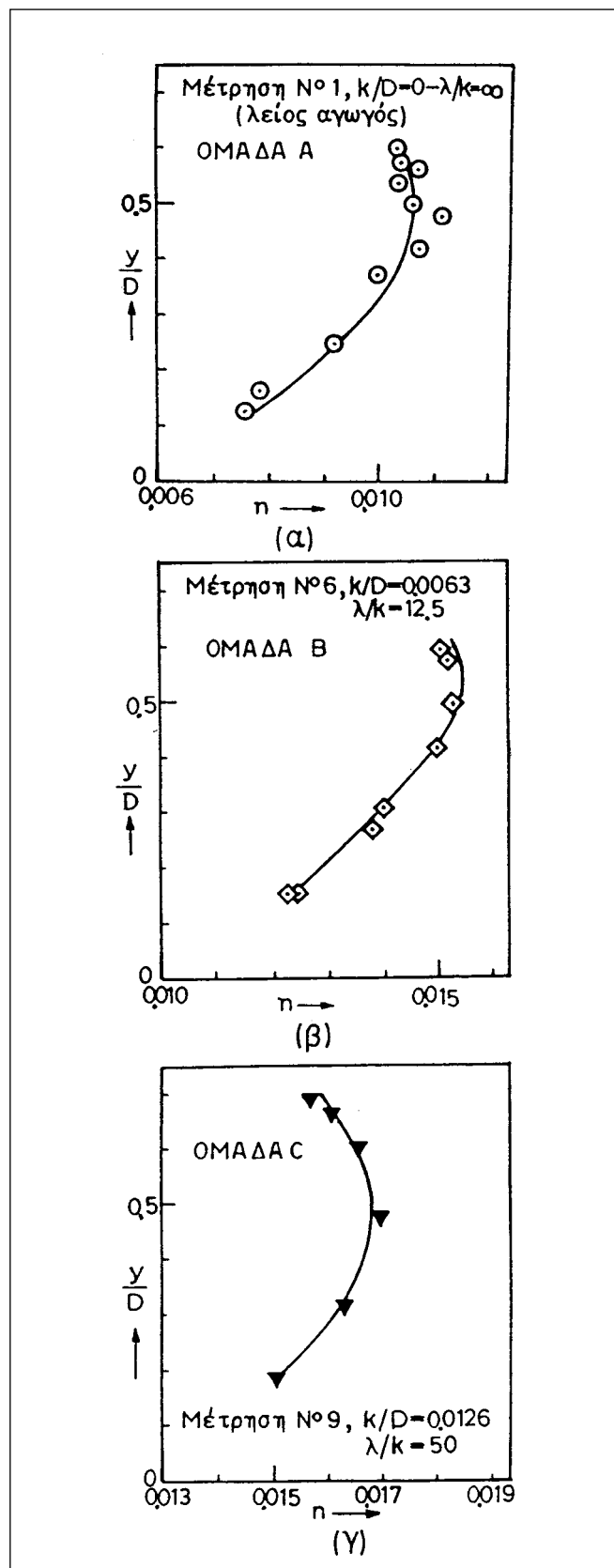
Οι μετρήσεις έγιναν σε τρεις ομάδες: Η ομάδα Α αφορούσε λείο αγωγό του εμπορίου από PVC ($\kappa/D=0$, $\lambda/\kappa=\infty$), η ομάδα Β αγωγό με $\kappa/D=0,0063$ και $\lambda/\kappa=200-100-50-25-12,5$, ενώ η ομάδα C αφορούσε αγωγό με $\kappa/D=0,0126$ και $\lambda/\kappa=200-100-50-25-12,5$. Τα στοιχεία τραχύτητας ήταν δακτύλιοι από λωρίδες από σκληρό ελαστικό ορθογωνικής διατομής ύψους κ , οι οποίες επικολλάντο εγκάρσια της ροής στον αρχικά λείο αγωγό στις προηγούμενες προεπιλεγμένες αποστάσεις λ από διανοιγείσα άνω σχισμή στον σωλήνα.

Στον παρατιθέμενο πίνακα 1 παρουσιάζονται τα κύρια στοιχεία των μετρήσεων, στις οποίες η ροή ήταν πάντα τυρβώδης και υποκρίσιμη ($Fr < 1$). Για $y/D < 0,1$ οι συντελεστές τραχύτητας n λάμβαναν πολύ μικρές τιμές, ενώ και οι αριθμοί Reynolds μειώνονταν σημαντικά. Για $y/D > 0,8$ η ελεύθερη επιφάνεια παρουσίαζε σημαντικές αστάθειες και οι μετρήσεις δεν ήταν πλήρως αξιόπιστες. Έτσι επιλέχθηκε τελικά ως διάστημα μετρήσεων το πεδίο $0,13 < y/D < 0,70$, στο οποίο σχεδιάζονται – στις πρακτικές εφαρμογές – οι κυκλικοί αγωγοί υπονόμων. Οι τιμές n_f δεν ήταν δυνατόν να μετρηθούν με αξιοπιστία, γι' αυτό και χρησιμοποιήθηκε ως συντελεστής αναφοράς ο συντελεστής $n_{f/2}$ (για $y/D=0,5$).

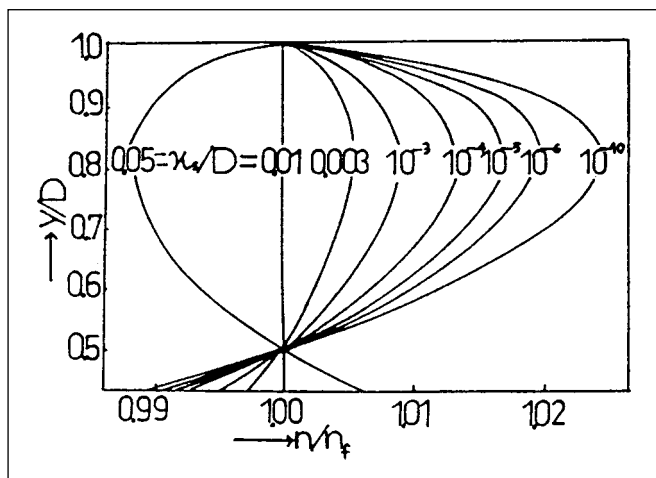
Οι θερμοκρασίες είχαν σημαντικές μεταβολές (μετρήσεις σε διάφορες χρονικές περιόδους).

2.2. Παρουσίαση μετρήσεων

Στα σχήματα 3α, β, γ, παρουσιάζονται πρωτογενείς μετρήσεις του n καθ' ύψος του αγωγού, με καμπύλες που χαράχθηκαν διά μέσου των πειραματικών σημείων.



Σχήμα 3: Πρωτογενείς μετρήσεις.
 Figure 3: Initial measurements.



Σχήμα 4: n/n_f προς y/D .
Figure 4: n/n_f versus y/D .

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ-ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.1. Θεωρητική αναφορά

Είναι γνωστό ότι η εξίσωση Manning ομοιόμορφης ροής:

$$V = (1/n) \cdot R^{2/3} \cdot J_0^{1/2}$$

όπου V σε m/sec, R σε m και $Q = V \cdot E$ (σε m^3/sec), ισχύει κυρίως για τυρβώδη ροή και μάλιστα – σε συνδυασμό με τις προεξοχές τραχύτητας των τοιχωμάτων – για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό Reynolds.

Από διαστατική ανάλυση είναι δυνατόν να αποδειχτεί ότι για μεγάλους αριθμούς Reynolds ο συντελεστής τραχύτητας για ροή ελεύθερης επιφάνειας σε κυκλικό αγωγό εξαρτάται από τη σχετική πλήρωση y/D και από τη σχετική τραχύτητα:

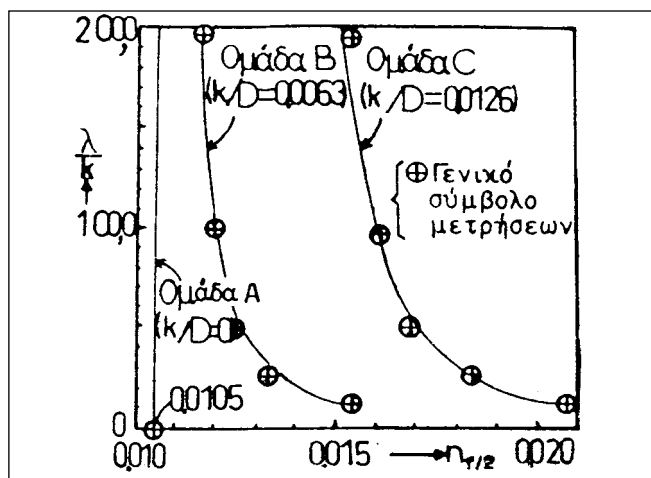
$$n^r = \varphi(y/D, \kappa_s/D) \quad (3.1)$$

ενώ για λείο αγωγό ($\kappa_s/D = 0$) είναι:

$$n^s = \varphi(y/D) \quad (3.2)$$

Είναι γνωστό [11], [14] ότι για κυκλικούς αγωγούς με ροή πλήρωσης ο n και η ισοδύναμη τραχύτητα κ_s συνδέονται στην τυρβώδη ροή (μεγάλες τιμές Re) με τη γενική εξίσωση:

$$\kappa^{1/6}/n = 22,32 \cdot \{\log(3,7 \cdot 4R/\kappa_s)\} / (4R/\kappa_s)^{1/6} \quad (3.3)$$



Σχήμα 5: $n_{f/2}$ ως προς λ/κ .
Figure 5: $n_{f/2}$ versus λ/κ .

όπου κ_s και R σε m. Κατά τον F. White [10], η προηγούμενη εξίσωση (3.3) μπορεί να ισχύει ενδεικτικά και για κάθε ροή ελεύθερης επιφάνειας, επομένως και για τους κυκλικούς υπονόμους, σε κάθε βάθος ροής y/D . Σημειώνεται ότι η εξίσωση (3.3) εκφράζει ποσοτικά και γενικά την εξάρτηση του n από τη γεωμετρία της ροής, R , και τη σχετική τραχύτητα κ_s/D .

Παρ' όλο που η εξίσωση (3.3) δεν ισχύει ποσοτικά για ροή ελεύθερης επιφάνειας, εντούτοις στο σχήμα 4 γίνεται μια προσπάθεια εφαρμογής αυτής (λόγοι n/n_f) στους κυκλικούς υπονόμους με διάφορες προεπιλεγμένες τιμές σχετικής τραχύτητας κ_s/D και R που αντιστοιχούν στα διάφορα βάθη ροής y/D .

Όπως προκύπτει από το σχήμα αυτό, υπάρχει συστηματική μεταβολή των λόγων n/n_f σε συνάρτηση με τις σχετικές τραχύτητες κ_s/D . Ο λόγος n/n_f είναι 1 για $y/D = 0,5$ και 1, δηλαδή παρ' όλο που οι καμπύλες αυτές πρέπει να επανεξεταστούν με βάση ακριβή πειραματικά αποτελέσματα, δεν προκύπτει ότι είναι $n/n_f \rightarrow 1$ για $y/D \rightarrow 0$, όπως φαίνεται στην καμπύλη Camp (σχήμα 2).

Πρέπει να σημειωθεί το συμπέρασμα του Camp ότι ο λόγος n/n_f είναι ανεξάρτητος της διαμέτρου D , εξαρτάται δε μόνο από το σχετικό βάθος y/D .

Στην παρούσα εργασία αποδεικνύεται και πάλι ότι ο ανάλογος λόγος $n/n_{f/2}$ είναι συνάρτηση του y/D , παραπέρα όμως ότι τελικά είναι ανεξάρτητος και της τραχύτητας.

Πίνακας 1: Πειραματικές Μετρήσεις.
Table 1: Experimental Measurements.

No	Ομάδα	κ/D	λ/κ	y/D	$Q(m^3/s)$	Re	Σύμβολα
1	A	0	∞	0,128–0,602	$6,38 \cdot 10^{-3}$ – $7,56 \cdot 10^{-2}$	80057-398963	⊙
2-6	B	0,0063	200–12,5	0,141–0,594	$5,41 \cdot 10^{-3}$ – $7,39 \cdot 10^{-2}$	46772-493929	+ □ ◇ ▲
7-11	C	0,0126	200–12,5	0,145–0,70	$5,55 \cdot 10^{-3}$ – $6,97 \cdot 10^{-2}$	56075-347292	■ ▲ ▼ ● ◆

3.2. Ανάλυση μετρήσεων

Για τα εδώ στοιχεία τραχύτητας ($\kappa/D, \lambda/\kappa$) και σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.1) και (3.2) είναι:

$$n^r = \varphi(y/D, \kappa/D, \lambda/\kappa) \quad (3.4)$$

ενώ για τους λείους αγωγούς είναι:

$$n^s = \varphi(y/D) \quad (3.5)$$

Από τις εδώ μετρήσεις (σχήμα 3) προσδιορίστηκαν όλες οι πειραματικές τιμές $n_{f/2}$ ($n_{f/2}^s, n_{f/2}^r$) για $\kappa/D=0-0,0063-0,0127$, $\lambda/\kappa=12,5-25-50-100-200-\infty$ και $0,128 < y/D < 0,70$ (ομάδες Α, Β, Γ) και ετέθησαν στο σχήμα 5. Από το σχήμα αυτό προκύπτει η συστηματική εξάρτηση των τιμών $n_{f/2}^r$ από τους λογούς κ/D και λ/κ .

Η κατακόρυφη ευθεία της ομάδας Α και οι καμπύλες των ομάδων Β, Γ (σχήμα 5) έχουν εξίσωση της γενικής μορφής:

$$n_{f/2}^r = n_{f/2}^s + a(\lambda/\kappa)^{-b} \quad (3.6)$$

όπου a, b σταθερές. Προσδιορίστηκαν $a=0-b=\infty$ για την ομάδα Α ($\kappa/D=0$), $a=0,0216-b=0,578$ για την ομάδα Β ($\kappa/D=0,0063$) και $a=0,0226-b=0,315$ για την ομάδα Γ ($\kappa/D=0,0126$).

Με βάση τις τελευταίες τιμές των a, b έγινε ιδιαίτερο διάγραμμα μεταβολής αυτών ως προς κ/D , οπότε προέκυψαν οι εξισώσεις:

$$a = 0,026 \cdot (\kappa/D)^{0,037} \quad (3.7)$$

$$b = 0,00675 \cdot (\kappa/D)^{-0,878} \quad (3.8)$$

Έτσι η εξίσωση (3.6) γίνεται μέσω των εξισώσεων (3.7), (3.8):

$$n_{f/2}^r = n_{f/2}^s + 0,026 \cdot (\kappa/D)^{0,037} \cdot (\lambda/\kappa)^{-0,00675 \cdot (\kappa/D)^{-0,878}} \quad (3.9)$$

η οποία ισχύει πλέον για όλο το εύρος $0 < \kappa/D < 0,0126$, $12,5 < \lambda/\kappa < \infty$ και $0,128 < y/D < 0,70$.

Πέραν των προηγούμενων, στο σχήμα 6 ετέθησαν οι λόγοι y/D και $n/n_{f/2}$ για όλες τις εδώ μετρήσεις (n^s, n^r), προέκυψε δε ενιαία καμπύλη με εξίσωση:

$$n/n_{f/2} = 1 - 0,9 \cdot \{[(y/D) - 0,5]\}^{2,4} \cdot (y/D)^{-0,8} \quad (3.10)$$

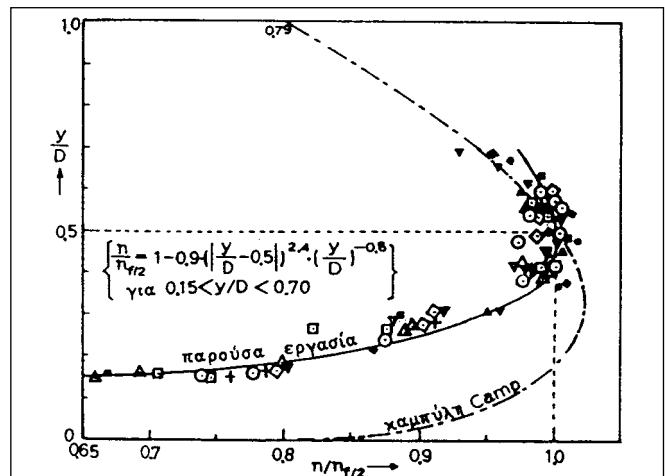
Η τελευταία εξίσωση, σε συνδυασμό με την εξίσωση (3.9), δίνει τελικά όλες τις τιμές του n για $0 < \kappa/D < 0,0126$, $12,5 < \lambda/\kappa < \infty$, $0,15 < y/D < 0,70$.

Στο σχήμα 6 τέθηκε και η αντίστοιχη καμπύλη (διακεκομμένη γραμμή) που προέκυψε από επεξεργασία της αρχικής καμπύλης Camp (σχήμα 2), όπως δε φαίνεται, έχει την ίδια ποιοτική μορφή με την πειραματική καμπύλη.

Αν γίνει εφαρμογή της εξίσωσης (3.10) για λείο αγωγό, τότε προκύπτει:

$$n^s/n_{f/2}^s = 1 - 0,90 \cdot \{[(y/D) - 0,5]\}^{2,4} \cdot (y/D)^{-0,8} \quad (3.11)$$

ενώ για τραχύ αγωγό είναι ανάλογα:



Σχήμα 6: Καμπύλη της εξίσωσης (3.9).

Figure 6: Curve of equation (3.9).

$$n^r/n_{f/2}^r = 1 - 0,9 \cdot \{[(y/D) - 0,5]\}^{2,4} \cdot (y/D)^{-0,8} \quad (3.12)$$

Αν διαιρεθούν οι δύο τελευταίες εξισώσεις και ληφθεί υπόψη και η εξίσωση (3.9), τότε, με $n_{f/2}^s = 0,0105$, λαμβάνεται:

$$n^r/n^s = 1 + 2,476 \cdot (\kappa/D)^{0,037} \cdot (\lambda/\kappa)^{-0,00675 \cdot (\kappa/D)^{-0,878}} \quad (3.13)$$

Στο δεξιό μέλος της εξίσωσης (3.13) ο τελευταίος όρος (μετά τη μονάδα) δίνει τη μεταβολή που οφείλεται στη τραχύτητα των αγωγών.

4. ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Είναι γνωστό ότι οι κυκλικοί αγωγοί υπονόμων σχεδιάζονται γενικά για $0,1 < y/D < 0,70$, ενώ ειδικότερα (για λόγους οικονομίας) προτιμώνται βάθι σχεδιασμού $y/D=0,5$ χ0,70.

Αν γίνεται αναφορά σε κυκλικό αγωγό $D=\text{σταθ.}$, $J_0=\text{σταθ.}$, και θεωρείται αυτός λείος, τότε για $y/D=0,2$ είναι [εξίσωση (3.11)] $n^s \approx 0,82 \cdot n_{f/2}^s$, ενώ για $y/D=0,6$ είναι $n^s \approx 0,99 \cdot n_{f/2}^s$. Η τιμή n^s αυξάνεται κατά $(0,99-0,82) \cdot 100/0,82 \approx 21\%$. Η παροχή μειώνεται από τη μεταβολή μόνο του n , δηλαδή χωρίς να υπολογιστούν τα νέα E και R , κατά $0,82 \cdot \{(1/0,99) - (1/0,82)\} \cdot 100 \approx 17\%$, πράγμα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, αν ως βάθος σχεδιασμού θεωρείται το βάθος $y/D=0,6$.

Για το ίδιο βάθος σχεδιασμού $y/D=0,6$ (E και R σταθερά), αν ο αγωγός είναι τραχύς, π.χ. $\kappa/D=0,005$ και $\lambda/\kappa=20$, τότε για τις εξισώσεις (3.9), (3.12) είναι $n^r \approx 1,24 \cdot n_{f/2}^r$. Σε σταθερό βάθος $y/D=0,6$ και για τραχύ αγωγό το n αυξάνεται κατά $(1,24-0,99) \cdot 100/0,99 \approx 25\%$, ενώ η παροχή σχεδιασμού μειώνεται κατά $0,99 \cdot \{(1/1,24) - (1/0,99)\} \cdot 100 \approx 20\%$.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή έγιναν μεθοδικές μετρήσεις της μεταβολής του συντελεστή τραχύτητας n του Manning καθ'

ύψος, μέσα σε κυκλικό αγωγό υπονόμων (D) με ροή ελεύθερης επιφάνειας νερού. Οι μετρήσεις αφορούν τόσο λείους αγωγούς όσο και τραχείς αγωγούς με διαβαθμισμένη τραχύτητα.

Προσδιορίστηκαν κατάλληλες εξισώσεις για τους συντελεστές τραχύτητας για ημιπλήρωση τόσο των λείων όσο και των τραχέων αγωγών, βάσει των οποίων προσδιορίστηκε η μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας σε όλα τα βάθη ροής y , με $0,15 < y/D < 0,70$, δηλαδή στο συνηθισμένο πεδίο σχεδιασμού των υπονόμων.

Τα αποτελέσματα είναι συστηματικά ως προς τις τραχύτητες και τα βάθη ροής, και χρήσιμα στα πρακτικά προβλήματα των κυκλικών αγωγών υπονόμων.

Σημείωση

Οι μετρήσεις και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγιναν υπό την επίβλεψη του πρώτου των συγγραφέων. Το άρθρο βασίστηκε και σε τμήμα της διπλωματικής εργασίας της δευτέρας των συγγραφέων, η οποία επιπλέον επιμελήθηκε και της τελικής του παρουσίασης, ενώ σημαντικό τμήμα των υπολογισμών και της επεξεργασίας έγινε από τον τρίτο συγγραφέα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Camp T.R., Design of sewers to facilitate flow, **Sew. Works. Jour.**, Vol. 18, 1946, p. 3.
2. Wilcox E.R., A comparative test of the flow of water in 8-inch concrete and vitrified clay Sewer Pipe, **Exp. Station series Bulletin**, Vol. 27, 1924, p. 5.

3. Yarnell D.J., Woodward S.M., The flow of water in Drain Tile, **Dept. of Agriculture Bulletin**, No 854, 1920, p. 27.
4. Camp T.R., Discussion – Determination of Kuffer's n for Sewers Partly Filled, **Trans. Amer. Society of Civil Engineers**, Vol. 109, 1940, p. 240.
5. Schmidt O.J., Measurement of Manning's coefficient, **Sewage and Industrial Waters**, Vol. 31, 1953, p. 995.
6. Bloodgood D.E., Bell J.M., Manning's coefficient calculated from Test Data, **Journal of Water Pollution**, Vol. 33, 1961, p. 176.
7. Pomeroy P.D., Flow velocities in small sewers, **Journal Water Pollution Control**, Vol. 39, 1967, p. 1525.
8. Neale L.C., Price R.E., Flow characteristics in PVC sewer pipe, **Journal of San. Eng. Division, Amer. Society of Civil Engineers**, SA3, Vol. 90, 1964, p.100.
9. Demetriou J.D., Nanou/Giannarou A.I., Water conveyance in channels with circular cross section, **Agricultural Water Management**, Vol. 13, 1988, p. 273-283.
10. White F., **Fluid Mechanics**, Mc Graw – Hill, 1979, p. 604.
11. Webber N.B., **Fluid Mechanics for Civil Engineers**, Chapman and Hall, 1976, p. 101.
12. Chow V.T., **Open channel Hydraulics**, Mc Graw–Hill, 1959, p. 197.
13. Morris M., **Applied Hydraulics in Engineering**, Ronowd, 1963, p. 47.
14. Δημητρίου Ι., **Εφαρμοσμένη Υδραυλική**, Αθήνα, 2000, σελ. 64, 219.

Ι. Δημητρίου,

Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Υδραυλικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Οδός Ηρώων Πολυτεχνείου 6, Ζωγράφου, 157 80 Αθήνα.

Α. Αντωνοπούλου,

Πολιτικός μηχανικός Ε.Μ.Π., Οδός Καλλιφρονά 25, Πατήσια, 112 56 Αθήνα.

Δ. Δημητρίου,

Μηχανολόγος μηχανικός, B.Sc., M.Sc. Imperial College, Mech. Eng. Dept., Exhibition Road, London SW7 2BX, England.

The Roughness Coefficient of Circular Sewer Conduits

J. DEMETRIOU

Associate Professor of N.T.U.A.

A. ANTONOPOULOU

Civil Engineer of N.T.U.A.

D. DIMITRIOY

Mechanical Engineer, B.Sc.,
M.Sc. Imperial College

Abstract

When designing a circular sewer pipe with a free water surface, it is essential to know the variation in Manning's roughness coefficient (n) with various flow depths. In this paper a number of systematic laboratory measurements are presented, concerning the roughness coefficient for smooth and rough pipes with quite a large range of pertinent parameters. Some practical equations are also derived, suitable for the proper design. The results are systematically generalised and presented.

Figure 1 shows the general layout of a circular sewer pipe (D) with a free surface flow of depth y , and an inclination along the axis, $J_0 = \sin\theta$. The flow width at the free surface is B , the water area is E and the wetted perimeter is Π , while the hydraulic radius is $R = E/\Pi$. The flow is considered as uniform, $J_0 = J_E =$ hydraulic gradient of energy head, while $V = Q/E$ is the mean velocity in each fluid cross section. Reynolds numbers are defined as $Re = V \cdot 4R/\nu$, where ν is the kinematic viscosity of water, and Froude numbers are calculated according to the formula, $Fr = V \cdot (g \cdot E/B)^{-1/2}$.

The characteristics of roughness elements may be considered either as κ_s (= equivalent to sand roughness), by the Colebrook–White method, or as $(\kappa/D - \lambda/\kappa)$ roughness by the M. Morris method [13]. Morris's method is supported by Chow [12] and is based on artificial roughness elements (fig. 1) of various geometrical shapes. In this work strips of rectangular cross section were used, of height either κ or 2κ , and at axial distances (along the flow) λ .

Based on the measurements and Manning's equation:

$$n = (1/Q) \cdot E \cdot R^{2/3} \cdot J_0^{1/2}$$

the n coefficients were calculated in the range $0.128 < y/D < 0.70$, which is most suitable for design purposes, while the flow was always turbulent (table 1) and subcritical, and $0 < \kappa/D < 0.0126$, $12.5 < \lambda/\kappa < \infty$.

For smooth pipes ($\kappa/D = 0$, $\lambda/\kappa = \infty$) the Manning's coefficients n^s were calculated, and for rough pipes ($\kappa/D \neq 0$, $\lambda/\kappa \neq \infty$)

the relevant n^r coefficients were also calculated. When $y/D = 1$ (full flow) the index f was used, $n = n_f$, while for $y/D = 0.5$ (semi-full flow), the index $f/2$ was also used, $n = n_{f/2}$.

All measurements were performed in a circular PVC pipe with $D = 475$ mm and $J_0 = 1:1000$. The strips were glued in the inner pipe surface, at the above systematically varying distances, and Q , y , were measured with an accurate manometer and an accurate level gauge, respectively. The basic characteristics of measurements, which were organised in three groups A, B, C, are given in table 1. For more details about measurements see also Demetriou et al. [9].

T.R. Camp, [1], [4], was the first to investigate this topic and presented the $(y/D - n/n_f)$ curve of fig. 2 concerning pipes of constant inner surface quality. E. Wilcox [2], D. Yarnell et al. [3], O. Schmidt [5] and D. Bloodgood et al. [6] also analysed their own results, while Pomeroy [7] measured n in pipes of larger diameter, and L. Neale et al. have worked with PVC pipes [8].

According to N. Webber [11] and F. White [10] eq. (3.3.) holds for full flow in pipes, showing that n , κ_s , and R are interrelated. This relationship for preselected κ_s/D and y/D values was investigated by the authors and is presented in fig. 4.

In the present work some preliminary results are given in Fig. 3, while from dimensionless analysis the qualitative eq. (3.4) and (3.5) are derived for rough and smooth pipe flows, respectively.

In fig. 5 all $n_{f/2}$ values are presented for $\lambda/\kappa = \infty - 0.0126 - 0.0063$, and eq.(3.6) is derived, where (a,b) depend on κ/D . Based on the present results, the last dependence is given by eqs (3.7)–(3.8), and thus, finally, eq.(3.9) is presented, giving all $n_{f/2}$ values for all present measurements.

Fig. 6 shows the relationship between $n/n_{f/2}$ and y/D ratios, and the unique curve given by the general eq. (3.10) is derived, holding for $0 < \kappa/D < 0.0128$, $2.5 < \lambda/\kappa < \infty$, $0.15 < y/D < 0.70$.

If eq. (3.10) is applied for smooth and rough pipe, then eqs (3.11) and (3.12) are produced, where $n_{f/2}^s = 0.0105$. Dividing these two last equations, eq. (3.13) results, giving the relationship between n^r and n^s in sewer pipes of various roughnesses.

As a final conclusion, the Manning's coefficient n is not constant in sewer pipes, and the above equations may be applied to calculate the change of n for smooth or rough pipes at various depths.

J. Demetriou,

Civil engineer, associate professor, National Technical University of Athens, Laboratory of Hydraulics, 6 Iroon Polytechniou str., Zografou, Athens, 157 80.

A. Antonopoulou,

Civil engineer, National Technical University of Athens, 25 Kallifrona, Patisia, Athens, 112 56.

D. Dimitriou,

Mechanical engineer, B.Sc., M.Sc. Imperial College, Mech. Eng. Dept., Exhibition Road, London SW7 2BX, England.