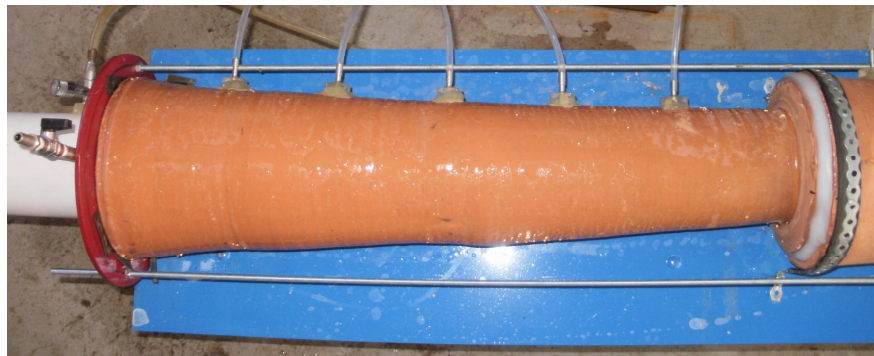


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF WATER RESOURCES
AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Απώλειες Ενέργειας Μινωικών Πηλοσωλήνων



Διπλωματική Εργασία
Μενέλαου Γ. Ξηρουχάκη

Επιβλέπων: Παναγιώτης Παπανικολάου
Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2012

Η εικόνα που βρίσκεται στο εξώφυλλο ανήκει σε ιστοσελίδα που βρισκόταν στις 2/5/2012 στον παρακάτω σύνδεσμο:<http://www.historywiz.com/minoanplumbingandheating.html>

Πρόλογος

Με την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται ένα μεγάλο ταξίδι που ξεκίνησε πριν από πέντε περίπου χρόνια στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ένα ταξίδι που με εφοδίασε με τις απαραίτητες γνώσεις για την επαγγελματική μου πορεία και μου καλλιέργησε το αίσθημα της ευθύνης του Πολιτικού Μηχανικού να υπηρετεί το δημόσιο συμφέρον και τις κοινωνικές ανάγκες. Γι αυτόν τον λόγο θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλλαν στην μέχρι τώρα πορεία μου καθώς και σε αυτούς που βοήθησαν στο να στηθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή Παναγιώτη Παπανικολάου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του κατά την διάρκεια της εργασίας μου, καθώς και για τον χρόνο που μου αφιέρωσε απλόχερα κάθε φορά που τον χρειάστηκα.

Ανεκτίμητη ήταν η βοήθεια του κύριου Λασηθιωτάκη Μανώλη καθώς και του Πατσέλη Ιωάννη που χάρη στην τεχνογνωσία τους και στο μεράκι τους «έστησαν» την πειραματική συσκευή και η βοήθεια τους ήταν διαθέσιμη όποτε την χρειαστήκαμε.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ανδρέα Αγγελάκη που με δική του πρωτοβουλία και οικονομικό κόστος κατασκευάστηκαν τα αντίγραφα του Μινωικού υδραγωγείου. Τον ευχαριστώ που μας τα εμπιστεύτηκε.

Ευχαριστώ ακόμα την ευγενική χορηγία των εταιριών «Σωτηρόπουλος & Συνεργάτες ΑΤΕ» και «ΟΤΜ Παναγιώτης Βέττας», χωρίς την οποία θα ήταν αδύνατη η υλοποίηση του συγκεκριμένου πειράματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης την οικογένεια μου και τους κοντινούς μου ανθρώπους που με στήριξαν σε όλη την διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας. Χωρίς την αμέριστη ηθική και υλική υποστήριξη τους, δεν θα είχα καταφέρει τίποτα έως σήμερα.

Τέλος αφιερώνω αυτή την εργασία στη μνήμη της γιαγιάς μου Μαρίκας που μας άφησε ξαφνικά πριν λίγες μέρες.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση του ύψους απωλειών ενέργειας μέσα από μία συστοιχία κολουροκωνικών αγωγών όμοιων με αυτούς που βρέθηκαν στα αρχαία ανάκτορα της Κνωσού στο Ηράκλειο Κρήτης. Τα κολουροκωνικά αυτά τμήματα χρησιμοποιούνταν για υδρευτικούς σκοπούς και λειτουργούσαν κυρίως υπό πίεση. Έχουν ένα μέσο μήκος 70 εκατοστών, διάμετρο εισόδου $D_{in} = 135 \text{ mm}$ και διάμετρο εξόδου $D_{out} = 85 \text{ mm}$. Ήταν κατασκευασμένα από πηλό και ήταν συγκολλημένα με κάποιο είδος κονίας. Ως τώρα έχουν γίνει πειραματικές και αριθμητικές αναπαραστάσεις λειτουργίας του δικτύου. Οι Webster et al. (2010), ερευνητές από την Μελβούρνη, πραγματοποίησαν πειράματα με αντίγραφα Μινωικών αγωγών που αυτοί κατασκεύασαν. Στην εργασία τους αναφέρουν ότι εμφανίζονται μεγάλες απώλειες ενέργειας κατά μήκος της συστοιχίας οι οποίες κατά κύριο λόγο οφείλονται στις ενώσεις των κολουροκωνικών τμημάτων. Επίσης οι Tseropoulos et al. (2012), ερευνητές από το Πανεπιστήμιο Πατρών προσομοίωσαν αριθμητικά το ίδιο μοντέλο αγωγού και παρατήρησαν ότι κατά μήκος του υπάρχει έντονη επανακυκλοφορία η οποία οφείλεται στην ξαφνική αλλαγή των διαμέτρων στις ενώσεις των κολουροκωνικών τμημάτων. Για την παρούσα εργασία είχαμε στην διάθεση μας έξι πηλίνα χειροποίητα αντίγραφα όμοια με αυτά που έχουν βρεθεί στα ανάκτορα της Κνωσού. Τα αντίγραφα αυτά τοποθετήθηκαν σε σειρά και συνδέθηκαν στην αρχή και στο τέλος με δύο ευθύγραμμα τμήματα από πλαστικό PVC σωλήνα. Τα PVC είχαν επαρκές μήκος τέτοιο ώστε να δημιουργηθεί ένα ομοιόμορφο προφίλ ροής στην είσοδο της συστοιχίας και μετά την έξοδο αυτής. Στόχος αυτής της εργασίας ήταν ο προσδιορισμός των απωλειών ενέργειας κατά μήκος της συστοιχίας και γι αυτόν τον λόγο πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές πειραματικών μετρήσεων. Για την μέτρηση των απωλειών ενέργειας χρησιμοποιήθηκε ένα κλειστό διαφορικό πιεζόμετρο αέρα. Στην πρώτη πειραματική σειρά μετρήσεων, υπολογίστηκαν οι απώλειες ενέργειας ανάμεσα στο PVC στην αρχή της συστοιχίας και μετά το τέλος αυτής. Στην δεύτερη μετρήθηκαν οι απώλειες ενέργειας κατά μήκος των δύο πρώτων πηλίνων τμημάτων, και τέλος στην τρίτη σειρά μετρήσεων ανοίχθηκαν υποδοχείς μέτρησης πίεσης κατά μήκος και των έξι τμημάτων. Παράλληλα με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή δημιουργήσαμε ένα μοντέλο υπολογισμού απωλειών ενέργειας σε κολουροκωνικό τμήμα αγωγού με χρήση σχέσεων από την θεωρία των Darcy – Wiesbach. Τα αποτελέσματα από την τρίτη σειρά μετρήσεων συμβαδίζουν με αυτά από το υπολογιστικό μοντέλο καθώς και με αυτά από την εργασία των Tseropoulos et al. (2012). Η συγκεκριμένη εργασία, όπως και οι περισσότερες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί πάνω σε προσομοίωση δικτύου από μινωικούς αγωγούς, έγιναν με κύριο μέλημα να δοθεί κάποια εξήγηση στο γιατί οι Μινωίτες

κατασκεύαζαν με τέτοιο σχήμα τους αγωγούς τους και γιατί τελικά εγκαταλείφθηκε η συγκεκριμένη μέθοδος. Ως τώρα δεν μπορεί να δοθεί ασφαλής απάντηση στην παραπάνω ερώτηση. Η επικρατέστερη εξήγηση για την χρήση τους είναι ότι υπάρχει μεγάλο ενεργειακό διαθέσιμο στην περιοχή του παλατιού της Κνωσού λόγω του πολυσχιδούς ανάγλυφου που επικρατεί στην περιοχή.

Abstract

In this Diploma Thesis, head loss measurements in flow through terracotta tapered pipes are experimentally investigated. This type of pipes were found in Minoan Palace of Knossos at Crete. It is assumed that they were used in middle Minoan period (1900-1700 B.C.) for supply purposes and operated mostly under pressure. The tapered pipes had an average length about 70 cm, upstream inside diameter around 135mm and downstream inside diameter 85 mm. They were made of clay while the connections of some kind of cement. Recently the pipes have been studied experimentally in the laboratory, as well as numerically using computational fluid dynamics (CFD) software. Webster, et al. (2010), researchers from Melbourne, conducted experiments with replicas of Minoan pipes that they made of papier machè. In their paper it is reported that great energy losses occurred along an array of four pipes, which were assumed to be due to the sudden expansion in the joints. In a computational work by Tseropoulos et al. (2012), the same pipe has been simulated numerically. The latter authors have found that through each pipe a recirculation region is observed due to the large difference in diameters at joints.

In the present thesis we tested a sequence of six handmade pottery replicas similar to those that were excavated in the palace of Knossos. The replicas were placed in a series and connected to the supply network with two straight PVC pipes placed before and after the array. The PVC pipes had sufficient length so as to obtain a fully developed, uniform flow at the entrance and exit sections of the array. The aim of this research was to determine the energy losses along the pipe array. Three sets of experimental measurements were made for this reason. A differential compressed air pressure gauge was used to obtain the hydraulic grade line and calculate the energy loss. In the first set, the energy loss between the PVC pipes, before and after the array, was obtained. In the second set the energy loss through the first two tapered pipes was measured, via an array of piezometers placed at the axis elevation of the array. Finally, in the last set of measurements, energy loss through all six Minoan pipes was obtained. The discharge varied between 5 and 14 L/s in each one of the three sets.

A simple, one-dimensional computer model was created to calculate the friction losses in one tapered pipe section along with the local loss at the joints. The results from the third set of measurements are near those obtained by our one-dimensional model, and quite near those reported by Tseropoulos et al (2012). This investigation was made in order to explain why Minoans used tapered instead of cylindrical pipes, and also to explain why they eventually

abandoned this tapered shape. We cannot give a convincing answer to it, but we can make an educational guess that they were possibly used to increase energy loss of excess energy that was due to the multifarious landscape in this area of Crete.

ΣΥΜΒΟΛΑ

Ελληνικά σύμβολα

Σύμβολο	Διαστάσεις	Φυσική παράμετρος
ε	mm	Ισοδύναμη Τραχύτητα
θ, ω	deg, rad	Γωνία
μ	kg/(m*s)	Ιξώδες νερού
ν	m ² /s	Κινηματικό Ιξώδες νερού
ρ	kg/m ³	Πυκνότητα

Αγγλικά σύμβολα

Σύμβολο	Διαστάσεις	Φυσική παράμετρος
D	m	Διάμετρος
f		Συντελεστής απωλειών
g	m/s ²	Επιτάχυνση της βαρύτητας
H	m	Ύψος ενέργειας
h_f	m	Γραμμικές απώλειες
h_t, h_a	m	Τοπικές απώλειες
h_{tot}	m	Ολικές απώλειες
J		Κλίση γραμμής ενέργειας
K		Συντελεστής τοπικών απωλειών
k_s		Ισοδύναμη τραχύτητα
K_{SE}		Συντελεστής Απωλειών σε απότομη διαστολή
L	m	Μήκος
$\rho/\rho g$	atm, m	Ύψος πίεσης
Q	m ³ /s	Παροχή
Re		αριθμός Reynolds
V	m/s	Ταχύτητα
∇	m ³	Όγκος
x	m	Απόσταση από την αρχή

- ❖ Όταν κάποιο σύμβολο συνοδεύεται από (x) σημαίνει ότι αφορά στο μέγεθος της παραμέτρου στη συγκεκριμένη θέση. Π.χ. D (x) σημαίνει η διάμετρος στην θέση x.
- ❖ Όταν πριν από κάποιο σύμβολο υπάρχει d σημαίνει ότι είναι ή διαφορά για δύο διαδοχικές θέσεις. Π.χ. dh διαφορά απωλειών ενέργειας σε δύο θέσεις.
- ❖ Όταν κάποιο σύμβολο συνοδεύεται από _ave σημαίνει ότι παίρνουμε τον μέσο όρο για την συγκεκριμένο σύμβολο. Π.χ. V_ave σημαίνει η μέση ταχύτητα μεταξύ ορισμένων θέσεων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	i
Περίληψη	iii
Abstract.....	v
Περιεχόμενα.....	ix
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Ροή σε αγωγούς υπό πίεση	1
1.2 Χαρακτηρισμός της ροής	1
1.3 Ιστορική αναδρομή	2
1.4 Αναπαράσταση δικτύου από τους Webster, Hughes και Robertson.	4
2. Πειραματική διάταξη.....	7
2.1 Διαστάσεις αγωγών.....	7
2.2 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες.....	7
2.3 Πιεζόμετρα	10
3. Υδραυλική προσέγγιση.....	15
3.1 Υπολογισμός γραμμικών απωλειών σε κολουροκωνικό αγωγό κατά Darcy-Weisbach	15
3.2 Υπολογισμός γραμμικών απωλειών σε κολουροκωνικό αγωγό με τη γενικευμένη εξίσωση του Manning.....	18
3.3 Υπολογισμός συντελεστή απωλειών με χρήση θεωρίας του Irving H.Shames (2003)	19
3.4 Τοπικές απώλειες ενέργειας σε απότομη διαστολή (sudden expansion) αγωγού.....	20
3.5 Σχολιασμός	23
4. Πειραματικές μετρήσεις	25
4.1 Μέτρηση παροχής στην είσοδο του αγωγού	25
4.2 Μέτρηση των απωλειών ενέργειας με χρήση κλειστού μανομέτρου	25
4.3 Πρώτη σειρά μετρήσεων. Απώλειες φορτίου μεταξύ εισόδου και εξόδου.....	27
4.4 Δεύτερη σειρά μετρήσεων. Απώλειες φορτίου μεταξύ των δύο πρώτων πηλοσωλήνων.	29
4.5 Τρίτη σειρά μετρήσεων. Απώλειες κατά μήκος και των έξι πηλοσωλήνων.	32
5. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων	39
5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με αυτών των Webster, Hughes και Robertson (2010).....	39
5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων με αριθμητικό μοντέλο (CFD).....	40
5.3 Ανάλυση ευαισθησίας.....	41
5.4 Διερεύνηση ξαφνικής διεύρυνσης	42
6. Επίλογος.....	43
7. Αναφορές	45
8. Παράρτημα–Appendix.....	47

1. Εισαγωγή

1.1 Ροή σε αγωγούς υπό πίεση

Οι ροές μέσα σε αγωγούς ονομάζονται σωληνοειδείς (μονοδιάστατες) ροές. Ως ροή σε αγωγό υπό πίεση ορίζουμε αυτή στην οποία το ρευστό καλύπτει ολόκληρη τη διατομή του αγωγού, ενώ η πίεση είναι διαφορετική από την ατμοσφαιρική. Δεν υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια αφού τα όρια της ροής συμπίπτουν με τα τοιχώματα του αγωγού. Οι αγωγοί υπό πίεση χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην ύδρευση, στη μεταφορά υγρών καυσίμων κλπ. Στη συνέχεια δίδονται κάποιοι ορισμοί που θα χρησιμοποιούνται στο εξής για την περιγραφή της ροής σε αγωγούς υπό πίεση:

Ομοιόμορφος: Ονομάζεται ο κλειστός (υπό πίεση) αγωγός με σταθερή διατομή.

Σωλήνας: Ονομάζεται ο αγωγός με κυκλική διατομή.

Κολουροκωνικός: Ονομάζεται ο κλειστός (υπό πίεση) αγωγός με μεταβλητή κολουροκωνική διατομή.

Διαστολή-Συστολή: Ονομάζεται η απότομη ή σταδιακή αλλαγή της διαμέτρου του αγωγού.

1.2 Χαρακτηρισμός της ροής

Σαν μόνιμη ροή ορίζουμε τη ροή το πεδίο της οποίας είναι αμετάβλητο στο χρόνο. Σαν μόνιμη ομοιόμορφη ροή ορίζουμε τη μόνιμη ροή που πραγματοποιείται σε αγωγούς ικανού μήκους για την οποία: (1) Οι γραμμές ροής είναι παράλληλες μεταξύ τους, (2) Η μέση ταχύτητα κατά μήκος μιας γραμμής ροής είναι σταθερή και (3) Η πίεση κατανέμεται υδροστατικά, κάθετα στις γραμμές ροής.

Σαν μόνιμη ανομοιόμορφη ροή ορίζουμε τη μόνιμη ροή στην οποία το διάνυσμα της ταχύτητας μεταβάλλεται κατά μήκος της γραμμής ροής (ακόμα και αν υπάρχει) ομοιόμορφη τοπικά ροή, σε διαφορετικές διατομές του αγωγού. Η μόνιμη ανομοιόμορφη ροή διακρίνεται σε: (1) επιταχυνόμενη (συγκλίνουσα) ροή, ή (2) επιβραδυνόμενη (αποκλίνουσα) ροή και (3) ροή σε καμπύλη. Μόνιμη ανομοιόμορφη ροή συναντούμε κυρίως στις αλλαγές διαμέτρου του σωλήνα, σε καμπύλες αγωγών, σε συσκευές ελέγχου της ροής (μετρητές Venturi) καθώς και στην εισροή ή την εκροή από και προς δεξαμενές αντίστοιχα.

Στρωτή ονομάζεται η ροή σε ένα αγωγό όταν ο αριθμός Reynolds (Re) είναι μικρότερος από κάποια «κρίσιμη» τιμή. Ο αριθμός Reynolds ορίζεται, ως γνωστόν, από τη σχέση:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (1.1)$$

όπου V είναι μια χαρακτηριστική ταχύτητα (συνήθως η μέση ταχύτητα ροής στη διατομή), D είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος του πεδίου ροής (συνήθως είναι η διάμετρος προκειμένου περί κυκλικού αγωγού ή κάποια χαρακτηριστική εγκάρσια κλίμακα μήκους) και $\nu = \mu/\rho$ είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού. Για τιμές του αριθμού Reynolds έως και 2000 η ροή σε σωλήνα θεωρείται στρωτή και οι διατμητικές δυνάμεις που οφείλονται στο ιξώδες του ρευστού υπερσχύουν των δυνάμεων αδράνειας.

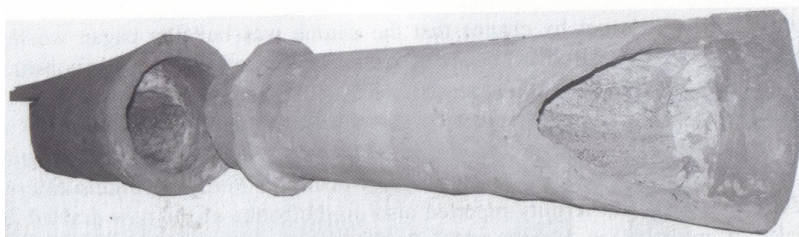
Τυρβώδης ονομάζεται η ροή για την οποία ο αριθμός Reynolds σε ένα σωλήνα υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή Re την οποία την θεωρούμε στην παρούσα εργασία μεγαλύτερη από 2300, όπου οι δυνάμεις αδράνειας υπερσχύουν των διατμητικών δυνάμεων που οφείλονται στο ιξώδες του ρευστού.

1.3 Ιστορική αναδρομή

Σε διάφορες πολιτείες κατά περιόδους υπήρξε άνθηση στον τεχνολογικό τομέα με επιτεύγματα και στα υδραυλικά έργα. Ευρήματα δικτύου διανομής νερού υπό πίεση με χρήση κεραμικών αγωγών έχουν εμφανιστεί από την εποχή των Μάγια (Maya). Στα σχήματα 1.1 και 1.2 παρουσιάζονται τμήματα αγωγών που χρησίμευαν για την μεταφορά νερού. Ανάλογα ευρήματα εντοπίστηκαν σε Τουρκία και Ιταλία. Στην Ελλάδα τα περισσότερα ευρήματα βρέθηκαν στην Κρήτη και χρονολογούνται από την εποχή που άνθιζε ο Μινωικός πολιτισμός.



Σχήμα 1.1 Ευρήματα σωλήνα από την εποχή των Μάγια (Mays, 2006a).



Σχήμα 1.2 Ευρήματα σωλήνα από την ρωμαϊκή εποχή στην περιοχή Casa Paradiso (Di Leo et al., 2006).

Η τεχνολογία στη διαχείριση του αστικού νερού στην αρχαία Ελλάδα ξεκίνησε από την Κρήτη κατά τη διάρκεια της Πρώιμης Εποχής του Χαλκού (περίπου 3500-2000π.Χ.). Μεγάλα για τα σημερινά δεδομένα επιτεύγματα έχουν σημειωθεί σε διάφορες φάσεις του Μινωικού

πολιτισμού που άκμασε κατά τη διάρκεια της «Εποχής του Χαλκού» στην Κρήτη. Αυτά αναφέρονται σε διάφορους τομείς της διαχείρισης και παροχής νερού, της υδρομάστευσης και χρήσης των πηγών, καθώς επίσης και τη χρήση του νερού για ψυχαγωγία. Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του μινωικού πολιτισμού εκτός από την αρχιτεκτονική είναι και η κατασκευή και λειτουργία συστημάτων ύδρευσης και αποχέτευσης στα «ανάκτορα» και σε άλλους οικισμούς. Επομένως, θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι μια συγκεκριμένη ομάδα ανθρώπων (τεχνικοί – «μηχανικοί») που ζούσαν στην εποχή του Χαλκού στην Κρήτη, γνώριζε και εφάρμοζε πριν από 5000 χρόνια κάποιες βασικές αρχές σχετικές με αυτό που σήμερα αποκαλούμε «επιστήμη του νερού».

Οι Μινωίτες μηχανικοί είχαν προφανώς ασχοληθεί με την επίλυση των προβλημάτων της μηχανικής του νερού και ήταν σε θέση να εφοδιάσουν τις πόλεις και τα ανάκτορα με ολοκληρωμένα συστήματα παροχής νερού. Με βάση τα επιτεύγματά τους αυτά, μπορεί να θεωρηθεί ότι, κατά μία έννοια είχαν την επίγνωση του βασικού νόμου υδροστατικής, γνωστή σήμερα ως την αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων. Αυτό είναι εμφανές από την υδροδότηση του παλατιού της Κνωσού με πηλοσωλήνες μεταφοράς νερού. Συγκεκριμένα έχει ανασκαφεί Μινωικός αγωγός με κατεύθυνση από τον Μαυροκόλυμπο προς το ανάκτορο της Κνωσού. (Evans, 1921 – 1935, Hutchinson, 1950). Ωστόσο, φαίνεται ότι οι Μινωίτες είχαν μόνο μια αόριστη κατανόηση της σχέσης μεταξύ της ροής και της τριβής με τα τοιχώματα του σωλήνα.

Ο Arthur Evans (1921-1935) αναφέρει ότι οι Μινωίτες γνώριζαν την χρήση του σίφωνα και χρησιμοποιούσαν την αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων για να μεταφέρουν νερό από τον κοντινό ποταμό Μαυροκόλυμπο προς τα ανάκτορα. Ευρήματα από τμήματα του υδραγωγείου βρέθηκαν δίπλα στο ποτάμι. Πρόσθετες ποσότητες νερού που χρειάστηκαν αργότερα, μετά από την αύξηση της ζήτησης, προήλθαν από τις πηγές Παραδείσι και Καρβαδάκι. Στο «παλάτι» μπορούμε να δούμε σήμερα τα ερείπια της εσωτερικής εγκατάστασης της αποχέτευσης. Ήταν τόσο τέλεια κατασκευασμένη ώστε θα μπορούσε να λειτουργεί και σήμερα, μετά από 5000 χρόνια. Το νερό από τις πηγές και τα πηγάδια μεταφερόταν με υδραγωγεία (ανοιχτά κανάλια και ανοιχτούς ή κλειστούς κεραμικούς αγωγούς). Οι κλειστοί αγωγοί τοποθετούνταν επιμελημένα ο ένας ως συνέχεια του επόμενου, ήταν δε ειδικά διαμορφωμένοι ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα έμφραξης. Είχαν κατασκευαστεί με μικρότερο στόμιο στην είσοδο που εφάρμοζε στο μεγαλύτερο άνοιγμα του ανάντη τμήματος του επόμενου αγωγού, έτσι ώστε η ταχύτητα εισόδου του νερού δεν επέτρεπε την επικάθιση στερεών στο εσωτερικό του σωλήνα που ακολουθούσε. Τους κεραμικούς σωλήνες μπορεί κάποιος να τους δει στο ανάκτορο ακόμα και σήμερα.



Σχήμα 1.3 Φωτογραφία ευρημάτων δικτύου ύδρευσης με Μινωικό πηλοσωλήνα (Dialynas et al., 2006).



Σχήμα 1.4 Λεπτομέρεια σύνδεσης των πηλοσωλήνων (Mays 2006b)

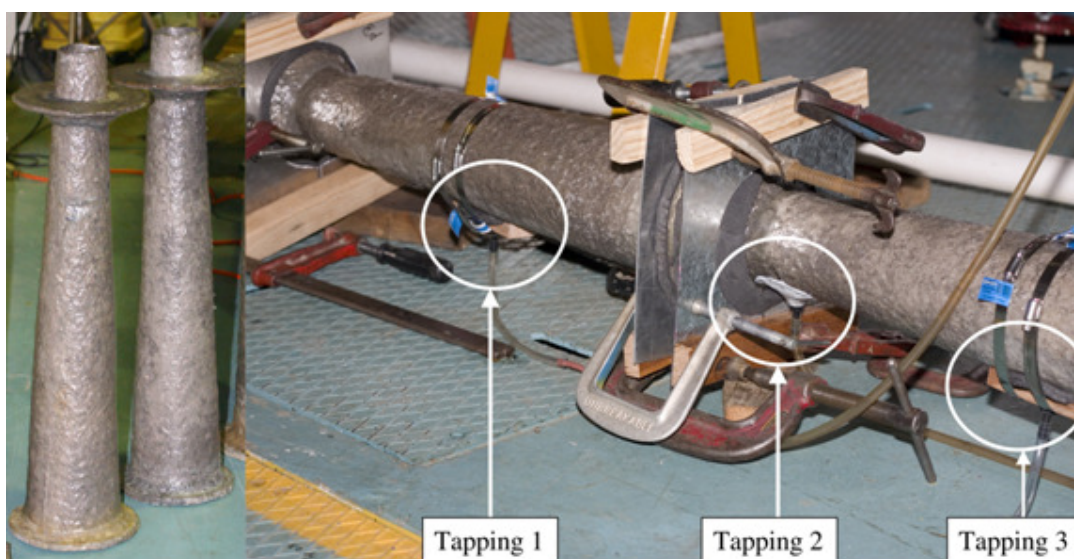
1.4 Αναπαράσταση δικτύου από τους Webster, Hughes και Robertson.

Οι Webster, Hughes και Robertson (2010) εντυπωσιασμένοι από τη τεχνολογική εξέλιξη των Μινωιτών πάνω στην κατασκευή υδραγωγείων, προσπάθησαν να εξηγήσουν τους λόγους που οι Μινωίτες επέλεξαν τους κωνικούς αγωγούς για την μεταφορά του νερού. Από υδραυλική άποψη, οι Μινωίτες γνώριζαν ότι στο κυλινδρικό σχήμα δημιουργείται αύξηση της ταχύτητας ροής στο στενό μέρος της διατομής με συνέπεια το ευκολότερο ξέπλυμα των ιζημάτων μέσα από τον σωλήνα. Κάτι που ανέμεναν οι Webster et al. (2010) και τελικά επαληθεύτηκε από τα πειράματα που υλοποίησαν, είναι ότι στην ένωση δύο αγωγών εμφανίζονταν μεγάλες τοπικές απώλειες ενέργειας λόγω της ξαφνικής διεύρυνσης της διατομής. Αυτό δεν ήταν απαραίτητα κακό με την έννοια ότι λόγω του ορεινού ανάγλυφου της Κρήτη υπήρχε μεγάλο ενεργειακό διαθέσιμο και υπήρχε ο φόβος αστοχίας του δικτύου από μεγάλες πιέσεις στους αγωγούς.

Υπάρχουν φυσικά και μη υδραυλικοί λόγοι – προτάσεις εξαιτίας των οποίων οι Μινωίτες ίσως να κατέφυγαν στην λύση του κωνικού αγωγού για το δίκτυο, που συνοψίζονται στο γεγονός ότι: (1) Το κωνικό σχήμα, ήταν τεχνικά πιο εύκολο να κατασκευαστεί, από το κυλινδρικό, (2) Το κωνικό σχήμα εξυπηρετούσε καλύτερα στην σύνδεση των αγωγών και (3) Οι καμπύλες (οριζοντιογραφικές - μηκοτομής) ήταν πιο εύκολο να προσαρμοστούν με τη χρήση κωνικών αγωγών. Η πρώτη από τις προτάσεις στηρίζεται στην ευκολία με την οποία ένας κωνικός σωλήνας από πηλό μπορεί να αφαιρεθεί από ένα καλούπι (αν όντως έτσι κατασκευάστηκαν). Αυτό είναι ένα αδύναμο επιχείρημα καθώς κυλινδρικοί σωλήνες υπήρξαν στις μεταγενέστερες περιόδους και οι Μινωίτες είχαν συγκριτικά ειδικευμένους τεχνίτες. Επίσης και η δεύτερη πρόταση είναι αδύναμη καθώς οι συνδέσεις των Μινωικών αγωγών δεν διέφεραν πολύ από τις συνδέσεις των μεταγενέστερων σωλήνων που εμφανίστηκαν στην Κρήτη. Παρόλα αυτά στην Μινωική εποχή υπήρχε μεγάλη διαφορά μεταξύ της διατομής εισόδου και εξόδου σε κάθε τμήμα του αγωγού, απ' ότι στις μεταγενέστερες περιόδους. Η τρίτη πρόταση φαίνεται να είναι η πιο ισχυρή. Παρά τις παραπάνω υποθέσεις, οι Webster & Hughes (2010) πιστεύουν ότι οι Μινωίτες είχαν σοβαρό λόγο που επέμειναν σε αυτήν την μορφή πηλοσωλήνων και πιθανότατα αυτός να σχετιζόταν με τον υδραυλικό σχεδιασμό.

Για το λόγο αυτό προχώρησαν σε προσομοίωση τμήματος του δικτύου σε κλίμακα 1:1 στο Michell Hydraulics Laboratory της Μελβούρνης. (Σχήμα 1.5) Κατασκεύασαν τέσσερα (4) αντίγραφα των σωλήνων από χαρτί machè, με επάλειψη πολυεστερικής ρητίνης και τα τοποθέτησαν σε σειρά. Το καλούπι που χρησιμοποίησαν για τη διάστρωση της χαρτομάζας ήταν ξύλινο, οι δε σωλήνες που κατασκεύασαν είχαν μήκος 81 cm, και εσωτερικές διαμέτρους εισόδου και εξόδου 150 και 70 mm αντίστοιχα. Έπειτα από δοκιμές της

συστοιχίας των ομοιωμάτων των σωλήνων που φαίνεται στην σχήμα 1.5 με παροχές στην περιοχή των 7 - 15 L/s, κατέληξαν ότι οι απώλειες ενέργειας οφείλονταν σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90% στις τοπικές απώλειες της διεύρυνσης στην ένωση των αγωγών. Αυτό σημαίνει ότι πιθανές διαφορές στις γραμμικές απώλειες ενέργειας κατά μήκος του σωλήνα που θα προκύψουν λόγω της χρησιμοποίησης διαφορετικού υλικού από ότι αυτό των Μινωιτών, είναι αμελητέες. Μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με αυτές σε ένα σύγχρονο αγωγό DICL (DUCTILE IRON PIPE), έδειξαν ότι οι απώλειες στους κολουροκωνικούς αγωγούς ήταν μεγαλύτερες. Αυτό το αποτέλεσμα επιβεβαιώνει το ότι η γεωμετρία συσχετίζεται άμεσα με τις απώλειες ενέργειας στους Μινωικούς αγωγούς. Παρόλα αυτά το σχήμα των Μινωικών αγωγών παραμένει ένας γρίφος.



Σχήμα.1.5 Φωτογραφίες ομοιώματος μινωικών πηλοσωλήνων στο Michell Hydraulics Laboratory στην Μελβούρνη.

2. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη εγκαταστάθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής Αίθουσα «Γ. Νουτσόπουλος» στο ισόγειο του κτηρίου Υδραυλικής στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, όπου έγιναν οι μετρήσεις. Αποτελούνταν από έξι χειροποίητα πήλινα κολουροκωνικά τμήματα αγωγού με διαστάσεις που προφανώς διέφεραν μεταξύ τους. Η τροφοδοσία του συστήματος γινόταν από τις δεξαμενές σταθερής στάθμης του εργαστηρίου και ελέγχονταν από δύο δικλείδες: μίας, που ήταν τοποθετημένη στην είσοδο της συστοιχίας των σωλήνων και μίας, στην έξοδο.

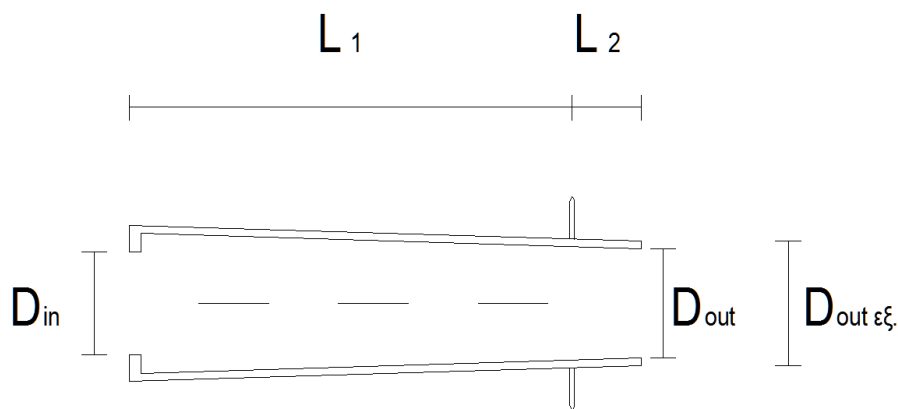
2.1 Διαστάσεις αγωγών

Ο αγωγός αποτελείται από συνολικά έξι κολουροκωνικούς σωλήνες κατασκευασμένους από πηλό και δύο σωλήνες από PVC στην είσοδο και έξοδο της συστοιχίας. Αυτό έγινε αρχικά για δύο λόγους: (1) Η μέτρηση των απωλειών γίνεται με την χρήση κλειστών πιεζόμετρων. Για να εφαρμόσουμε τις υποδοχές των πιεζόμετρων θα έπρεπε να τρυπηθούν οι κολουροκωνικοί πηλοσωλήνες. Η αρχική μας σκέψη ήταν να τους αφήσουμε κατά το δυνατόν ανέπαφους. (2) Για σωστές μετρήσεις θα πρέπει η ροή να είναι ομοιόμορφη στην είσοδο του πρώτου πήλινου αγωγού και αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ευθύγραμμου τμήματος ικανοποιητικού μήκους πριν και μετά από τη συστοιχία. Οι σωλήνες εισόδου και εξόδου από PVC έχουν εσωτερική διάμετρο $D_{in}=0.093m$ και $D_{out}=0.119m$ και απέχουν από τη συστοιχία 4.5 και 16.5 cm αντίστοιχα. Στο σκαρίφημα του σχήματος 2.1 φαίνονται τα χαρακτηριστικά ενός πηλοσωλήνα, ενώ οι διαστάσεις του κάθε ενός κολουροκωνικού τμήματος (module) του αγωγού φαίνονται στον πίνακα 2.1. Στην πορεία του πειράματος διαπιστώσαμε ότι ήταν αδύνατον να εξαχθούν σαφή αποτελέσματα χωρίς τη χρήση πιεζομέτρων κατά μήκος της συστοιχίας των αγωγών.

2.2 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες

Το πείραμα στήθηκε με αντίστροφη κλίση από τα ανάντη προς τα κατόντη, έτσι ώστε να μην παγιδεύεται αέρας στη διάταξη των πήλινων αγωγών και να είναι βέβαιο ότι η διατομή ρέει πλήρης και οι ενδείξεις των πιεζομέτρων είναι σωστές. Επειδή οι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από πηλό, που είναι πορώδες υλικό, παρουσιάστηκε μια ασήμαντη ως προς το μέγεθος απώλεια νερού από το σύστημα μέσω των πόρων των σωλήνων (εφίδρωση, βλ.

σχήμα 2.2) που δεν ήταν εφυσωμένοι, λόγω πιεζομετρικού φορτίου περίπου 5 m από τη δεξαμενή σταθερού φορτίου. Η παροχή μετρούνταν από ένα μετρητή Venturi τοποθετημένο στον κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας του εργαστηρίου με διαφορικό μανόμετρο τετραχλωράνθρακα (CCl₄). Ο έλεγχος της ροής γινόταν με δύο δικλίδες τοποθετημένες αρκετά πριν από την είσοδο και αρκετά μετά την έξοδο της διάταξης ώστε το πεδίο ροής να μην επηρεάζεται από την τύρβη που προκαλούσαν.

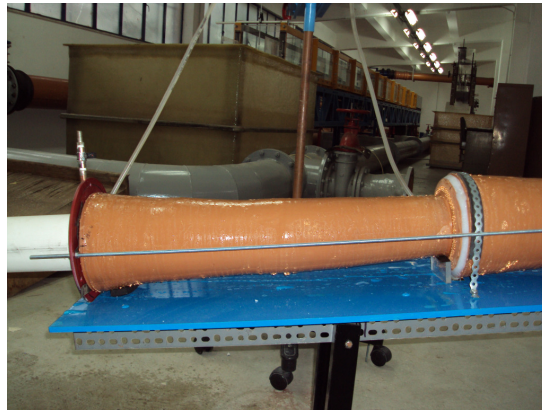


Σχήμα.2.1 Σκαρίφημα τυπικού τμήματος πηλοσωλήνα (module).

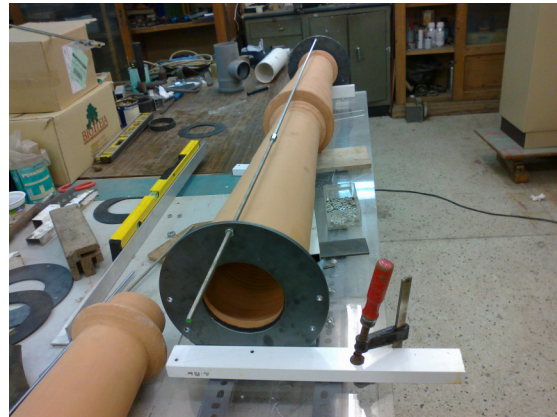
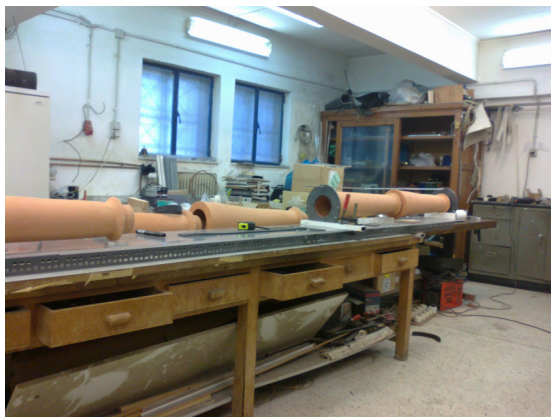
Οι Μινωικοί πηλοσωλήνες συνδέονταν μεταξύ τους με κάποιο είδος κονιάς. Για να υπάρχει η δυνατότητα διαχωρισμού των πηλοσωλήνων μετά τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε σιλικόνη για τη στεγάνωση των αρμών που μπορεί εύκολα να αφαιρεθεί. Στο σχήμα 2.3 φαίνονται εικόνες από τη φάση συναρμολόγησης της διάταξης των πηλοσωλήνων. Η γενική διάταξη του πειράματος φαίνεται στο σχήμα 2.4.

Πίνακας 2.1 Διαστάσεις των επί μέρους πήλινων σωλήνων της διάταξης.

Τμήμα	1 ^ο	2 ^ο	3 ^ο	4 ^ο	5 ^ο	6 ^ο	M.O.
L₁ (m)	0.620	0.640	0.640	0.645	0.650	0.625	0.637
L₂ (m)	0.050	0.050	0.060	0.050	0.055	0.065	0.055
D_{in} (m)	0.102	0.109	0.112	0.110	0.110	0.112	0.109
D_{out} (m)	0.079	0.083	0.078	0.079	0.083	0.085	0.081
D_{out εξ.} (m)	0.090	0.098	0.095	0.095	0.103	0.105	0.098



Σχήμα 2.2 Εφιδρωμένος αγωγός λόγω ύψους πιεζομετρικού φορτίου περίπου 5 m.



Σχήμα 2.3 Πηλοσωλήνες κατά τη φάση της συναρμολόγησης της διάταξης.



Σχήμα 2.4 Γενική διάταξη του πειράματος.

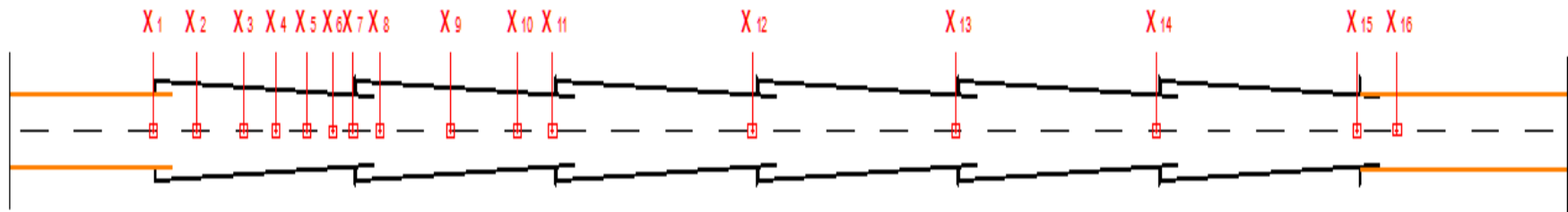
2.3 Πιεζόμετρα

2.3.1 Θέσεις πιεζόμετρων

Συνολικά έγιναν προοδευτικά, κατά μήκος του συστήματος, δεκαοκτώ (18) οπές (υποδοχές) που παρείχαν τη δυνατότητα σημειακής μέτρησης της πίεσης σε διαφορετικές θέσεις της διάταξης. Οι δεκατέσσερις (14) από αυτές διαμέτρου 2 mm έγιναν στο ύψος του άξονα κατά μήκος των έξι πηλοσωλήνων, ενώ τέσσερις έγιναν στους σωλήνες από PVC εισόδου και εξόδου της διάταξης, δύο στο ύψος του άξονα με διάμετρο 2 mm και δύο στην άντυση των αγωγών για εξαέρωση. Πιεζόμετρα εγκαταστάθηκαν στις κατά μήκος οπές, στο ύψος του άξονα της διάταξης. Λεπτομερειακά, οι αποστάσεις των θέσεων των πιεζομέτρων από το πιεζόμετρο εισόδου στο σωλήνα από PVC, καθώς επίσης οι εσωτερικές διαμέτρους του σωλήνα στη θέση των πιεζομέτρων, φαίνονται στον πίνακα 2.2 και διαγραμματικά στο σχήμα 2.5. Στο σχήμα 2.6 φαίνονται δύο φωτογραφίες της συστοιχίας των πηλοσωλήνων.

Πίνακας 2.2 Θέσεις πιεζόμετρων

Κατά μήκος θέση	Τμήμα αγωγού	Απόσταση από αρχή (m)	Εσωτερική διάμετρος αγωγού (m)	1 ^ο πείραμα	2 ^ο πείραμα	3 ^ο πείραμα
x1	PVC_ΑΡΧΗ	0	0.093	H1, H _{in}	Π-in	Π-in, Π-1
x2	1ο	0.153	0.130		Π-1	
x3	1ο	0.253	0.121		Π-2	
x4	1ο	0.355	0.114		Π-3	
x5	1ο	0.457	0.103		Π-4	Π-2
x6	1ο	0.562	0.092		Π-5	Π-3
x7	1ο	0.634	0.085			Π-4
x8	2ο	0.766	0.142		Π-6	
x9	2ο	0.959	0.131		Π-7	
x10	2ο	1.155	0.092		Π-8	Π-5
x11	2ο	1.279	0.085			Π-6
x12	3ο	1.914	0.081			Π-7
x13	4ο	2.571	0.091			Π-8
x14	5ο	3.23	0.090			Π-9
x15	6ο	3.867	0.090			Π-10
x16	PVC_ΤΕΛΟΣ	4.086	0.119	H2, H _{out}		



Σχήμα 2.5 Σκαρίφημα θέσεων πιεζόμετρων κατά μήκος της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 2.6 Διάταξη των πιεζόμετρων κατά μήκος της συστοιχίας των έξι πηλοσωλήνων σε σειρά.

2.3.2 Διατάξεις συλλογής ενδείξεων πίεσης (μανόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν)

Έγιναν τρεις σειρές μετρήσεων των απωλειών ενέργειας στην πειραματική διάταξη. Κάθε φορά χρησιμοποιήθηκε διαφορετικός αριθμός πιεζόμετρων για τον προσδιορισμό των απωλειών. Τα πιεζόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε μια από τις δοκιμές φαίνονται στον πίνακα 2.2, μαζί με την εκάστοτε ονομασία που τους είχε δοθεί.

Για την πρώτη σειρά πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα πιεζόμετρα των αγωγών από PVC που βρίσκονται λίγο πριν την είσοδο και λίγο μετά την έξοδο του συστήματος των πήλινων αγωγών. (σχήμα 2.7) αφού έγινε εξαέρωση του συστήματος. Αρχικά προσπαθήσαμε να μετρήσουμε τις απώλειες φορτίου/ενέργειας με την χρήση ενός κεκλιμένου διαφορικού μανόμετρου με τετραχλωράθρακα. (σχήμα 2.8) Αυξάνοντας τις παροχές αυξήθηκαν οι απώλειες ενέργειας που για να προσδιοριστούν έπρεπε το διαφορικό μανόμετρο να τοποθετηθεί σε κατακόρυφη θέση. Επειδή όμως και αυτή η κλίμακα ανάγνωσης ήταν ανεπαρκής, κατασκευάσαμε ένα κλειστό διαφορικό μανόμετρο με παγιδευμένο αέρα με το οποίο καταφέραμε να πάρουμε τις επιθυμητές μετρήσεις. (Σχήμα 2.4) Επειδή υπήρξε αμφιβολία για την εγκυρότητα των μετρήσεων, δεδομένου ότι το πιεζόμετρο στα κατάντη βρισκόταν μάλλον στην περιοχή αποκόλλησης της ροής, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται υποπίεσεις, αποφασίσαμε να μετρήσουμε τις απώλειες ενέργειας τοποθετώντας πιεζόμετρα κατά μήκος του άξονα των δύο πρώτων ηηλοσωλήνων.

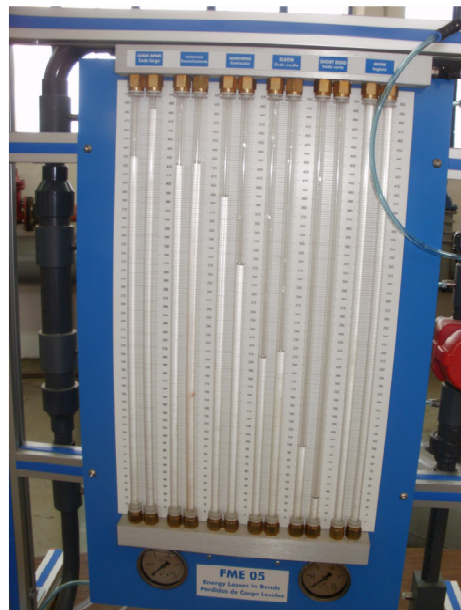


Σχήμα 2.7 Θέσεις πιεζόμετρων στο πλάι και εξαεριστικών στην άντρυγα των σωλήνων PVC στην είσοδο και έξοδο της συστοιχίας ηηλοσωλήνων.



Σχήμα 2.8 Μετρήσεις με κεκλιμένο διαφορικό μανόμετρο με τετραχλωράνθρακα.

Για την δεύτερη σειρά πειραμάτων ανοίχτηκαν πιεζομετρικές οπές για τη μέτρηση της πίεσης κατά μήκος των δύο πρώτων πηλοσωλήνων. Ανοίχτηκαν πέντε πιεζομετρικές οπές κατά μήκος του πρώτου πηλοσωλήνα και τρεις κατά μήκος του δεύτερου (σχήμα 2.9). Για την ανάγνωση των διαφορών πίεσης χρησιμοποιήθηκε διαφορικό μανόμετρο με αέρα που φαίνεται στο σχήμα 2.9. Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από συνολικά δώδεκα κατακόρυφους γυάλινους σωλήνες που συνδέονται στο πάνω μέρος. Ο αέρας που υπάρχει μέσα στα πιεζόμετρα έχει την ίδια πίεση παντού, μπορούμε επομένως από το ύψος της ένδειξης των πιεζομέτρων να χαράξουμε τη κλίση της γραμμής ενέργειας και να υπολογίσουμε τις απώλειες ενέργειας μεταξύ των θέσεων μέτρησης της πίεσης.



Σχήμα 2.9 Θέσεις πιεζομέτρων για την δεύτερη σειρά πειραμάτων (επάνω) και διαφορικό μανόμετρο με συμπιεσμένο αέρα (κάτω).

Για την τρίτη και τελευταία σειρά πειραμάτων ανοίχτηκαν έξι επί πλέον πιεζομετρικές οπές, μία στο τέλος κάθε πήλινου κομματιού. Για την ανάγνωση του ύψους πίεσης χρησιμοποιήθηκε πάλι η διάταξη του διαφορικού μανομέτρου αέρα του σχήματος 2.9. Επειδή αυτή η διάταξη παρέχει την δυνατότητα ανάγνωσης απωλειών μεταξύ των δύο ακραίων θέσεων έως 50 cm, χρησιμοποιήθηκαν οι διακόπτες εισόδου (σχήμα 2.10) σε κάθε σωλήνα του μανομέτρου για την απομόνωση των πιεζομέτρων που βρίσκονταν εκτός κλίμακας κατά περίπτωση.



Σχήμα 2.10 Διακόπτες εισόδου στους σωλήνες του διαφορικού μανομέτρου με αέρα για την κατά περίπτωση επιλογή των πιεζόμετρων.

3. Υδραυλική προσέγγιση

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση και θεωρητικός προσδιορισμός των απωλειών ενέργειας κατά μήκος ενός τυπικού ηλυσωλήνα μήκους 0.65 m και διαμέτρων εισόδου 0.135 m και εξόδου 0.084 m. Τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν για την ερμηνεία των πειραματικών μετρήσεων.

3.1 Υπολογισμός γραμμικών απωλειών σε κολουροκωνικό αγωγό κατά Darcy-Weisbach

Ένας κολουροκωνικός αγωγός που η διάμετρος του μεταβάλλεται γραμμικά, μπορεί να χαρακτηριστεί σαν βαθμιαία στένωση στην οποία η πτώση πίεσης οφείλεται εκτός από την τραχύτητα του σωλήνα και στη βαθμιαία αύξηση της μέσης ταχύτητας. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση των γραμμικών απωλειών ενέργειας σε σχέση με αυτές που παρουσιάζονται στους σωλήνες σταθερής διαμέτρου. Ο υπολογισμός των γραμμικών απωλειών σε τμήμα σωλήνα μήκους L και μεταβλητής γραμμικά διαμέτρου μπορεί να γίνει αριθμητικά με τη μεθοδολογία που ακολουθεί.

Χωρίζουμε αρχικά τον αγωγό σε n ίσα τμήματα μήκους Δx το καθένα. Στη θέση x_n η διάμετρος του σωλήνα υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή σύμφωνα με τη σχέση

$$D(x)_n = D(x)_{n-1} - \frac{(x_n - x_{n-1})(D_{in} - D_{out})}{L} \quad (3.1)$$

όπου D_{in} και D_{out} είναι οι διάμετροι εισόδου και εξόδου του σωλήνα (σχήμα 3.1). Για δεδομένη παροχή Q , η μέση ταχύτητα ροής και ο αριθμός Reynolds όταν η διάμετρος του αγωγού είναι $D(x)$, προκύπτουν από τις σχέσεις

$$V(x) = \frac{Q}{A(x)} = \frac{4Q}{\pi D^2(x)} \quad \text{και} \quad Re(x) = \frac{V(x)D(x)}{\nu} \quad (3.2)$$

όπου ν το κινηματικό ιξώδες του νερού. Εάν η ισοδύναμη τραχύτητα του αγωγού είναι k_s , τότε η κλίση των γραμμικών απωλειών κατά Darcy-Weisbach είναι

$$J(x) = \frac{f(x) V^2(x)}{D(x) 2g} \quad (3.3)$$

όπου ο συντελεστής γραμμικών απωλειών $f(x)$ είναι συνάρτηση του αριθμού Reynolds $Re(x)$ και της σχετικής τραχύτητας $k_s/D(x)$. Ο συντελεστής γραμμικών απωλειών f υπολογίζεται είτε απ' ευθείας με τη σχέση των Swamme & Jain

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{0.27k_s}{D(x)} + \frac{5.72}{Re(x)^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3.4)$$

είτε από τη σχέση των Colebrook-White

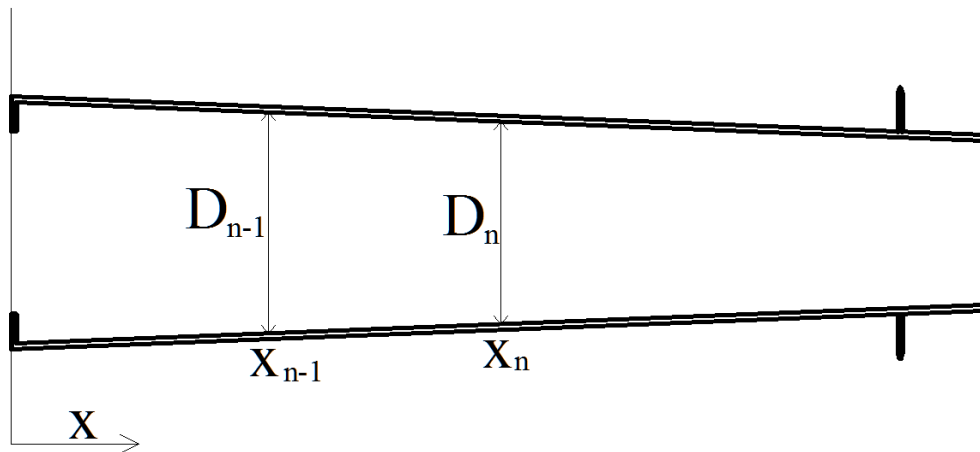
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{k_s}{D} + \frac{9.35}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3.5)$$

με αριθμητική επίλυση. Η μέση κλίση γραμμικών απωλειών υπολογίζεται για το τμήμα Δx από την σχέση (3.6) για συγκεκριμένη παροχή ως το ημίθροισμα των κλίσεων στα δύο του άκρα

$$\bar{J}(x) = \frac{J(x_n) + J(x_{n-1})}{2} \quad (3.6)$$

οι δε γραμμικές απώλειες ενέργειας στο τμήμα Δx είναι

$$h_f(x) = \bar{J}(x) \Delta x. \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.1 Κολυροκωνικό τμήμα αγωγού

Για το θεωρητικό υπολογισμό των γραμμικών απωλειών σε κολυροκωνικό αγωγό χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δεδομένα που προέκυψαν σαν μέσες τιμές από τα χαρακτηριστικά των πηλοσωλήνων:

- Μήκος σωλήνα: $L = 0.650$ m
- Μέση εσωτερική διάμετρος εισόδου: $D_{in} = 0.135$ m
- Μέση εσωτερική διάμετρος εξόδου: $D_{out} = 0.084$ m

- Μέση τυπική τραχύτητα $k_s = 0.001 \text{ m}$
- Κινηματική συνεκτικότητα: $\nu = 1.15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές των γραμμικών απωλειών κατά μήκος ενός πηλοσωλήνα για παροχές μέχρι 20 L/s όταν η ισοδύναμη τραχύτητα είναι 1 mm. Αναλυτικός τρόπος υπολογισμού υπάρχει στο παράρτημα, πίνακες Π II-1-4. Για υδραυλικά λείους σωλήνες ($k_s \rightarrow 0$) η σχέση υπολογισμού του συντελεστή γραμμικών απωλειών (3.5) γίνεται

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{9.35}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (3.5\alpha)$$

ενώ για υδραυλικά τραχείς σωλήνες όπου ο αριθμός Reynolds παίρνει μεγάλες τιμές η σχέση (3.5) γράφεται ως

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{k_s}{D} \right). \quad (3.5\beta)$$

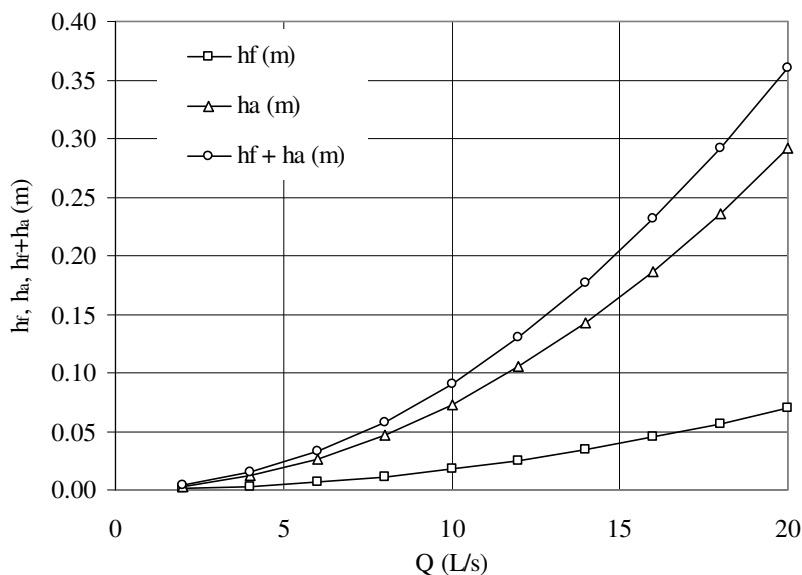
Πίνακας 3.1 Γραμμικές, τοπικές και ολικές απώλειες κατά Swamme & Jain και Colebrook-White για διάφορες παροχές όταν $k_s = 0.001 \text{ m}$.

Q (L/s)	S-J h_f (m)	C-W h_f (m)	C-W λείος h_f (m)	C-W τραχύς h_f (m)	h_a (m)	h_f+h_a (m)
2	0.0007	0.0007	0.0005	0.0007	0.0025	0.0032
4	0.0029	0.0029	0.0015	0.0027	0.0100	0.0128
6	0.0064	0.0064	0.0032	0.0062	0.0224	0.0288
8	0.0113	0.0113	0.0053	0.0110	0.0399	0.0512
10	0.0175	0.0175	0.0079	0.0172	0.0623	0.0799
12	0.0252	0.0252	0.0110	0.0247	0.0898	0.1149
14	0.0342	0.0342	0.0145	0.0336	0.1222	0.1564
16	0.0446	0.0446	0.0150	0.0439	0.1596	0.2041
18	0.0563	0.0563	0.0229	0.0556	0.2019	0.2583
20	0.0695	0.0695	0.0276	0.0687	0.2493	0.3188

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ισοδύναμη διάμετρος αγωγού μήκους 0.65m που δίνει τις ίδιες γραμμικές απώλειες με τον κολουροκωνικό προέκυψε $D = 0.103 \text{ m}$, για ισοδύναμη τραχύτητα αγωγού $k_s = 0.2$ έως 1.0 mm. Η ισοδύναμη διάμετρος αγωγού μήκους 0.65 m που δίνει τις ίδιες συνολικές απώλειες με τον κολουροκωνικό προέκυψε $D = 0.076 \text{ m}$, για ισοδύναμη τραχύτητα αγωγού $k_s = 1.0 \text{ mm}$ ($f \cong 0.042$).

Επίσης, εάν η ισοδύναμη διάμετρος αγωγού μήκους 0.65 m που δίνει τις ίδιες συνολικές απώλειες με τον κολουροκωνικό είναι $D = 0.103 \text{ m}$, τότε η ισοδύναμη τραχύτητα του αγωγού για παροχές από 2 έως 20 L/s κυμαίνεται μεταξύ $k_s = 28.1$ και 28.6 mm ($k_s/D \cong 0.275$, $f \cong 0.195$). (Παράρτημα πίνακες Π II-13-14)

Στο σχήμα 3.2 συγκρίνεται το μέγεθος των απωλειών που υπολογίστηκαν θεωρητικά για διάφορες παροχές. Οι γραμμικές απώλειες υπολογίστηκαν ότι είναι περίπου το ένα τρίτο των τοπικών, για όλες τις παροχές.



Σχήμα 3.2 Τοπικές, γραμμικές και συνολικές απώλειες ενέργειας για διάφορες παροχές

3.2 Υπολογισμός γραμμικών απωλειών σε κολουροκωνικό αγωγό με τη γενικευμένη εξίσωση του Manning.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό της διαμέτρου $D(x)_n$, της ταχύτητας $V(x)$ και του αριθμού Reynolds $Re(x)$ δεν μεταβάλλεται σε σχέση με αυτήν της προηγούμενης ενότητας (σχέσεις 3.1 και 3.2).

Πρόσφατα διατυπώθηκε μία γενικευμένη σχέση Manning ως προσέγγιση των εξισώσεων Darcy-Weisbach και Colebrook-White, εφαρμόσιμη σε όλες τις περιπτώσεις ροής (λεία, τραχεία και ενδιάμεση). Η εν λόγω γενικευμένη σχέση είναι (Koutsoyiannis, 2008)

$$V = (1/N)R^{(1+\beta)/2} J^{(1+\gamma)/2} \quad (3.5)$$

όπου οι παράμετροι β , γ και N δίνονται συναρτήσει της αδιαστατοποιημένης τραχύτητας ε_*

$$\varepsilon_* : \varepsilon/\varepsilon_0, \text{ με } \varepsilon_0 = (v^2/g)^{1/3} \quad (3.6)$$

ή $\varepsilon_0 = 0.0005 \text{ m}$ για $\nu = 1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Οι βελτιστοποιημένες παράμετροι για το σύνηθες εύρος διαμέτρων ($0.1 \text{ m} \leq D \leq 1 \text{ m}$) και ταχυτήτων ($0.2 \text{ m/s} \leq V \leq 2 \text{ m/s}$) είναι:

$$\beta = 0.3 + 0.0005\varepsilon_* + \frac{0.02}{1 + 6.8\varepsilon_*}, \quad \gamma = \frac{0.096}{1 + 0.31\varepsilon_*}, \quad N = 0.00687(1 + 1.6\varepsilon_*)^{0.16} \quad (3.7)$$

Τα σχετικά σφάλματα στην εκτίμηση των μεγεθών J , D , V και Q για το σύνηθες εύρος διαμέτρων και ταχυτήτων είναι μικρότερα από 5%. 1%. 3% και 3% αντίστοιχα. Άλλες ομάδες

παραμέτρων για διαφορετικά διαστήματα διακύμανσης των D και V δίνονται στην εργασία του Koutsoyiannis (2008).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η κλίση της γραμμής ενέργειας δίνεται από την σχέση

$$J(x) = \left(\frac{4^{1+\beta} N^2 V^2(x)}{D^{1+b}(x)} \right)^{\frac{1}{1+\gamma}} \quad (3.8)$$

Τελικά οι γραμμικές απώλειες προκύπτουν από την σχέση:

$$h_f(x) = J(x)L(x) \quad (3.9)$$

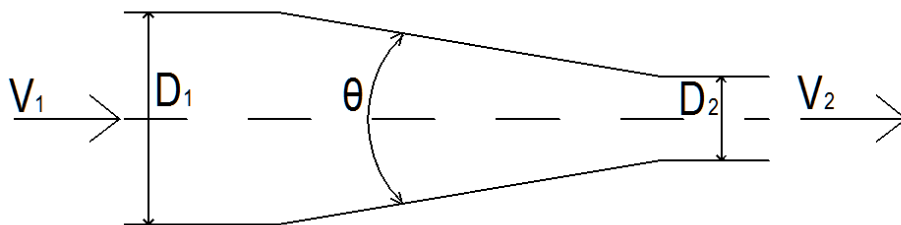
Για το θεωρητικό υπολογισμό των γραμμικών απωλειών σε κολουροκωνικό αγωγό χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δεδομένα που προέκυψαν σαν μέσες τιμές από τα χαρακτηριστικά των πηλοσωλήνων:

- Μήκος σωλήνα: $L = 0.650$ m
- Μέση εσωτερική διάμετρος εισόδου: $D_{in} = 0.135$ m
- Μέση εσωτερική διάμετρος εξόδου: $D_{out} = 0.084$ m
- Μέση τυπική τραχύτητα $\varepsilon_* = 0.001$ m
- Κινηματική συνεκτικότητα: $\nu = 1,15 \times 10^{-6}$ m²/s

Παρακάτω Οι τιμές των γραμμικών απωλειών κατά μήκος ενός πηλοσωλήνα για παροχές μέχρι 20 L/s όταν η ισοδύναμη τραχύτητα είναι 1 mm παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2. Οι συντελεστές της γενικευμένης εξίσωσης Manning β , γ , και N είναι 0.29, 0.014 και 0.0128 αντίστοιχα. Αναλυτικός τρόπος υπολογισμού υπάρχει στο παράρτημα, πίνακας Π II–5.

3.3 Υπολογισμός συντελεστή απωλειών με χρήση θεωρίας του Irving H. Shames (2003)

Σύμφωνα με τον Shames (2003) οι γραμμικές απώλειες σε ένα κωνικό σχήμα μπορούν να δοθούν με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού. Δηλαδή τις διαμέτρους εισόδου και εξόδου καθώς και την γωνία θ που σχηματίζεται από δύο πλευρές του αγωγού.



Σχήμα 3.3 Γραμμική στένωση αγωγού

Ο συντελεστής απωλειών K δίδεται από τις παρακάτω σχέσεις ($\theta \approx 4.5^\circ$)

$$\text{Για γωνία } \theta \leq 45^\circ, \quad K = \frac{0.8 \sin \theta [1 - (D_2/D_1)^2]}{(D_2/D_1)^4} \quad (3.10)$$

Για γωνία $45^\circ < \theta \leq 180^\circ$,

$$K = \frac{0.5[1 - (D_2/D_1)^2] \sqrt{\sin \theta}}{(D_2/D_1)^4} \quad (3.11)$$

Και τελικά οι απώλειες υπολογίζονται από την σχέση (3.23)

$$h_1 = K \frac{V_1^2}{2g} \quad (3.12)$$

Τα αποτελέσματα του θεωρητικού υπολογισμού απωλειών λόγω διαμήκους στένωσης με τη θεωρία του Shames φαίνονται στον πίνακα 3.2 για συγκεκριμένες παροχές ($K=0.128$) κατά μήκος ενός πηλοσωλήνα. Για τον υπολογισμό των απωλειών χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δεδομένα – παραδοχές:

- Μήκος κάθε σωλήνα: $L= 0.650$ m
- Μέση εσωτερική διάμετρος εισόδου: $D_{in} = 0.135$ m
- Μέση εσωτερική διάμετρος εξόδου: $D_{out} = 0.084$ m

Οι αναλυτικοί υπολογισμοί φαίνονται στον πίνακα Π II–6 του παραρτήματος.

Πίνακας 3.2 Γραμμικές, τοπικές και ολικές απώλειες κατά Manning και Shames για διάφορες παροχές όταν $k_s= 0.001$ m.

Q (L/s)	Manning h_f (m)	Shames h_f (m)	h_a (m)	Manning h_f+h_a (m)	Shames h_f+h_a (m)
2.00	0.0008	0.0003	0.0025	0.0033	0.0028
4.00	0.0031	0.0010	0.0100	0.0131	0.0110
6.00	0.0069	0.0023	0.0224	0.0293	0.0247
8.00	0.0122	0.0040	0.0399	0.0521	0.0439
10.00	0.0189	0.0063	0.0623	0.0812	0.0686
12.00	0.0271	0.0090	0.0898	0.1169	0.0988
14.00	0.0367	0.0123	0.1222	0.1589	0.1345
16.00	0.0478	0.0160	0.1596	0.2074	0.1756
18.00	0.0604	0.0203	0.2019	0.2623	0.2222
20.00	0.0743	0.0250	0.2493	0.3236	0.2743

3.4 Τοπικές απώλειες ενέργειας σε απότομη διαστολή (sudden expansion) αγωγού

Στις ενώσεις μεταξύ των επί μέρους αγωγών, η διάμετρος μεταβάλλεται (απότομη διεύρυνση), και εμφανίζονται τοπικές απώλειες ενέργειας λόγω αποκόλλησης της ροής και έντονης τύρβης. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τον υπολογισμό του συντελεστή τοπικών απωλειών λόγω απότομης διεύρυνσης. Η εξίσωση ενέργειας μεταξύ των διατομών (1) και (2) που φαίνεται στο σχήμα 3.4 για οριζόντιο αγωγό γράφεται ως

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{(1-2)} \Rightarrow h_a = \Delta H_{(1-2)} = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \quad (3.13)$$

Από την εξίσωση της ορμής (ποσότητας κίνησης) κατά μήκος του άξονα x

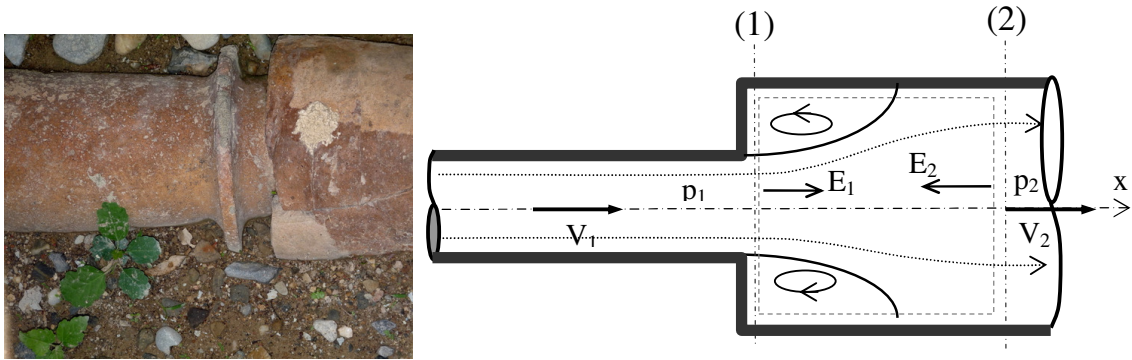
$$F = F_p + F_g + F_\tau = \rho Q(V_2 - V_1) = p_1 E_1 - p_2 E_2 \quad (3.14)$$

όπου E_1 και E_2 είναι τα εμβαδά των διατομών στα ανάντη και κατόντη αντίστοιχα και θεωρούμε ότι $F_g = F_\tau = 0$ και $F_p = p_1 E_1 - p_2 E_2$. Εφαρμόζοντας την εξίσωση συνέχειας

$$Q = V_1 E_1 = V_2 E_2 \quad (3.15)$$

προκύπτει ότι

$$\rho V_2 E_2 (V_2 - V_1) = p_1 E_1 - p_2 E_2 \Rightarrow p_1 - p_2 = \rho V_2 (V_2 - V_1). \quad (3.16)$$



Σχήμα 3.4² Απότομη διεύρυνση αγωγού (αριστερά) και διαγραμματικά (δεξιά).

Από τις σχέσεις (3.13) και (3.16) επομένως προκύπτει ότι (για μηδενικό μήκος συστολής) έχουμε μόνο απώλειες σχήματος που είναι

$$h_a = \Delta H_{a(1-2)} = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} = \frac{\rho V_2 (V_2 - V_1)}{\rho g} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} = \dots = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \quad (3.17)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις συνάγεται ότι ο συντελεστής τοπικών απωλειών K_{SE} σε απότομη διαστολή (sudden expansion—SE) είναι

$$K_{SE} = \frac{h_a}{V_1^2/2g} = \left[1 - \frac{V_2}{V_1} \right]^2 \quad (3.18)$$

και από την εξίσωση συνέχειας μπορεί να εκφραστεί με βάση τις διαμέτρους των σωλήνων D_1 και D_2 στα ανάντη και κατόντη αντίστοιχα ως

² Η αριστερή εικόνα υπήρχε δημοσιευμένη στις 2/5/2012 στην παρακάτω ιστοσελίδα: http://dalmatiagreecfall2020.blogspot.com/2010/11/greece-crete_15.html

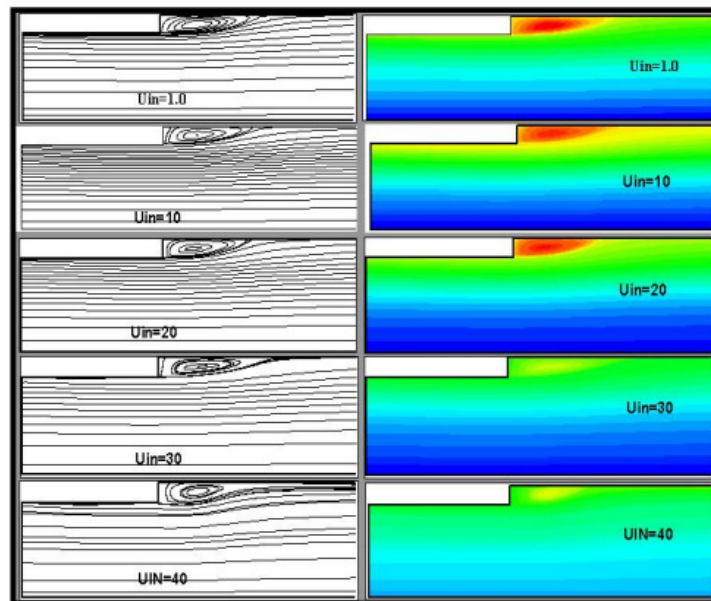
$$K_{SE} = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \Rightarrow h_a = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \frac{V_1^2}{2g} \quad (3.19)$$

Για τον υπολογισμό των απωλειών χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δεδομένα – παραδοχές:

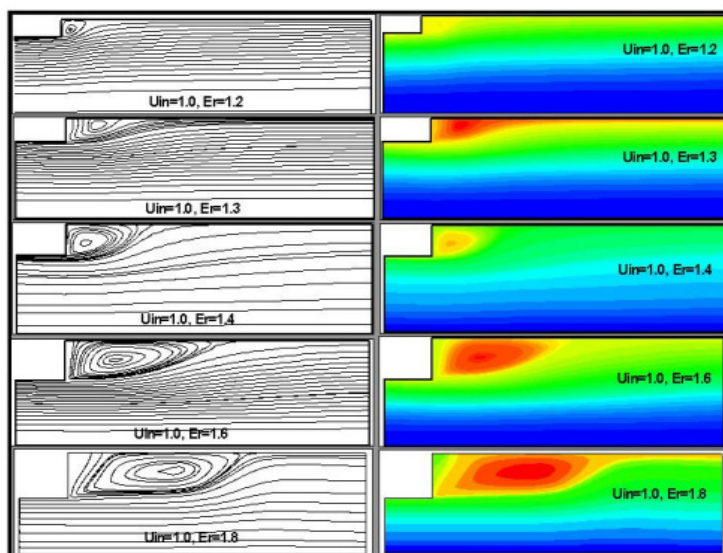
- Μέση εσωτερική διάμετρος εισόδου: $D_{in} = 0.135 \text{ m}$
- Μέση εσωτερική διάμετρος εξόδου: $D_{out} = 0.084 \text{ m}$

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω δεδομένα και κάνοντας χρήση της σχέσης (3.19) προκύπτουν οι τοπικές απώλειες σαν συνάρτηση της παροχής που φαίνονται στους πίνακες 3.1 και 3.2. Αναλυτικός τρόπος υπολογισμού υπάρχει στο παράρτημα, πίνακας Π II–7.

Μετά από μελέτη του φαινομένου της ξαφνικής διαστολής σε κυκλικό αγωγό, οι Vikram et al. (2010) κατέληξαν στο εξής συμπέρασμα. Αμέσως μετά την τοπική διαστολή δημιουργείται μια «φυσαλίδα» επανακυκλοφορίας του νερού που εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό Reynolds (Re) και το λόγο διαμέτρων της διαστολής. Το μήκος της περιοχής επανακυκλοφορίας αυξάνει όσο αυξάνεται το μέγεθος της διαστολής, ενώ μειώνεται με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Στα σχήματα 3.5 και 3.6 φαίνονται τα εν λόγω αποτελέσματα.



Σχήμα 3.5 Επιρροή ταχύτητας στο μέγεθος της φυσαλίδας επανακυκλοφορίας. (Vikram et al. 2010)



Σχήμα 3.6 Επιρροή μεγέθους απότομης διεύρυνσης στο μέγεθος της «φυσαλίδας» επανακυκλοφορίας. (Vikram 2010)

3.5 Σχολιασμός

Όπως παρατηρούμε από τους πίνακες 3.1 και 3.2 οι τιμές των γραμμικών απωλειών που προκύπτουν με αριθμητική ολοκλήρωση από τις σχέσεις των Swamme & Jain (S&J), Colebrook-White (C-W) για τραχείς σωλήνες, C-W για ενδιάμεσους σωλήνες και της γενικευμένης εξίσωσης Manning, είναι παρόμοιες μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα των σχέσεων C-W για λείους σωλήνες και αυτά από την θεωρία του Shames δίνουν μικρότερες τιμές γραμμικών απωλειών απ' ότι οι υπόλοιπες θεωρήσεις. Σε όλες τις θεωρίες οι γραμμικές απώλειες είναι περίπου το ένα τρίτο των τοπικών απωλειών.

Για τις συγκεκριμένες γραμμικές απώλειες σε ένα κολουροκωνικό τμήμα υπολογίστηκε μία αντίστοιχη θεωρητική διάμετρος που παρουσιάζει τις ίδιες απώλειες ενέργειας. Στον πίνακα 3.5 δίνεται η τιμή της μέσης διαμέτρου που προέκυψε για κάθε θεωρία. Αναλυτικός τρόπος υπολογισμού υπάρχει στους πίνακες Π II—7-12 του παραρτήματος.

Πίνακας 3.5 Σύγκριση μέσης διαμέτρου για τις διάφορες θεωρίες που μελετήθηκαν

Θεωρία	D_{ave} (m)
S&J	0.103
C-W _{λείοι}	0.120
C-W _{ενδ}	0.103
C-W _{τραχ}	0.104
Manning	0.105
Shames	0.126

4. Πειραματικές μετρήσεις

4.1 Μέτρηση παροχής στην είσοδο του αγωγού

Για τη μέτρηση της παροχής στη συστοιχία των πηλοσωλήνων χρησιμοποιήθηκε ένας μετρητής Venturi (σχήμα 4.1) και διαφορικό μανόμετρο με τετραχλωράνθρακα. Η παροχή δίνεται από τη σχέση 4.1

$$Q = 0.6233\sqrt{\Delta h} \quad (4.1)$$

όπου Δh σε mm και η παροχή δίνεται σε λίτρα ανά δευτερόλεπτο (L/s).

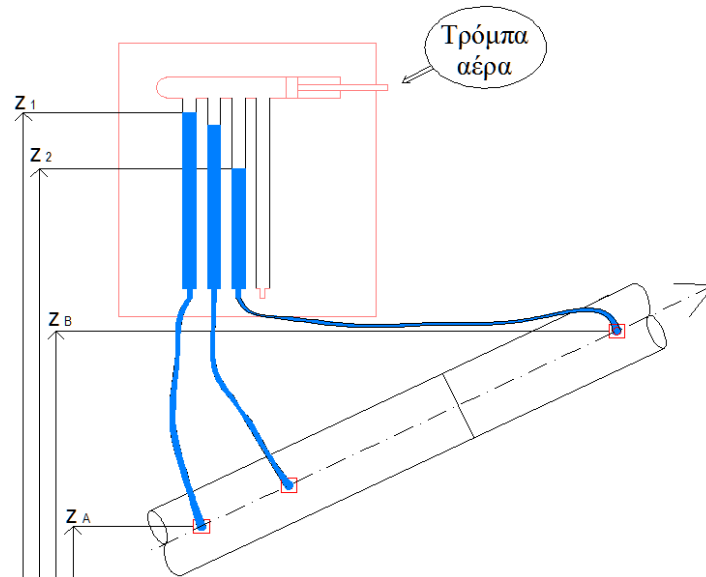


Σχήμα 4.1 Διαφορικό μανόμετρο τετραχλωράνθρακα. Η ένδειξη αντιστοιχεί στη μέγιστη παροχή που χρησιμοποιήθηκε. ($\Delta h = 522\text{mm}$ ή $Q = 14.25\text{ L/s}$)

4.2 Μέτρηση των απωλειών ενέργειας με χρήση κλειστού μανομέτρου

Τα πιεζόμετρα από δύο θέσεις στο ύψος του άξονα του αγωγού συνδέονται με διάφανους εύκαμπτους σωλήνες με μανόμετρα αέρα από δύο ή περισσότερους κατακόρυφους γυάλινους

σωλήνες, που συνδέονται έτσι ώστε να επικοινωνούν στο ανώτερο μέρος τους. Η συνδεσμολογία τριών πιεζομέτρων φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 Μέτρηση διαφοράς πίεσης μεταξύ τριών θέσεων με χρήση διαφορικού μανομέτρου με συμπιεσμένο αέρα.

Ο υπολογισμός των απωλειών ενέργειας στο διαφορικό μανόμετρο φαίνεται στη συνέχεια. Εφαρμόζουμε την εξίσωση υδροστατικής ισορροπίας μεταξύ διατομών A και B διαδοχικά. Μεταξύ (A) και (1) ο σωλήνας είναι γεμάτος με νερό και ισχύει

$$\frac{p_A}{\rho g} + z_A = \frac{p_1}{\rho g} + z_1 \Rightarrow p_A - p_1 = (z_1 - z_A)\rho g \quad (4.2)$$

Μεταξύ των διατομών (1) και (2) ο σωλήνας είναι γεμάτος αέρα και ισχύει

$$\frac{p_1}{\rho_a g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho_a g} + z_2 \Rightarrow p_1 - p_2 = (z_2 - z_1)\rho_a g \quad (4.3)$$

Μεταξύ των διατομών (2) και (B) ο σωλήνας είναι γεμάτος νερό και ισχύει

$$\frac{p_2}{\rho g} + z_2 = \frac{p_B}{\rho g} + z_B \Rightarrow p_2 - p_B = (z_B - z_2)\rho g \quad (4.4)$$

Αθροίζοντας τις παραπάνω εξισώσεις κατά μέλη προκύπτει

$$\begin{aligned} \frac{p_A - p_B}{\rho g} &= z_1 - z_A + (z_2 - z_1)\frac{\rho_a g}{\rho g} + z_B - z_2 \Rightarrow \\ \left(\frac{p_A}{\rho g} + z_A\right) - \left(\frac{p_B}{\rho g} + z_B\right) &= (z_1 - z_2)\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Το ύψος απωλειών ενέργειας ανάμεσα στις διατομές (A) και (B) του αγωγού είναι

$$H_A - H_B = \left(\frac{p_A}{\rho g} + z_A + \frac{V_A^2}{2g} \right) - \left(\frac{p_B}{\rho g} + z_B + \frac{V_B^2}{2g} \right) = (z_1 - z_2) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho} \right) + \left(\frac{V_A^2 - V_B^2}{2g} \right) \quad (4.6)$$

Εάν ο αγωγός έχει ενιαία διάμετρο τότε $V_A = V_B$ και

$$\Delta H_{(A-B)} = H_A - H_B = (z_1 - z_2) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho} \right) \approx z_1 - z_2 \quad (4.6a)$$

επειδή η πυκνότητα του αέρα είναι πολύ μικρότερη από αυτή του νερού.

Σημειώνεται ότι δεν έχουμε την δυνατότητα να μετρήσουμε την πραγματική τιμή της πίεσης σε κάθε θέση και αυτό γιατί δεν γνωρίζουμε την πίεση του αέρα που υπάρχει μέσα στο πιεζόμετρο. Αυτό όμως δεν μας εμποδίζει γιατί η πίεση του αέρα είναι ενιαία και τελικά οι διαφορές στις πιέσεις που μετρώνται είναι σωστές. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε σε κάποιες μετρήσεις, μια διακύμανση στην τιμή ανάγνωσης ύψους ± 2 cm.

4.3 Πρώτη σειρά μετρήσεων. Απώλειες φορτίου μεταξύ εισόδου και εξόδου.

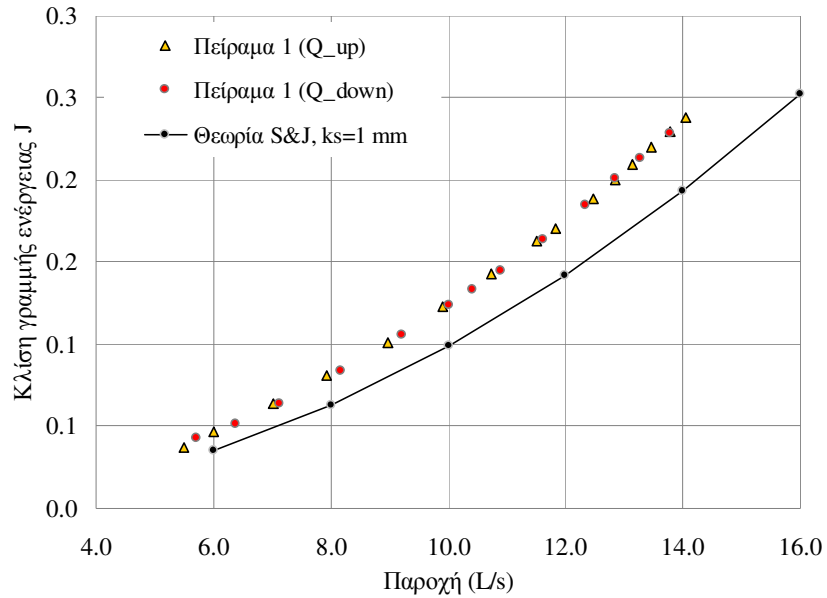
Στην πρώτη σειρά πειραμάτων μετρήθηκαν οι συνολικές απώλειες ενέργειας μεταξύ της θέσης των πιεζομέτρων στο σωλήνα PVC εισόδου και στο σωλήνα PVC εξόδου. Η θέση του πιεζομέτρου στην είσοδο βρίσκεται 5 cm πριν από τα πηλίνα τμήματα, ενώ η θέση στην έξοδο, 16.5 cm μετά την έξοδο της ροής από τον τελευταίο πηλίνο αγωγό, η δε απόσταση ανάμεσα στα δύο αυτά πιεζόμετρα είναι 4.05 m. Η θερμοκρασία νερού ήταν 13.6°C και η κινηματική συνεκτικότητα του νερού για την συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι $\nu = 1.189 \times 10^{-6}$ m²/s. Έγιναν συνολικά μετρήσεις για εικοσιοκτώ (28) διαφορετικές παροχές. Οι μετρήσεις που έγιναν με το κατακόρυφο διαφορικό μανόμετρο αέρα και η ανάλυση των δεδομένων φαίνεται στους πίνακες Π 1-2 του παραρτήματος.

Σαν δεδομένα είχαμε την υψομετρική διαφορά ΔH στο παροχομετρητή Venturi οπότε από την σχέση 4.1 υπολογίζαμε την παροχή, καθώς επίσης και την υψομετρική διαφορά Δz του νερού στα πιεζόμετρα εισόδου και εξόδου. Η διάμετρος του σωλήνα PVC εισόδου είναι $D_{in} = 0.093$ m και του σωλήνα PVC εξόδου $D_{out} = 0.119$ m. Οι ταχύτητες στους σωλήνες PVC εισόδου και εξόδου υπολογίζονται από τη σχέση $V = 4Q/(\pi D^2)$ ενώ οι απώλειες ενέργειας από την σχέση 4.6

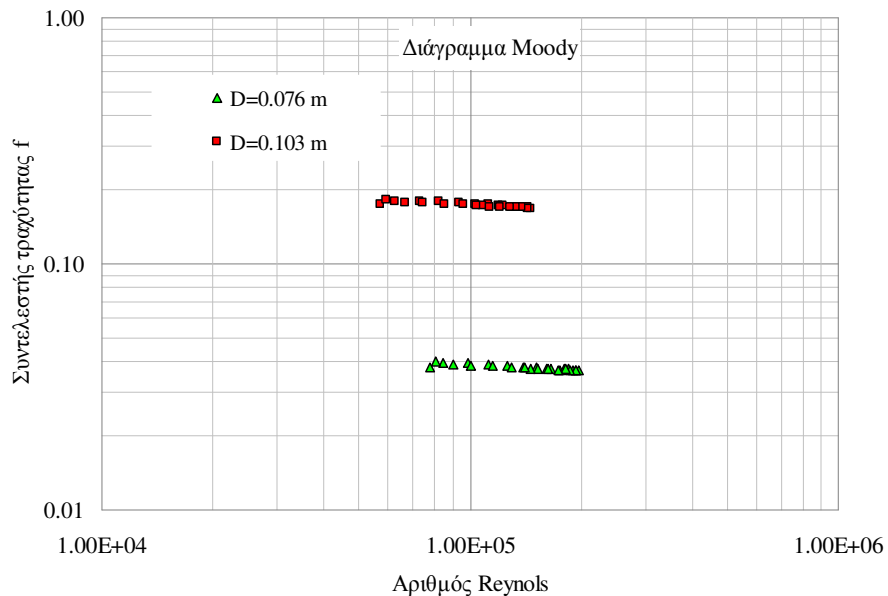
$$\Delta H = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho} \right) \Delta z + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \quad (4.7)$$

Στο σχήμα 4.2 φαίνεται η μεταβολή της κλίσης της γραμμής ενέργειας σαν συνάρτηση της παροχής $J = \Delta H/L$ για διάφορες παροχές, καθώς επίσης και η υπολογισμένη μέση κλίση αθροίζοντας τις γραμμικές απώλειες και τις τοπικές της διεύρυνσης όπως υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 3 για ισοδύναμη τραχύτητα σωλήνα 1 mm. Η μετρημένη από το πείραμα μέση κλίση απωλειών είναι αισθητά μεγαλύτερη από την υπολογισμένη θεωρητικά (συντελεστής γραμμικών απωλειών από τη σχέση των Swamme & Jain). Υπήρξαν υπόνοιες ότι πιθανά η πίεση στο σωλήνα εξόδου να είναι εσφαλμένη επειδή το πιεζόμετρο στην έξοδο απείχε περίπου 0.15 m από την έξοδο του πηλοσωλήνα, με μεγάλη πιθανότητα στην περιοχή αποκόλλησης της ροής λόγω της απότομης διεύρυνσης από 0.082 σε 0.119 m. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε η επόμενη σειρά πειραμάτων για τη σπουδή των απωλειών ενέργειας κατά μήκος ενός από τους πηλοσωλήνες.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι για ισοδύναμη διάμετρο αγωγού $D = 0.103 \text{ m}$, μήκους 4.05 m , που δίνει τις ίδιες συνολικές απώλειες με τον κολουροκωνικό, η ισοδύναμη τραχύτητα του αγωγού προκύπτει $k_s/D = 0.524$ και ο συντελεστής τριβών ισούται $f = 0.169$ (σχήμα 4.3). Επίσης, για ισοδύναμη διάμετρο αγωγού $D = 0.076 \text{ m}$, μήκους 4.05 m , που δίνει τις ίδιες συνολικές απώλειες με τον κολουροκωνικό, η ισοδύναμη τραχύτητα του αγωγού είναι $k_s/D = 0.131$ και ο συντελεστής τριβών $f = 0.037$ (σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.2 Μεταβολή της μέσης κλίσης απωλειών ενέργειας σαν συναρτήση της παροχής, μετρήσεις και υπολογισμός.



Σχήμα 4.3 Συντελεστής τραχύτητας σαν συνάρτηση της παροχής όπως προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα θεωρώντας ότι ο αγωγός έχει ενιαία διάμετρο (α) 0.103 m (τετράγωνο) και (β) 0.076 m (τρίγωνο).

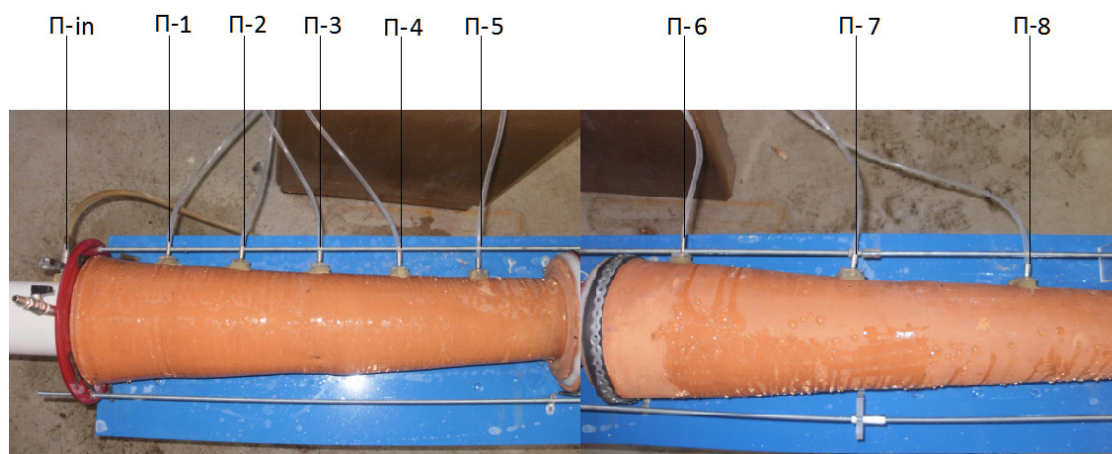
4.4 Δεύτερη σειρά μετρήσεων. Απώλειες φορτίου μεταξύ των δύο πρώτων ηλοσωλήνων.

Για τη μελέτη των απωλειών ενέργειας κατά μήκος ενός ηλοσωλήνα ήταν αναγκαία η εγκατάσταση πιεζομέτρων κατά μήκος της στάθμης του άξονα του σωλήνα. Εγκαταστάθηκαν οκτώ (8) πιεζόμετρα κατά μήκος των δύο πρώτων ηλοσωλήνων (σχήμα 4.4) Στον πίνακα 4.1 δίνεται η απόσταση του κάθε πιεζόμετρου από το πρώτο καθώς και η εσωτερική διάμετρος του αγωγού σε κάθε θέση.

Μετρήθηκαν οι πιεζομετρικές στάθμες στις εννέα θέσεις των πιεζομέτρων για εικοσιμία (21) συνολικά διαφορετικές παροχές. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν από παροχή 8.50 L/s, στη συνέχεια η παροχή αυξανόταν σταδιακά μέχρι τα 14.25 L/s και τέλος μειωνόταν σταδιακά μέχρι τα 5.50 L/s. Οι μετρήσεις βρίσκονται στο παράρτημα πίνακας Π Ι—3

Πίνακας 4.1 Θέσεις και εσωτερική διάμετρος πιεζομέτρων για το δεύτερο πείραμα.

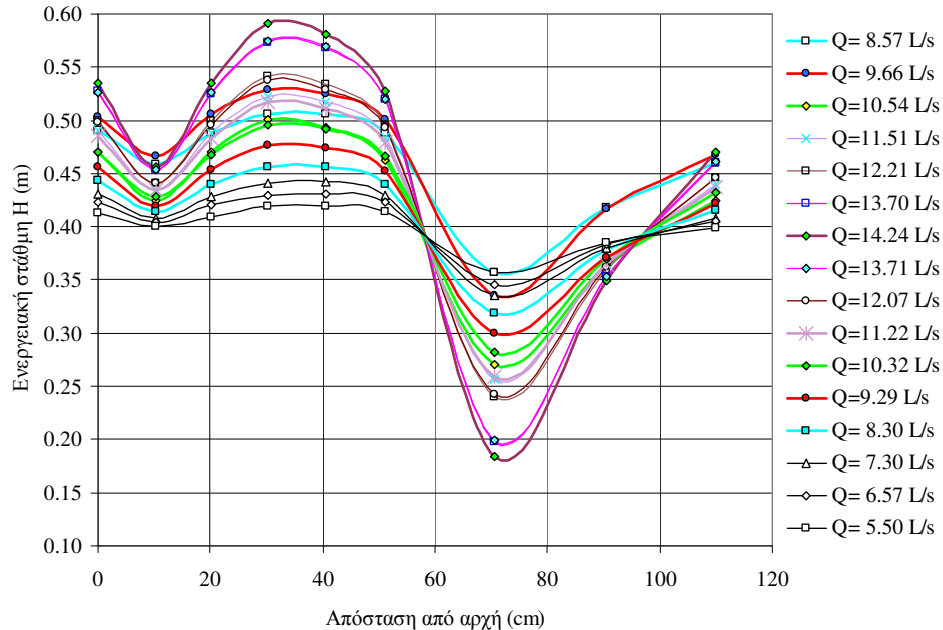
Πιεζόμετρο	Π_in	Π-1	Π-2	Π-3	Π-4	Π-5	Π-6	Π-7	Π-8
Απόσταση (cm)	0	10.2	20.1	30.35	40.6	51	70.5	90.5	110
Διάμετρος (m)	0.093	0.130	0.121	0.114	0.103	0.092	0.142	0.131	0.092



Σχήμα 4.4 Θέσεις πιεζομέτρων για το δεύτερο πείραμα.

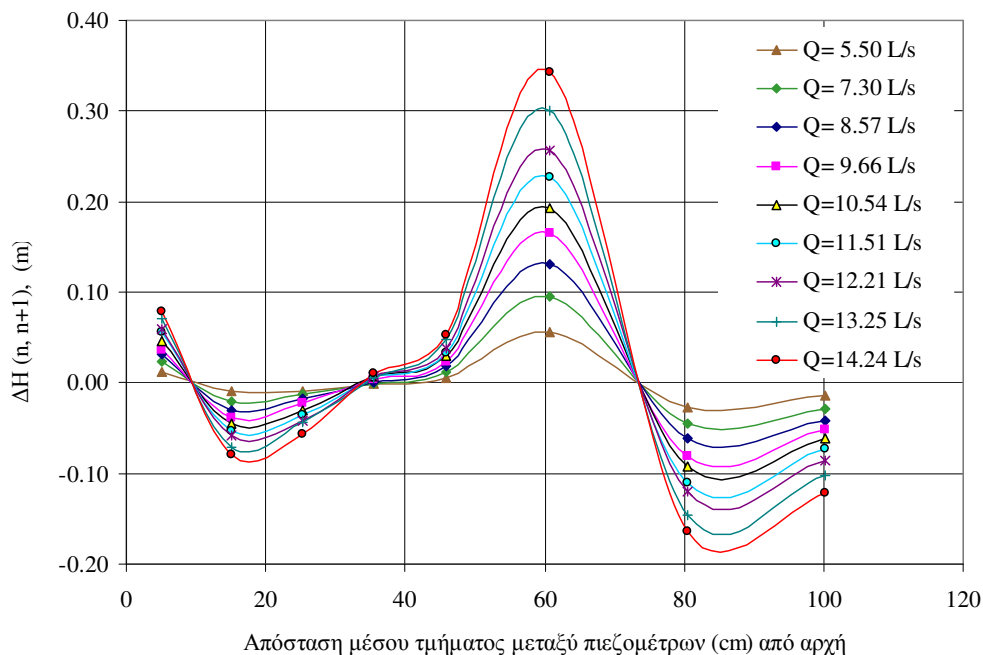
Στο διάγραμμα του σχήματος 4.5 φαίνονται οι γραμμές ενέργειας με βάση τις μετρημένες πιέσεις και τις υπολογισμένες μέσες ταχύτητες στις διατομές των πιεζομέτρων. Η γραμμή ενέργειας για κάθε θέση προκύπτει από την εξίσωση 4.6. Οι υπολογισμοί για το διάγραμμα του σχήματος 4.5 βρίσκονται στο παράρτημα στον πίνακα Π Ι—5. Παρατηρούμε ότι η γραμμή ενέργειας στα πιεζόμετρα 3, 4 και 5 βρίσκεται υψηλότερα απ' ότι στο πιεζόμετρο εισόδου για

το σύνολο των παροχών, πράγμα που δημιουργεί την υποψία περί αποκόλλησης της ροής και εσφαλμένης μέτρησης στο πιεζόμετρο της εισόδου. Παρατηρούμε επίσης ότι για παρόμοιες παροχές 8 – 10 L/s οι γραμμές ενέργειας διαφέρουν σημαντικά όταν μετρούνταν κατά τη διαδικασία αύξησης ή ελάττωσης της παροχής, πράγμα που δεν συνέβαινε για μεγαλύτερες παροχές.



Σχήμα 4.5 Γραμμή ενέργειας κατά μήκος των δύο πρώτων πηλοσωλήνων για διαφορετικές παροχές.

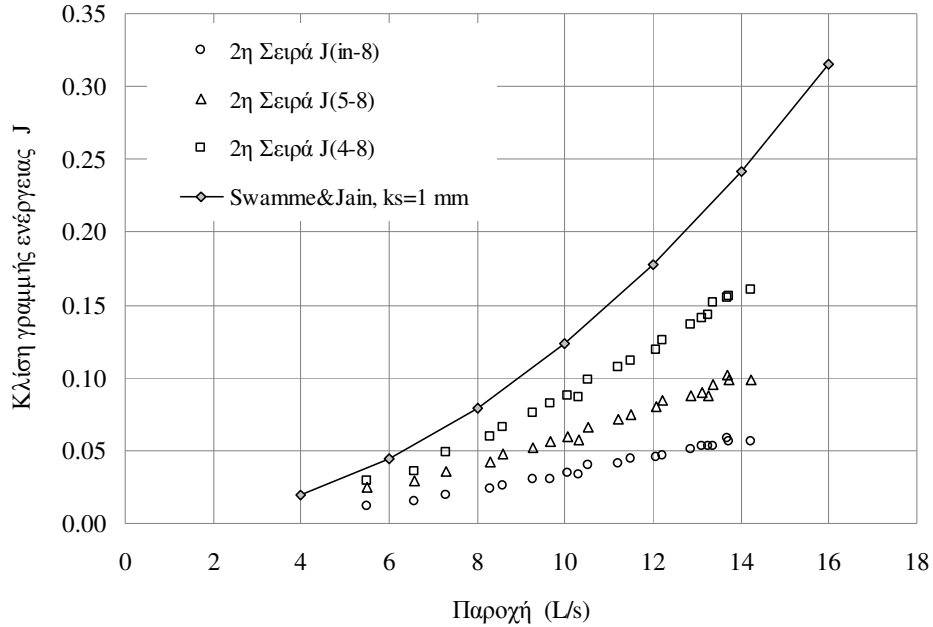
Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζονται οι απώλειες ενέργειας ανάμεσα σε δύο διαδοχικά πιεζόμετρα για διαφορετικές παροχές. Παρατηρούμε ότι μεταξύ των πιεζομέτρων (Π-1, Π-2) (Π-2, Π-3), (Π-6, Π-7) και (Π-7, Π-8) οι απώλειες ενέργειας είναι αρνητικές, πράγμα που σημαίνει εσφαλμένη μέτρηση της πίεσης που έχει γίνει σε περιοχή αποκόλλησης της ροής. Οι υπολογισμοί εκ των οποίων προκύπτει το διάγραμμα του σχήματος 4.6 βρίσκονται στο παράρτημα πίνακας Π Ι-6.



Σχήμα 4.6 Απώλειες ενέργειας μεταξύ δύο διαδοχικών πιεζομέτρων.

Επίσης συγκρίνοντας την κλίση (J) της γραμμής ενέργειας μεταξύ των αποτελεσμάτων του δεύτερου πειράματος και των θεωρητικών (Swamme & Jain), βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα του δεύτερου πειράματος αποκλίνουν αρκετά από τα θεωρητικά. Συγκεκριμένα η μέση κλίση της γραμμής ενέργειας ανάμεσα στο πιεζόμετρο εισόδου και στο Π-8 είναι μικρότερη απ' ό τι αυτή μεταξύ των πιεζομέτρων Π-5 και Π-8, που με τη σειρά της, είναι μικρότερη αυτής μεταξύ των πιεζομέτρων Π-4 και Π-8. Η τελευταία βρίσκεται πλησιέστερα στη μέση κλίση που προέκυψε θεωρητικά. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί φαίνονται στον πίνακα Π 1-7 του παραρτήματος.

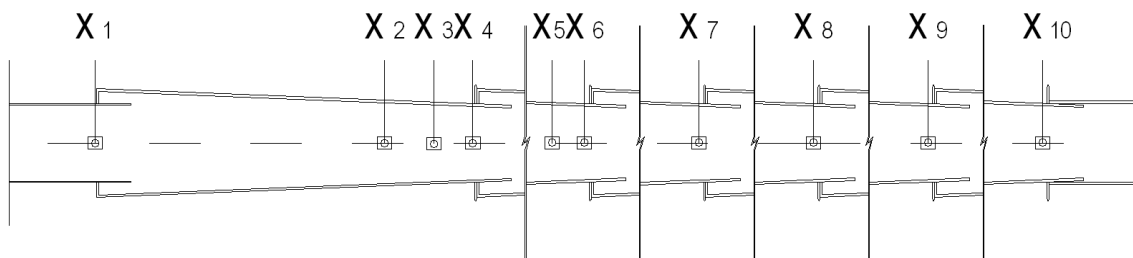
Συμπερασματικά, είναι προφανές ότι και η δεύτερη σειρά των πειραμάτων δεν έδωσε αποτελέσματα από τα οποία να μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για τις απώλειες ενέργειας. Για το λόγο αυτό προχωρήσαμε στο σχεδιασμό και υλοποίηση μιας τρίτης σειράς μετρήσεων κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού.



Σχήμα 4.7 Κλίση γραμμής ενέργειας σαν συνάρτηση της παροχής: (α) κύκλοι μεταξύ εισόδου και εξόδου, (β) τρίγωνα μεταξύ πιεζομέτρων στο πέρας του πρώτου και πέρας του δεύτερου αγωγού, (γ) τετράγωνα μεταξύ προτελευταίου πιεζομέτρου του πρώτου και πέρας του δεύτερου αγωγού.

4.5 Τρίτη σειρά μετρήσεων. Απώλειες κατά μήκος και των έξι πηλοσωλήνων.

Οι μετρήσεις που έγιναν στη δεύτερη σειρά των πειραμάτων έδειξαν ότι με βάση την πιεζομετρία στους δύο πρώτους πηλοσωλήνες δεν ήταν δυνατή η μέτρηση των απωλειών ενέργειας με ακρίβεια. Για το λόγο αυτό οργανώθηκε μια τρίτη σειρά πειραμάτων με την οποία θα ήταν δυνατή μια ακριβέστερη εκτίμηση των συνολικών απωλειών ενέργειας ανά μονάδα μήκους. Για το λόγο αυτό στο πέρας του κάθε πηλοσωλήνα και στο ύψος του άξονα διανοίχθηκε πιεζομετρική οπή. Έτσι, από το πέρας του 1^{ου} πηλοσωλήνα μέχρι το πέρας του 6^{ου}, μπορούσαμε να μετρήσουμε είτε τις συνολικές, γραμμικές και τοπικές απώλειες σε μήκος πέντε (5) πηλοσωλήνων, είτε τις συνολικές απώλειες ανάμεσα σε δύο, τρεις ή τέσσερις πηλοσωλήνες για σύγκριση, επειδή εκτιμήθηκε ότι θα υπήρχαν διαφορές λόγω του ότι ήταν χειροποίητοι. Οι θέσεις των πιεζομέτρων όπου μετρήθηκαν οι πιέσεις με το διαφορικό μανόμετρο πιεσμένου αέρα, φαίνονται στο παρακάτω σκαρίφημα. (σχήμα 4.8), ενώ στον πίνακα 4.2 δίνεται η απόσταση του κάθε πιεζομέτρου από το πρώτο καθώς και η εσωτερική διάμετρος του αγωγού σε κάθε θέση.



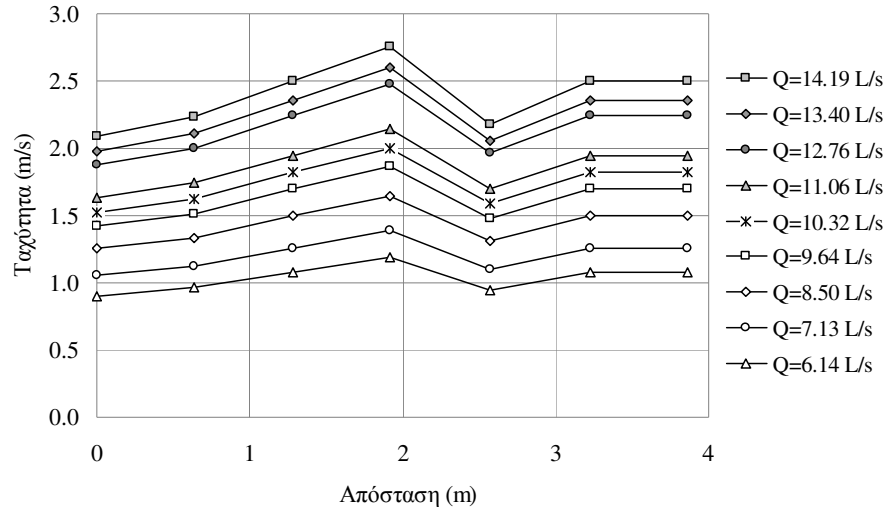
Σχήμα 4.8 Θέσεις πιεζόμετρων για το τρίτο πείραμα.

Πίνακας 4.2 Θέσεις και εσωτερική διάμετρος πιεζομέτρων για το τρίτο πείραμα.

Πιεζόμετρο	Π-1	Π-2	Π-3	Π-4	Π-5	Π-6	Π-7	Π-8	Π-9	Π-10
Απόσταση (m)	0.000	0.457	0.562	0.634	1.155	1.279	1.914	2.571	3.230	3.867
Διάμετρος (m)	0.093	0.103	0.092	0.085	0.092	0.085	0.081	0.091	0.085	0.085

Από τις παραπάνω θέσεις λάβαμε υπόψη όλες τις μετρήσεις εκτός των θέσεων X_2 , X_3 και X_5 . Αυτό έγινε για να είμαστε σίγουροι ότι δεν υπάρχει αποκόλληση στην περιοχή του πιεζομέτρου, δηλαδή πιθανότητα λανθασμένης μέτρησης της πιεζομετρικής γραμμής. Συνολικά λήφθηκαν μετρήσεις πιεζομετρικής γραμμής για εικοσιτέσσερις (24) διαφορετικές παροχές από 6 έως 14 L/s. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων αρχικά αυξάναμε σταδιακά την παροχή μέχρι τη μέγιστη και στη συνέχεια τη μειώναμε σταδιακά. Για λόγους ευκρίνειας των διαγραμμάτων δεν θα τοποθετηθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων για όλες τις παροχές αλλά για ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα από αυτές. Οι μετρήσεις που προέκυψαν από τα πειράματα βρίσκονται στο παράρτημα, πίνακας Π Ι—8.

Από το διάγραμμα του σχήματος 4.9 φαίνεται η μεταβολή της μέσης ταχύτητας στις θέσεις των πιεζομέτρων X_1 , X_4 , X_6 , X_7 , X_8 , X_9 και X_{10} σαν συνάρτηση της παροχής. Οι ταχύτητες υπολογίστηκαν από την σχέση $V = 4Q/(\pi D^2)$ όπου D είναι η διάμετρος του σωλήνα στη θέση του πιεζομέτρου. Σημειώνεται ότι δεν μετρήθηκε η μέση διάμετρος της διατομής επειδή όταν διανοίχθηκαν οι οπές των πιεζομέτρων είχαν ήδη μονταριστεί οι πηλοσωλήνες, αλλά η διάμετρος που αντιστοιχεί στη θέση του πιεζομέτρου. Εκτιμάται ότι η μέτρηση της διαμέτρου δεν είναι δυνατόν να διαφέρει σημαντικά από τη μέση διάμετρο, δεδομένου του τρόπου κατασκευής των πηλοσωλήνων πάνω σε περιστρεφόμενη τράπεζα. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται στην θέση X_7 για όλες τις παροχές, δεδομένου ότι στο σημείο αυτό εμφανίζεται η μικρότερη διάμετρος. Ο υπολογισμός των ταχυτήτων του παρακάτω διαγράμματος φαίνεται στον πίνακα Π Ι—9 του παραρτήματος.



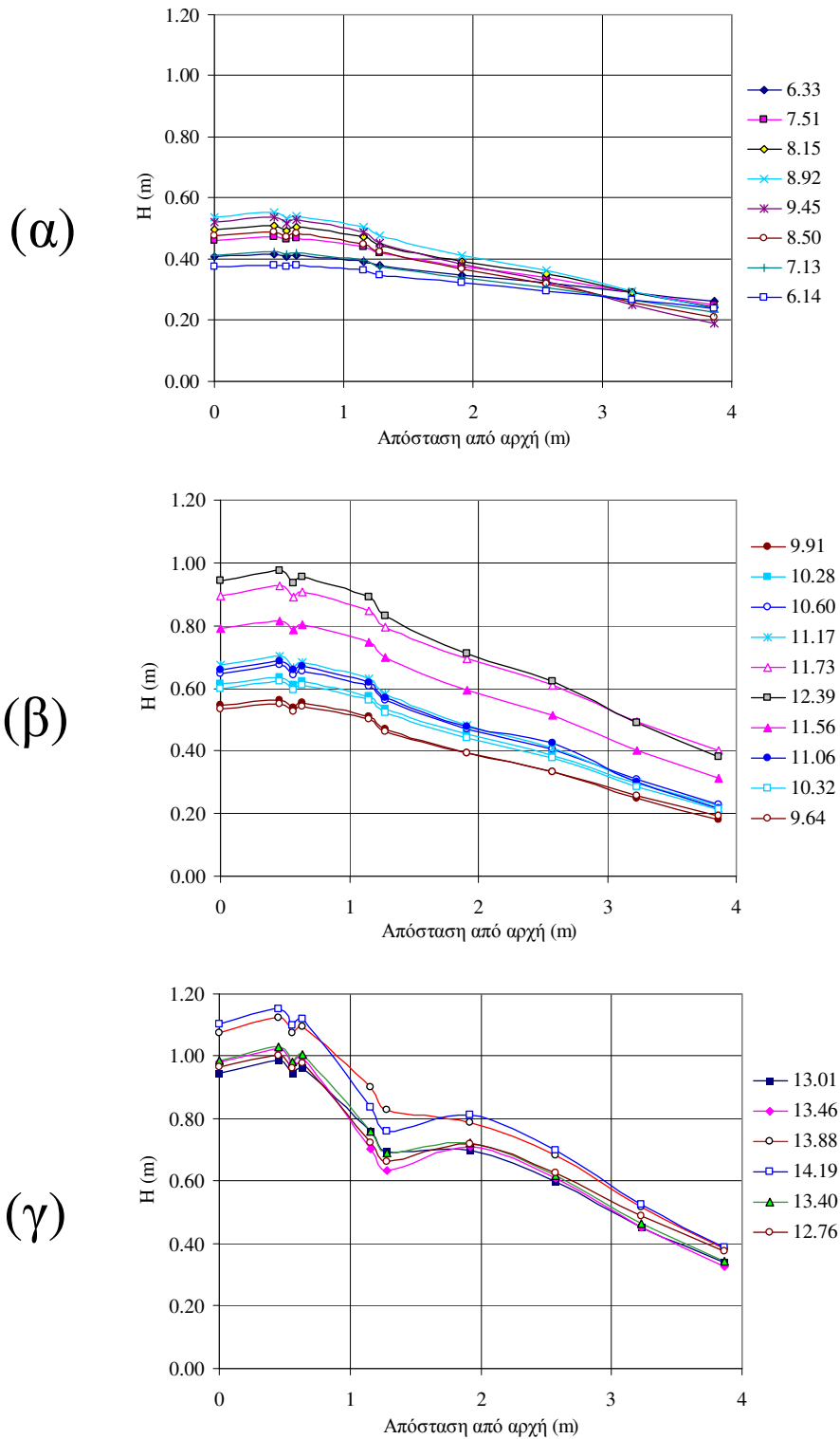
Σχήμα 4.9 Κατανομή μέσης ταχύτητας στη θέση των πιεζομέτρων κατά μήκος και των έξι πηλοσωλήνων.

Στα διαγράμματα του σχήματος 4.10 φαίνεται η γραμμή ενέργειας κατά μήκος της συστοιχίας των πηλοσωλήνων για μικρές, μεσαίες και μεγάλες παροχές. Η τιμή του ύψους ενέργειας για κάθε θέση υπολογίστηκε από την σχέση 4.6. Όλοι οι υπολογισμοί βρίσκονται στον πίνακα Π Ι—10 του παραρτήματος.

Είναι εμφανές ότι το ύψος της γραμμής ενέργειας στο πιεζόμετρο εισόδου είναι μικρότερο από αυτό στη θέση X_2 . Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η αποκόλληση της ροής που εμφανίζεται στη συστολή του αγωγού εισόδου από 0.125 m σε 0.093 m, 50 cm περίπου πριν το πιεζόμετρο εισόδου. Επομένως, στους υπολογισμούς μας πρέπει να αγνοηθεί ο πρώτος στη σειρά πηλοσωλήνας.

Στις μεγάλες παροχές (>12.50 L/s) το ύψος της γραμμής ενέργειας στα πιεζόμετρα X_5 και X_6 είναι μικρότερο από το αμέσως επόμενο πιεζόμετρο στο πέρας του 3^{ου} στη σειρά πηλοσωλήνα, πράγμα που σημαίνει η περιοχή μέτρησης της πίεσης φαίνεται να παρουσιάζει αποκόλληση, με αποτέλεσμα τη μειωμένη τιμή της πίεσης εκεί. Επομένως, στους υπολογισμούς μας ο τρίτος στη σειρά πηλοσωλήνας πρέπει να μην ληφθεί υπόψη στις μεγάλες παροχές.

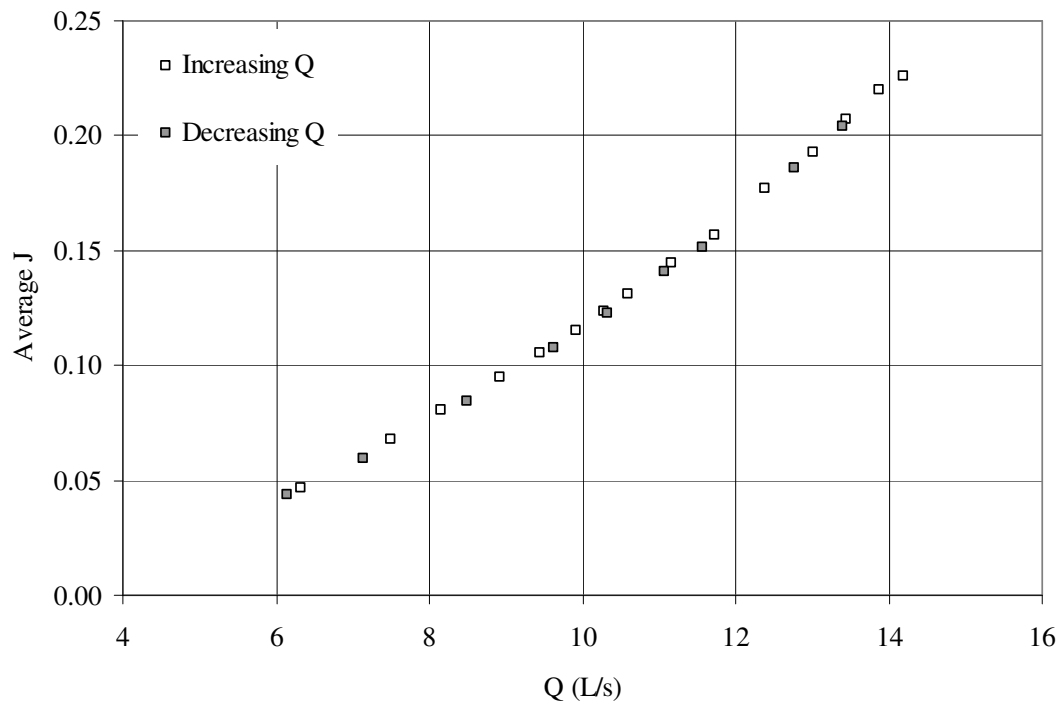
Στις μικρές και μεσαίες παροχές φαίνεται ότι η κλίση της γραμμής ενέργειας είναι περίπου σταθερή σε ολόκληρο το μήκος στα κατάντη του πρώτου πηλοσωλήνα, πράγμα που σημαίνει ότι οι συνολικές απώλειες φορτίου ανά μονάδα μήκους του αγωγού μπορούν να υπολογιστούν από τις απώλειες ενέργειας ανάμεσα στο τέταρτο και δέκατο πιεζόμετρο, που απέχουν μεταξύ τους 3.23 m, δηλαδή όσο είναι το συνολικό μήκος 5 πηλοσωλήνων. Παρ' όλα αυτά η μέση κλίση απωλειών ενέργειας που θα προκύψει από τους πέντε πηλοσωλήνες, θα συγκριθεί με αυτή σε ένα, δύο, τρεις ή τέσσερις στη σειρά.



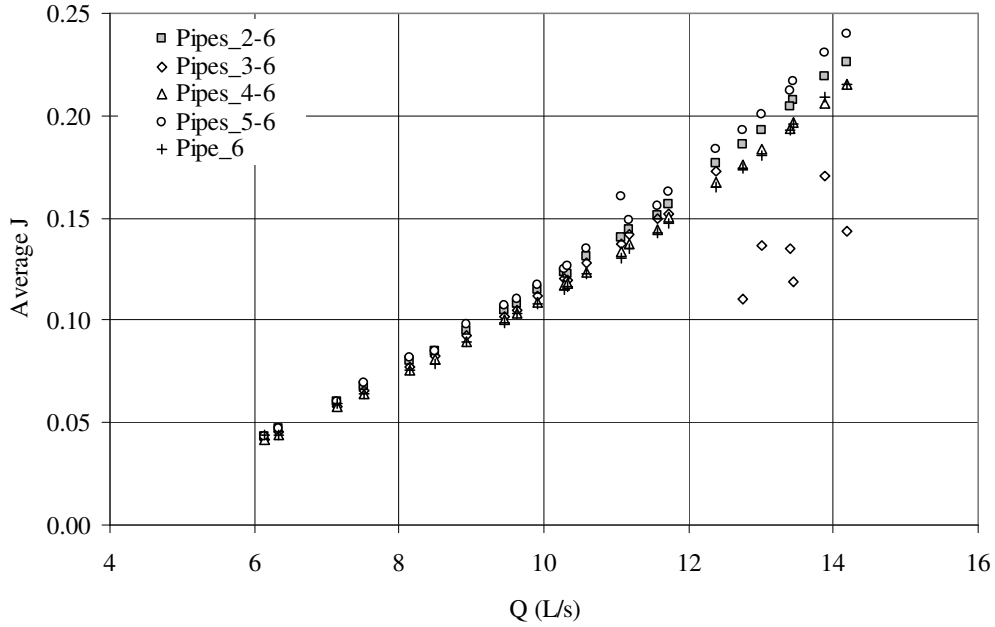
Σχήμα 4.10 Μεταβολή γραμμής ενέργειας κατά μήκος των έξι πηλοσωλήνων στις θέσεις $X=0, 0.46, 0.56, 0.63, 1.16, 1.28, 1.91, 2.57, 3.23$ και 3.87 m από το πιεζόμετρο εισόδου. (α) Μικρές παροχές (6 – 9.5 L/s), (β) Παροχές μεσαίου μεγέθους (9.5 – 12.5 L/s) και (γ) Μεγάλες παροχές (> 12.5 L/s).

Στο σχήμα 4.11 φαίνεται η μέση κλίση απωλειών ενέργειας στους πέντε (5) πηλοσωλήνες σαν συνάρτηση της παροχής, όπου αρχικά την αυξάναμε σταδιακά μέχρι τη μέγιστη και στη συνέχεια τη μειώναμε σταδιακά. Η αυξομείωση της παροχής επιτυγχάνονταν με τις δύο βάνες ελέγχου, πριν από την είσοδο και μετά την έξοδο από τη συστοιχία των πηλοσωλήνων. Δεν παρατηρούνται διαφορές λόγω αυξομείωσης της παροχής. Στο σχήμα 4.12 φαίνεται η μέση κλίση απωλειών ενέργειας σε σύγκριση με αυτή που μετρήθηκε στους τέσσερις (4), τρεις (3), δύο (2) και ένα (τον τελευταίο) πηλοσωλήνα. Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη κλίση απωλειών εμφανίζεται στους δύο τελευταίους πηλοσωλήνες (5^ο και 6^ο), ενώ η μικρότερη στον 6^ο καθώς επίσης και στους τελευταίους τρεις (4^ο, 5^ο, 6^ο). Στον 6^ο η μείωση της κλίσης των απωλειών είναι συνέπεια των αυξημένων διαστάσεων του σωλήνα σε σχέση με τους άλλους, ενώ στους τρεις τελευταίους οφείλεται πιθανά στην αποκόλληση της ροής στον 4^ο πηλοσωλήνα, πράγμα που είναι εμφανές από τα διαγράμματα των σχημάτων 4.10(γ) και 4.12 όταν η παροχή υπερβαίνει τα 12 L/s.

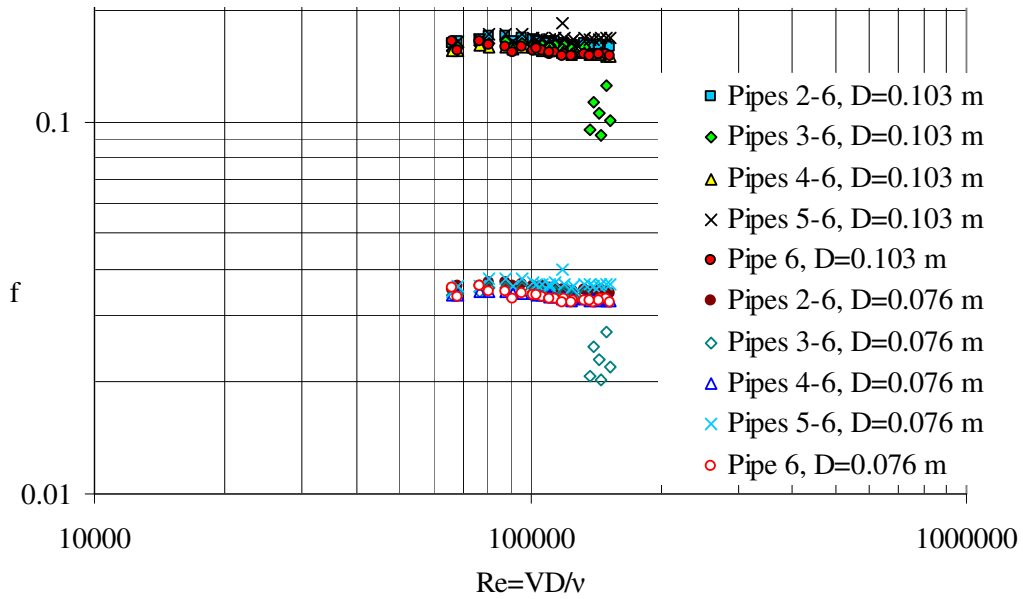
Τέλος στο διάγραμμα του σχήματος 4.13 παρουσιάζεται ο συντελεστής των γραμμικών απωλειών συστοιχίας 5, 4, 3, 2 ή 1 πηλοσωλήνων σαν συνάρτηση του αριθμού Reynolds της ροής, σε περίπτωση που σαν μέση διάμετρο θεωρήσουμε αυτή που προέκυψε από τη μέση θεωρητική κλίση γραμμικών απωλειών ενός κολουροκωνικού σωλήνα δηλαδή 0.103 m ($f \approx 0.160$ για 5 πηλοσωλήνες), ή αυτή που προέκυψε από τη μέση θεωρητική κλίση συνολικών απωλειών ενός κολουροκωνικού σωλήνα δηλαδή 0.076 m ($f \approx 0.035$ για 5 πηλοσωλήνες). Αναλυτικός υπολογισμός των διαγραμμάτων στα σχήματα 4.11-4.13 υπάρχει στους πίνακες Π 11-12 του παραρτήματος



Σχήμα 4.11 Μεταβολή της μέσης κλίσης γραμμής ενέργειας κατά μήκος των πέντε πηλοσωλήνων σαν συνάρτηση της παροχής.



Σχήμα 4.12 Μεταβολή της μέσης κλίσης γραμμής ενέργειας κατά μήκος των τελευταίων πέντε, τεσσάρων, τριών, δύο και ενός πηλοσωλήνων σαν συνάρτηση της παροχής.

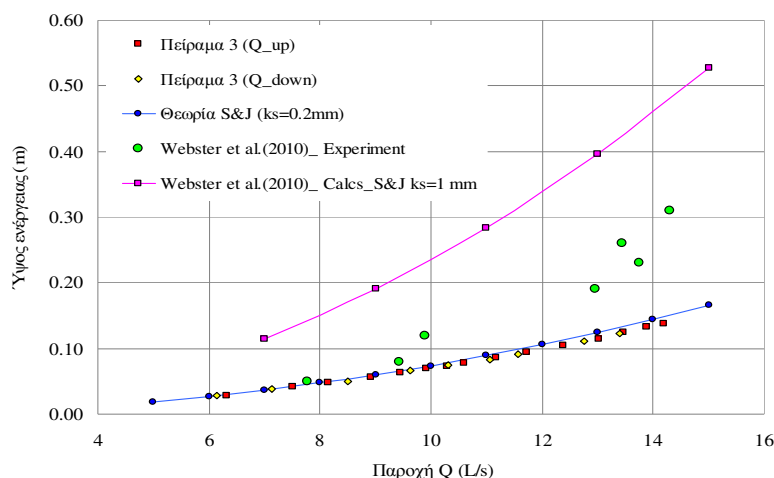


Σχήμα 4.13 Μεταβολή του συντελεστή γραμμικών απωλειών ενέργειας ισοδύναμου αγωγού διαμέτρων 0.103 m και 0.076 m, κατά μήκος των τελευταίων πέντε, τεσσάρων, τριών, δύο και ενός πηλοσωλήνων σαν συνάρτηση του ισοδύναμου αριθμού Reynolds.

5. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με αυτών των Webster et al. (2010).

Οι Webster et al. (2010) από το Πολυτεχνείο της Μελβούρνης μέτρησαν τις απώλειες ενέργειας σε μοντέλο του μινωικού υδραγωγείου αποτελούμενο από μία οριζόντια συστοιχία τεσσάρων κολουροκωνικών σωλήνων. Όπως αναφέρουν και στην εργασία τους δεν είχαν αρκετό χρόνο στην διάθεση τους για το πείραμα και επιφυλάσσονται για περαιτέρω μελέτη στο μέλλον. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 5.1 συγκρινόμενα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας καθώς και με τα αποτελέσματα από τους θεωρητικούς υπολογισμούς του κεφαλαίου 3. Οι υπολογισμοί βρίσκονται στο παράρτημα πίνακας Π II–15. Η διαφορά στις δύο θεωρητικές καμπύλες οφείλεται στη διαφορετική γεωμετρία των κολουροκωνικών τμημάτων. Ασχέτως με αυτό παρουσιάζεται ασυμβατότητα στα αποτελέσματα των μετρήσεων τους σε σχέση με τα αποτελέσματα από την θεωρητική επίλυση που κάναμε σύμφωνα με το κεφάλαιο 3 του παρόντος, για αγωγό μήκους 0.81 m και διαμέτρους εισόδου και εξόδου 0.15 και 0.07 m αντίστοιχα.



Σχήμα 5.1 Απώλειες ενέργειας για ένα τμήμα αγωγού (Εκτος πηλοσωλήνας).

5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων με αριθμητικό μοντέλο (CFD)

Οι Tseropoulos, et al. (2012) ερευνητές της Πολυτεχνικής Σχολής της Πάτρας, ασχολήθηκαν με την υπολογιστική προσομοίωση του μοντέλου ενός Μινωικού κολουροκωνικού σωλήνα. Ως διαστάσεις αγωγού είχαν τις εξής. Διάμετρο εισόδου $D_{in}= 0.170$ m, διάμετρο εξόδου $D_{out}= 0.085$ m και συνολικό μήκος σωλήνα $L=0.72$ m. Ο λόγος $Y=D_{out}/D_{in} = 0.5$.

Η εργασία τους είχε την παρακάτω δομή. Σε πρώτη φάση μελέτησαν τέσσερις αγωγούς με λόγους διαμέτρων εξόδου – εισόδου ίσους προς 1:1, 2:3, 1:2 και 1:4 για σταθερή παροχή ίση με 10 L/s. Σαν αποτελέσματα δίνουν την πιεζομετρική διαφορά μεταξύ διατομής εισόδου και εξόδου, καθώς και τον συντελεστή αντίστασης. Μετά τους πρώτους υπολογισμούς διατήρησαν μόνο τον σωλήνα με λόγο διαμέτρων 1:2 και υπολόγισαν τις απώλειες πίεσης στο συγκεκριμένο τμήμα και τον συντελεστή αντίστασης για διάφορες παροχές. Τέλος για τη μελέτη της επίδρασης της γωνίας του αγωγού ως προς το οριζόντιο επίπεδο στις απώλειες ενέργειας, για σταθερή παροχή ίση με 10 L/s υπολόγισαν τις απώλειες πίεσης και τον συντελεστή αντίστασης για διαφορετικές γωνίες.

Οι αγωγοί που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα εργασία έχουν ένα μέσο λόγο διαμέτρων 0.62, δηλαδή πιο κοντά στο δεύτερο λόγο που μελέτησαν οι Tseropoulos et al. (2012). Οι συνολικές απώλειες για το τμήμα του αγωγού που μετρήσαμε είναι $\Delta p= 0.069$ m για παροχή 9.91 L/s. Οι παραπάνω ερευνητές δίνουν για αγωγό με λόγο διαμέτρων $Y= 2:3$, διαφορά πίεσης ίση με 424.890 Pa όταν η παροχή στο σωλήνα είναι 10 L/s. Ισχύει ότι

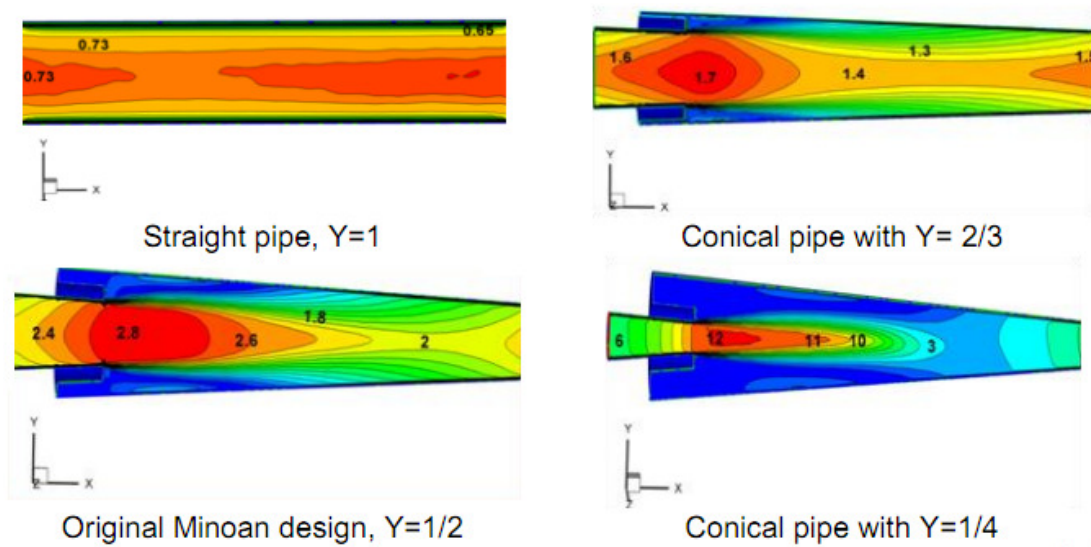
$$1Pa = 1 \frac{N}{m^2} = 1 \frac{kg \times m}{s^2 \times m^2} \quad (5.1)$$

Έτσι για έναν αγωγό έχουμε:

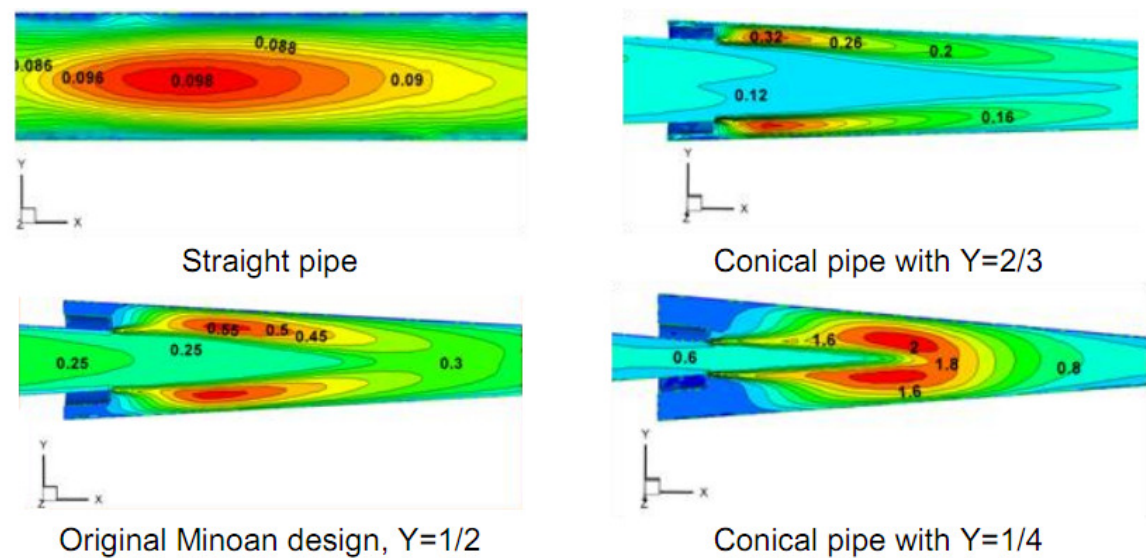
$$\Delta p = 424.890Pa \Rightarrow \Delta p = \frac{424.890 \frac{N}{m^2}}{998 \frac{kg}{m^3} \times 9.81 \frac{m}{s}} = \frac{424.890 \frac{kg \times m}{m^2 \times s^2}}{998 \frac{kg}{m^3} \times 9.81 \frac{m}{s^2}} = 0.043m \quad (5.2)$$

Από τα παραπάνω φαίνεται πως υπάρχει μια μικρή απόκλιση ανάμεσα στις δύο υπολογισμένες τιμές της διαφοράς πίεσης. Αυτή ίσως οφείλεται στο διαφορετικό λόγο διαστάσεων εισόδου - εξόδου που έχουν χρησιμοποιηθεί στις δύο εργασίες καθώς και στην ακρίβεια των πειραματικών μετρήσεων ή την εκτίμηση των συντελεστών της υπολογιστικής προσομοίωσης.

Οι Tseropoulos et al (2012), δίνουν επίσης και μια οπτικοποιημένη μορφή των ταχυτήτων μέσα στους αγωγούς. Τα αποτελέσματα του σχήματος 5.2 αναφέρονται σε παροχή 10 L/s. Για όλες τις περιπτώσεις βλέπουμε ότι οι μέγιστες ταχύτητες εμφανίζονται στην διατομή εξόδου, ενώ οι μικρότερες στις περιοχές όπου δημιουργείται η περιοχή επανακυκλοφορίας. Βλέπουμε ότι η «φυσαλίδα» επανακυκλοφορίας καταλαμβάνει μια μεγάλη έκταση κατά μήκος του αγωγού, πράγμα που συναντήσαμε και στη δεύτερη σειρά των πειραματικών μετρήσεων της παρούσας εργασίας. Επί πλέον, όσο αυξάνεται ο λόγος των διαμέτρων, τόσο αυξάνονται και οι τιμές των ταχυτήτων ροής που εμφανίζονται. Στο σχήμα 5.3 φαίνεται η επιρροή της γεωμετρίας στην ένταση της τύρβης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος διαμέτρων Y , τόσο μεγαλύτερη διαταραχή υπάρχει μέσα στον σωλήνα.



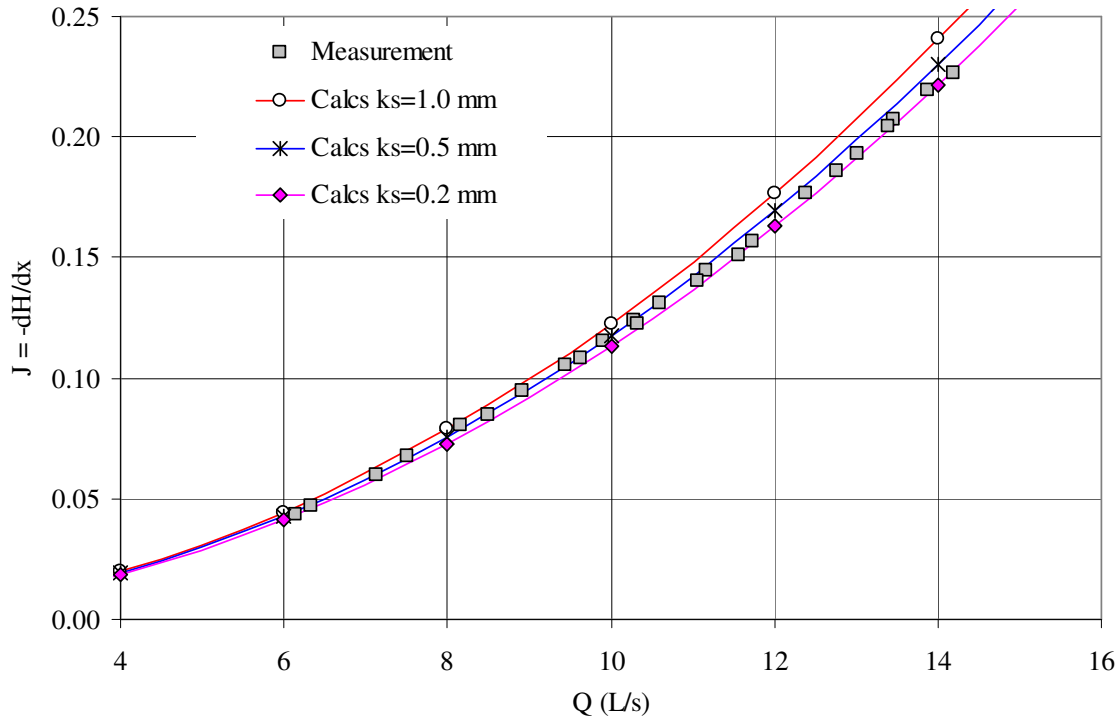
Σχήμα 5.2 Επίδραση της γεωμετρίας στην κατανομή ταχυτήτων για παροχή 10 L/s.



Σχήμα 5.3 Επίδραση της γεωμετρίας στην ένταση της τύρβης για παροχή 10 L/s.

5.3 Ανάλυση ευαισθησίας

Με χρήση της σχέσης των Swamme & Jain υπολογίστηκε η μεταβολή της κλίσης της γραμμής ενέργειας για τρεις διαφορετικές τιμές τραχύτητας. Ο υπολογισμός των γραμμικών απωλειών έγινε σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3.1. Τα θεωρητικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του τρίτου πειράματος για ισοδύναμο μήκος αγωγού. Από το διάγραμμα του σχήματος 5.4 βλέπουμε ότι η τραχύτητα των αγωγών υπολογίζεται μεταξύ $k_s \sim 0.2-0.5$ mm. Οι υπολογισμοί για το παρακάτω διάγραμμα βρίσκονται στο παράρτημα στους πίνακες Π II–16-18.



Σχήμα 5.4 Κλίση γραμμής ενέργειας ως συνάρτηση της παροχής για διάφορες τιμές τραχύτητας

5.4 Διερεύνηση ξαφνικής διεύρυνσης

Από τα αποτελέσματα του θεωρητικού υπολογισμού των απωλειών, παρατηρήθηκε ότι το μέγεθος των τοπικών απωλειών μεταβάλλεται πολύ όταν υπάρξει μεταβολή της τάξης χιλιοστών στις δύο διαμέτρους (εισόδου-εξόδου). Γνωρίζοντας τις τιμές των ολικών απωλειών του τρίτου πειράματος καθώς και τις γραμμικές απώλειες από την ανάλυση ευαισθησίας που έγινε, προχωρήσαμε σε μία αντίστροφη διαδικασία για τον ακριβή υπολογισμό των τοπικών απωλειών για μία ξαφνική διεύρυνση. Έπειτα γνωρίζοντας το μέγεθός των τοπικών απωλειών και θεωρώντας διαδοχικά μία διάμετρο κάθε φορά γνωστή, προσδιορίστηκε η άλλη διάμετρος ώσπου οι διαφορές στα αποτελέσματα να είναι αμελητέες. Έτσι καταλήξαμε στις τιμές του πίνακα 5.1. Η διάμετρος D_1 αντιστοιχεί με την διάμετρο πριν τη διεύρυνση και η D_2 για την διάμετρο μετά την διεύρυνση. Αναλυτικοί πίνακες με υπολογισμούς βρίσκονται στο παράρτημα, πίνακες Π II–22-24.

Πίνακας 5.1 Διάμετροι σε τμήμα ξαφνικής διεύρυνσης

ks (m)	D_{1ave} (m)	D_{2ave} (m)
0.001	0.085	0.133
0.0005	0.084	0.136
0.0002	0.083	0.138
Average	0.084	0.135

6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια να υπολογιστούν πειραματικά οι ενεργειακές απώλειες που εμφανίζονταν σε Μινωικό υδραγωγείο που αποτελείτο από πήλινους κολουροκωνικούς αγωγούς μήκους περίπου 70 εκατοστών έκαστος. Η πειραματική διάταξη αποτελούνταν από έξι όμοια χειροποίητα αντίγραφα Μινωικών πηλοσωλήνων και πιεζόμετρα τοποθετημένα σε καίριες θέσεις. Για να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα από την παρούσα εργασία, έγιναν τρεις σειρές πειραμάτων. Στην πρώτη μετρήθηκαν οι πιεζομετρικές διαφορές στην είσοδο και έξοδο της συστοιχίας των έξι σωλήνων. Στη δεύτερη μετρήθηκαν πιέσεις κατά μήκος των δύο πρώτων πήλινων τμημάτων και τέλος στην τρίτη μετρήθηκαν οι πιεζομετρικές διαφορές κατά μήκος και των έξι τμημάτων. Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων των δύο πρώτων σειρών μετρήσεων μας οδήγησε στην τρίτη που έδωσε τα περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα που συγκρίθηκαν και επαληθεύτηκαν με τους θεωρητικούς υπολογισμούς.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από την εργασία αυτή είναι τα παρακάτω

- Σε σχέση με τους αγωγούς κυκλικής διατομής οι απώλειες ενέργειας στη διάταξη των κολουροκωνικών πηλοσωλήνων είναι εξαιρετικά αυξημένες. Για παράδειγμα, για παροχή 14.2 L/s, έχουμε πώση ενέργειας περίπου 0.75 m στη διάταξη από 5 πηλοσωλήνες συνολικού μήκους 3.45 m ($J \approx 0.226$).
- Ο συντελεστής γραμμικών απωλειών ενέργειας ισοδύναμου αγωγού διαμέτρων 0.103 m και 0.076 m, κατά μήκος των τελευταίων πέντε, τεσσάρων, τριών, δύο και ενός πηλοσωλήνων κυμαίνεται στις τιμές $f_{D=0.103} \approx 0.16$ και $f_{D=0.076} \approx 0.035$ και οι αντίστοιχες τιμές της σχετικής τραχύτητας βρέθηκαν ίσες με $k_s/D_{0.103} \approx 0.209$ και $k_s/D_{0.076} \approx 0.008$.
- Οι συνολικές απώλειες που μετρήθηκαν προσεγγίζονται με το θεωρητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε όταν η ισοδύναμη τραχύτητα είναι 0.2 – 0.5 mm.
- Οι συνολικές απώλειες υπολογίστηκαν από το θεωρητικό μοντέλο ότι είναι ισοδύναμες με αυτές ενός σωλήνα διαμέτρου 76 mm.
- Οι γραμμικές απώλειες που οφείλονται στο κολουροκωνικό σχήμα βρέθηκε από το θεωρητικό μοντέλο, ότι είναι ισοδύναμες με αυτές ενός σωλήνα διαμέτρου 103 mm.

- Οι γραμμικές απώλειες κατά μήκος ενός κολουροκωνικού αγωγού υπολογίστηκαν από το θεωρητικό μοντέλο ότι είναι περίπου το ένα τρίτο των ολικών απωλειών.
- Υπάρχει περίπτωση έντονης επανακυκλοφορίας κατά μήκος ενός κολουροκωνικού τμήματος, που είναι δυνατόν να ξεπεράσει ακόμα και το μέσο του όταν η παροχή αυξηθεί πάνω από τα 12 L/s.
- Οι γραμμές ροής και οι περιοχές αποκόλλησης μέσα στον αγωγό μεταβάλλονται ανάλογα με το μέγεθος της παροχής.
- Τέλος, οι αγωγοί που βρίσκονται σε θέσεις υψηλής πίεσης (>5m), εμφανίζουν έντονη εφίδρωση.

7. Αναφορές

- Κατσαρέλης Τ., (2011) *Σημειώσεις Μηχανικής των Ρευστών, Μέθοδοι και Εφαρμογές Υπολογισμού*. Αθήνα.
- Παπανικολάου, Π. Ν., (2010). *Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση & σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια*. Διδακτικές σημειώσεις: Έκδοση 1 Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- Angelakis, A. N., and D. Koutsoyiannis, (2003). *Urban water engineering and management in ancient Greece*, The Encyclopedia of Water Science, edited by B. A. Stewart and T. Howell, 999–1007, Dekker, New York.
- Di Leo, A., Farese, D., and Tallini, M. (2006) *Technology and Cult of Water in the Rural Settlements of Sabina, Central Italy, in Roman Times: Irrigation and Groundwater Exploitation and Forest Shrine of Italic Goddess Vacuna*. Symposium preprint book, 1st International Symposium on ‘Water and wastewater technologies in ancient civilizations’, edited by A. N. Angelakis and D. Koutsoyiannis, 543-550.
- Dialynas, E., Lyrintzis, A., and Angelakis, A.N. (2006) *Historical development of water supply in Iraklio city, Greece*. Symposium preprint book, 1st International Symposium on ‘Water and wastewater technologies in ancient civilizations’, edited by A. N. Angelakis and D. Koutsoyiannis, 671-676.
- Koutsoyiannis, D. N., Zarkadoulas N., Angelakis A. N. and Tchobanoglous G., (2008). *Urban Water Management in Ancient Greece Legacies and Lessons*. Journal of Water Resources Planning and Management.
- Koutsoyiannis, D. (2008), *A power-law approximation of the turbulent flow friction factor useful for the design and simulation of urban water networks*. Urban Water Journal, 5 (2), 117–115.
- Mays, L.W. (2006_a) *A brief history of ancient water distribution*. Symposium preprint book, 1st International Symposium on ‘Water and wastewater technologies in ancient civilizations’, edited by A. N. Angelakis and D. Koutsoyiannis, 27-36.
- Mays, L.W. (2006_b) *Water sustainability of ancient civilizations in Mesoamerica and American southwest*. Symposium preprint book, 1st International Symposium on ‘Water

and wastewater technologies in ancient civilizations’, edited by A. N. Angelakis and D. Koutsoyiannis, 247-256.

Shames, I.H. (2003) *Incompressible viscous flow through pipes*. From *Mechanics of fluids* 4th edition, McGraw Hill, 416-417.

Tseropoulos G., Dimakopoulos Y., Tsamopoulos J. and Lyberatos G., (2012). *Computational Fluid Dynamics (CFD) Evaluation of the Flow Characteristics of the Conical Minoan Terracotta Pipes in the Bronze Age*. Proceeding of the IWA Specialized Conference on Water & Wastewater, Technologies in Ancient Civilization, took part in Istanbul–Turkey.

Vikram R., Majumder S., and, Sanyal D., (2010). *Analysis of the Turbulent Fluid Flow in an Axi-symmetric Sudden Expansion*. *International Journal of Engineering Science and Technology*. Vol 2(6) 1569-1574, Kolkata

Webster, L., Hughes, R. L., and Robertson, B. (2010) *Flow testing of Minoan tapered pipes*. Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Melbourne, Victoria, Australia. 421-460 Research Project (Civil).

8. Παράρτημα–Appendix

Symbol	Dimension	Physical parameter
ε	mm	Manning Roughness
θ, ω	deg, rad	Angle
μ	kg/(m s)	Viscosity
ν	m ² /s	Kinematic viscosity
ρ	kg/m ³	Density
D	m	Diameter
f		Friction coefficient
g	m/s ²	Graviational acceleration
H	m	Energy grade line height
h_f	m	Linear Energy Losses
h_t, h_α	m	Local losses
h_{tot}	m	Total losses
J		Slope of Energy Grade Line
K		Local Loss Coefficient
k_s	m	Nikuradse Roughness
K_{SE}		Loss coefficient in a sudden expansion
L	m	Length
$p/\rho g$	atm, m	Hydraulic Grade Line height
Q	m ³ /s	Flow rate
Re		Reynolds number
V	m/s	Velocity
∇	m ³	Volume
x	m	Distance from start

Παράρτημα Ι

Παρατίθενται οι μετρήσεις που συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων.

Περιεχόμενα

Π Ι-1 Μετρήσεις πρώτου πειράματος (Δh_1) για ένδειξη μανομέτρου Venturi (ΔH_{Vent}), υπολογισμός κλίσης γραμμής ενέργειας J και υπολογισμός συντελεστή τραχύτητας f για μέση διάμετρο με τιμή (D_{ave}) ίση με 10.3 cm.

Calculations of first experiment (Δh_1) for Venturi Meter Reading (ΔH_{Vent}), Computation of energy grade line slope J and friction coefficient f , for an average diameter $D_{ave} = 10.3$ cm.

Π Ι-2 Μετρήσεις πρώτου πειράματος (Δh_1) για ένδειξη μανομέτρου Venturi (ΔH_{Vent}), υπολογισμός κλίσης γραμμής ενέργειας J και υπολογισμός συντελεστή τραχύτητας f για μέση διάμετρο με τιμή (D_{ave}) ίση με 7.6 cm.

Calculations of first experiment (Δh_1) for Venturi Meter Reading (ΔH_{Vent}), Computation of energy grade line slope J and friction coefficient f , for an average diameter $D_{ave} = 7.6$ cm.

Π Ι-3 Μετρήσεις δεύτερου πειράματος ($p_i/\rho g+z_i$) για ένδειξη μανομέτρου Venturi (ΔH_{Vent}).

Calculations of second experiment ($p_i/\rho g+z_i$) for Venturi Meter Reading (ΔH_{Vent}).

Π Ι-4 Δεύτερο πείραμα, Υπολογισμός ταχυτήτων σε κάθε θέση μέτρησης (V_i).

Second experiment. Velocity computation in each location (V_i).

Π Ι-5 Δεύτερο πείραμα. Υπολογισμός ύψους γραμμής ενέργειας σε κάθε θέση (H_i).

Second experiment. Computation of the energy grade line height at each location (H_i).

Π Ι-6 Δεύτερο πείραμα. Υπολογισμός απωλειών ενέργειας μεταξύ θέσεων για τα δύο πρώτα κολουροκωνικά τμήματα ($h_L n - n+1, n=1\div 7$).

Second experiment. Computation of energy losses between piezometer locations ($h_L n - n+1, n=1\div 7$).

Π Ι-7 Δεύτερο πείραμα. Υπολογισμός μέσης κλίσης γραμμής ενέργειας ανάμεσα σε διαφορετικά πιεζομετρα.

Second experiment. Computation of the energy grade line slope for various lengths between piezometers.

Π Ι-8 Μετρήσεις τρίτου πειράματος ($p_i/\rho g+z_i$) για ένδειξη μανομέτρου συμπιεσμένου αέρα (ΔH_{Vent}).

Third experiment. Indications of the pressure measurements ($p_i/\rho g+z_i$) for Venturi Meter Reading (ΔH_{Vent}).

Π Ι-9 Τρίτο πείραμα. Υπολογισμός ταχυτήτων σε κάθε θέση (V_i) για κάθε παροχή (Q).

Third experiment. Velocity computation for each piezometer location (V_i).

Π Ι—10 Τρίτο πείραμα. Υπολογισμός ύψους ενέργειας σε κάθε θέση πιεζομέτρου (H_i).

Third experiment. Computation of the energy grade line height for each piezometer location (H_i).

Π Ι—11 Τρίτο πείραμα. Υπολογισμός κλίσης (J) γραμμής ενέργειας ανάμεσα σε διαφορετικά πιεζόμετρα και υπολογισμός του συντελεστή τραχύτητας (f).

Third experiment. Computation of energy grade line slope (J) for various lengths between piezometers, and friction coefficient f .

Π Ι—12 Τρίτο πείραμα. Υπολογισμός κλίσης (J) γραμμής ενέργειας ανάμεσα σε διαφορετικά πιεζόμετρα και υπολογισμός του συντελεστή τραχύτητας (f).

Third experiment. Computation of energy grade line slope (J) for various lengths between piezometers, and friction coefficient f .

ΠΙ-1 Μετρήσεις πρώτου πειράματος (Δh_1) για ένδειξη μανομέτρου Venturi (ΔH_{vent}), υπολογισμός κλίσης γραμμής ενέργειας J και υπολογισμός συντελεστή τραχύτητας f για μέση διάμετρο με τιμή (D_{ave}) ίση με 10.3 cm.

α/α	Δh_1 (cm)	Δh_{vent} (mm)	Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	V_{in} (m/s)	V_{out} (m/s)	ΔH (m)	J= $\Delta H/L$	D_{ave} (m)	V_{ave} (m/s)	v (m ² /s)	Re	f	ks/D
1	13.1	78	5.50	0.093	0.119	0.810	0.495	0.152	0.0375	0.103	0.661	1.2E-06	57198	0.1737	0.5327
2	16.3	93	6.01	0.093	0.119	0.885	0.540	0.188	0.0464	0.103	0.721	1.2E-06	62456	0.1802	0.5445
3	22.3	127	7.02	0.093	0.119	1.034	0.632	0.257	0.0635	0.103	0.843	1.2E-06	72985	0.1805	0.5450
4	28.3	162	7.93	0.093	0.119	1.168	0.713	0.326	0.0806	0.103	0.952	1.2E-06	82431	0.1797	0.5436
5	35.4	207	8.97	0.093	0.119	1.320	0.806	0.410	0.1011	0.103	1.076	1.2E-06	93179	0.1764	0.5377
6	42.8	253	9.91	0.093	0.119	1.459	0.891	0.496	0.1224	0.103	1.190	1.2E-06	103013	0.1748	0.5347
7	50.0	297	10.74	0.093	0.119	1.581	0.966	0.580	0.1431	0.103	1.289	1.2E-06	111612	0.1740	0.5334
8	56.8	341	11.51	0.093	0.119	1.694	1.035	0.659	0.1628	0.103	1.381	1.2E-06	119594	0.1724	0.5304
9	59.5	360	11.83	0.093	0.119	1.741	1.063	0.692	0.1708	0.103	1.419	1.2E-06	122880	0.1713	0.5283
10	65.6	400	12.47	0.093	0.119	1.835	1.121	0.763	0.1885	0.103	1.496	1.2E-06	129527	0.1702	0.5262
11	69.6	424	12.83	0.093	0.119	1.889	1.154	0.810	0.1999	0.103	1.540	1.2E-06	133356	0.1703	0.5264
12	73.1	444	13.13	0.093	0.119	1.933	1.181	0.850	0.2099	0.103	1.576	1.2E-06	136465	0.1707	0.5272
13	76.4	467	13.47	0.093	0.119	1.983	1.211	0.889	0.2196	0.103	1.617	1.2E-06	139955	0.1698	0.5255
14	79.8	489	13.78	0.093	0.119	2.029	1.239	0.929	0.2294	0.103	1.654	1.2E-06	143214	0.1694	0.5248
15	82.7	509	14.06	0.093	0.119	2.070	1.264	0.964	0.2379	0.103	1.688	1.2E-06	146113	0.1688	0.5236
16	79.3	488	13.77	0.093	0.119	2.027	1.238	0.924	0.2281	0.103	1.653	1.2E-06	143068	0.1688	0.5237
17	74.1	453	13.27	0.093	0.119	1.953	1.193	0.863	0.2130	0.103	1.592	1.2E-06	137842	0.1698	0.5255
18	69.9	425	12.85	0.093	0.119	1.892	1.155	0.813	0.2007	0.103	1.542	1.2E-06	133514	0.1706	0.5270
19	64.2	392	12.34	0.093	0.119	1.817	1.110	0.747	0.1845	0.103	1.481	1.2E-06	128225	0.1700	0.5258
20	57.1	347	11.61	0.093	0.119	1.709	1.044	0.664	0.1640	0.103	1.393	1.2E-06	120641	0.1706	0.5271
21	50.3	305	10.89	0.093	0.119	1.602	0.979	0.585	0.1444	0.103	1.306	1.2E-06	113105	0.1710	0.5277
22	46.5	279	10.41	0.093	0.119	1.533	0.936	0.540	0.1333	0.103	1.249	1.2E-06	108177	0.1725	0.5306
23	43.3	258	10.01	0.093	0.119	1.474	0.900	0.502	0.1240	0.103	1.202	1.2E-06	104026	0.1736	0.5325
24	36.8	218	9.20	0.093	0.119	1.355	0.827	0.426	0.1053	0.103	1.104	1.2E-06	95622	0.1744	0.5341
25	29.2	172	8.17	0.093	0.119	1.203	0.735	0.338	0.0835	0.103	0.981	1.2E-06	84937	0.1753	0.5357
26	22.5	131	7.13	0.093	0.119	1.050	0.641	0.260	0.0642	0.103	0.856	1.2E-06	74125	0.1771	0.5389
27	18.1	105	6.39	0.093	0.119	0.940	0.574	0.209	0.0516	0.103	0.767	1.2E-06	66363	0.1776	0.5399
28	15.0	84	5.71	0.093	0.119	0.841	0.514	0.173	0.0426	0.103	0.686	1.2E-06	59357	0.1831	0.5497

ΠΙ-2 Μετρήσεις πρώτου πειράματος (Δh_1) για ένδειξη μανομέτρου Venturi (ΔH_{vent}), υπολογισμός κλίσης γραμμής ενέργειας J και υπολογισμός συντελεστή τραχύτητας f για μέση διάμετρο με τιμή (D_{ave}) ίση με 7.6 cm.

α/α	Δh_1 (cm)	Δh_{vent} (mm)	Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	V_{in} (m/s)	V_{out} (m/s)	ΔH (m)	$J=\Delta H/L$	D_{ave} (m)	V_{ave} (m/s)	v (m ² /s)	Re	f	ks/D
1	13.1	78	5.50	0.093	0.119	0.810	0.495	0.152	0.0375	0.076	1.213	1.2E-06	77518	0.0380	0.1360
2	16.3	93	6.01	0.093	0.119	0.885	0.540	0.188	0.0464	0.076	1.325	1.2E-06	84644	0.0394	0.1425
3	22.3	127	7.02	0.093	0.119	1.034	0.632	0.257	0.0635	0.076	1.548	1.2E-06	98914	0.0395	0.1428
4	28.3	162	7.93	0.093	0.119	1.168	0.713	0.326	0.0806	0.076	1.749	1.2E-06	111715	0.0393	0.1420
5	35.4	207	8.97	0.093	0.119	1.320	0.806	0.410	0.1011	0.076	1.977	1.2E-06	126282	0.0386	0.1387
6	42.8	253	9.91	0.093	0.119	1.459	0.891	0.496	0.1224	0.076	2.185	1.2E-06	139610	0.0382	0.1370
7	50.0	297	10.74	0.093	0.119	1.581	0.966	0.580	0.1431	0.076	2.368	1.2E-06	151263	0.0381	0.1363
8	56.8	341	11.51	0.093	0.119	1.694	1.035	0.659	0.1628	0.076	2.537	1.2E-06	162081	0.0377	0.1347
9	59.5	360	11.83	0.093	0.119	1.741	1.063	0.692	0.1708	0.076	2.607	1.2E-06	166535	0.0375	0.1336
10	65.6	400	12.47	0.093	0.119	1.835	1.121	0.763	0.1885	0.076	2.748	1.2E-06	175543	0.0372	0.1324
11	69.6	424	12.83	0.093	0.119	1.889	1.154	0.810	0.1999	0.076	2.829	1.2E-06	180733	0.0372	0.1325
12	73.1	444	13.13	0.093	0.119	1.933	1.181	0.850	0.2099	0.076	2.895	1.2E-06	184947	0.0373	0.1330
13	76.4	467	13.47	0.093	0.119	1.983	1.211	0.889	0.2196	0.076	2.969	1.2E-06	189676	0.0371	0.1321
14	79.8	489	13.78	0.093	0.119	2.029	1.239	0.929	0.2294	0.076	3.038	1.2E-06	194093	0.0371	0.1317
15	82.7	509	14.06	0.093	0.119	2.070	1.264	0.964	0.2379	0.076	3.100	1.2E-06	198022	0.0369	0.1310
16	79.3	488	13.77	0.093	0.119	2.027	1.238	0.924	0.2281	0.076	3.035	1.2E-06	193894	0.0369	0.1311
17	74.1	453	13.27	0.093	0.119	1.953	1.193	0.863	0.2130	0.076	2.924	1.2E-06	186812	0.0371	0.1320
18	69.9	425	12.85	0.093	0.119	1.892	1.155	0.813	0.2007	0.076	2.833	1.2E-06	180946	0.0373	0.1328
19	64.2	392	12.34	0.093	0.119	1.817	1.110	0.747	0.1845	0.076	2.720	1.2E-06	173779	0.0372	0.1322
20	57.1	347	11.61	0.093	0.119	1.709	1.044	0.664	0.1640	0.076	2.559	1.2E-06	163501	0.0373	0.1329
21	50.3	305	10.89	0.093	0.119	1.602	0.979	0.585	0.1444	0.076	2.400	1.2E-06	153287	0.0374	0.1332
22	46.5	279	10.41	0.093	0.119	1.533	0.936	0.540	0.1333	0.076	2.295	1.2E-06	146608	0.0377	0.1348
23	43.3	258	10.01	0.093	0.119	1.474	0.900	0.502	0.1240	0.076	2.207	1.2E-06	140982	0.0380	0.1358
24	36.8	218	9.20	0.093	0.119	1.355	0.827	0.426	0.1053	0.076	2.029	1.2E-06	129593	0.0382	0.1367
25	29.2	172	8.17	0.093	0.119	1.203	0.735	0.338	0.0835	0.076	1.802	1.2E-06	115112	0.0383	0.1376
26	22.5	131	7.13	0.093	0.119	1.050	0.641	0.260	0.0642	0.076	1.573	1.2E-06	100459	0.0387	0.1394
27	18.1	105	6.39	0.093	0.119	0.940	0.574	0.209	0.0516	0.076	1.408	1.2E-06	89939	0.0388	0.1399
28	15.0	84	5.71	0.093	0.119	0.841	0.514	0.173	0.0426	0.076	1.259	1.2E-06	80444	0.0401	0.1454

Δh_1 (cm): Απώλειες ενέργειας αρχής – τέλους. (Energy losses (start – end)).

Δh_{vent} (mm) : Ένδειξη μετρητή Venturi. (Venturi Meter Reading)

$$Q = 0.6233\sqrt{\Delta h_{\text{vent}}}$$

$$V = \frac{Q}{E} = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

$$\Delta H = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right) \Delta h - 1 + \left(\frac{V_A^2 - V_B^2}{2g}\right)$$

$$\text{Re} = \frac{DV}{\nu}$$

$$f = \frac{2gJD}{V^2}$$

$$\frac{k_s}{D} = \exp\left(\frac{\frac{1}{\sqrt{f}} - 1.14}{-2}\right)$$

ΠΙ-3 Μετρήσεις δεύτερου πειράματος ($p_i/\rho g+z_i$) για ένδειξη μανομέτρου Venturi (ΔH_{Vent}).

α/α	ΔH_{Vent} (mm)	Q (L/s)	$p_{in}/\rho g+z_{in}$ (mm)	$p_1/\rho g+z_1$ (mm)	$p_2/\rho g+z_2$ (mm)	$p_3/\rho g+z_3$ (mm)	$p_4/\rho g+z_4$ (mm)	$p_5/\rho g+z_5$ (mm)	$p_6/\rho g+z_6$ (mm)	$p_7/\rho g+z_7$ (mm)	$p_8/\rho g+z_8$ (mm)
1	189	8.57	409	437	460	470	452	403	342	398	375
2	240	9.66	400	440	470	483	456	393	316	390	360
3	286	10.54	348	392	427	446	411	335	248	332	296
4	341	11.51	344	396	437	458	420	331	229	329	287
5	384	12.21	335	398	442	468	424	324	209	318	274
6	426	12.86	331	399	448	475	428	316	188	313	264
7	452	13.25	326	399	453	478	429	308	175	307	256
8	483	13.70	320	400	452	482	430	304	160	301	244
9	522	14.24	311	397	457	492	432	294	143	292	236
10	484	13.71	319	399	454	483	432	303	161	301	245
11	461	13.38	321	398	453	481	431	307	169	303	251
12	442	13.10	328	398	447	478	428	311	181	308	258
13	375	12.07	337	399	440	466	422	325	213	321	278
14	324	11.22	346	398	434	456	419	334	233	329	292
15	274	10.32	353	397	427	444	414	343	260	340	309
16	260	10.05	356	396	426	443	414	346	266	342	311
17	222	9.29	361	395	420	434	411	353	282	347	322
18	177	8.29	367	394	413	423	406	361	305	359	336
19	137	7.30	372	392	408	415	403	368	324	365	347
20	111	6.57	375	392	404	409	399	373	337	371	356
21	78	5.50	379	391	398	404	397	379	351	376	364

ΔH_{vent} : Ένδειξη μετρητή Venturi. (Venturi Meter Reading)

$$Q = 0.6233\sqrt{\Delta H_{Vent}}$$

$p_i/\rho g+z_{in}$: Ύψος πίεσης σε θέση i. (Hydraulic Grade Line at location i)

ΠΙ-4 Δεύτερο πείραμα, Υπολογισμός ταχυτήτων σε κάθε θέση μέτρησης (V_i).

α/α	V_{in}	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8
	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
1	1.261	0.646	0.745	0.840	1.028	1.289	0.541	0.636	1.289
2	1.422	0.727	0.840	0.946	1.159	1.453	0.610	0.716	1.453
3	1.552	0.794	0.917	1.033	1.265	1.586	0.666	0.782	1.586
4	1.694	0.867	1.001	1.128	1.381	1.731	0.727	0.854	1.731
5	1.798	0.920	1.062	1.197	1.466	1.837	0.771	0.906	1.837
6	1.894	0.969	1.119	1.260	1.544	1.935	0.812	0.954	1.935
7	1.951	0.998	1.152	1.298	1.590	1.993	0.837	0.983	1.993
8	2.017	1.032	1.191	1.342	1.644	2.061	0.865	1.016	2.061
9	2.096	1.073	1.238	1.395	1.709	2.142	0.899	1.057	2.142
10	2.019	1.033	1.193	1.343	1.646	2.063	0.866	1.017	2.063
11	1.970	1.008	1.164	1.311	1.606	2.013	0.845	0.993	2.013
12	1.929	0.987	1.140	1.284	1.573	1.971	0.827	0.972	1.971
13	1.777	0.909	1.050	1.183	1.449	1.816	0.762	0.896	1.816
14	1.652	0.845	0.976	1.099	1.346	1.688	0.708	0.832	1.688
15	1.519	0.777	0.897	1.011	1.238	1.552	0.651	0.765	1.552
16	1.480	0.757	0.874	0.985	1.206	1.512	0.635	0.746	1.512
17	1.367	0.700	0.808	0.910	1.115	1.397	0.586	0.689	1.397
18	1.221	0.625	0.721	0.812	0.995	1.247	0.524	0.615	1.247
19	1.074	0.550	0.634	0.715	0.876	1.097	0.461	0.541	1.097
20	0.967	0.495	0.571	0.643	0.788	0.988	0.415	0.487	0.988
21	0.810	0.415	0.479	0.539	0.661	0.828	0.348	0.408	0.828

$$V = \frac{Q}{E} = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

ΠΙ-5 Δεύτερο πείραμα. Υπολογισμός ύψους γραμμής ενέργειας σε κάθε θέση (H_i).

α/α	Hin (m)	H1 (m)	H2 (m)	H3 (m)	H4 (m)	H5 (m)	H6 (m)	H7 (m)	H8 (m)
x (cm)	0.0	10.2	20.1	30.4	40.6	51.0	70.5	90.5	110.0
1	0.490	0.458	0.488	0.506	0.506	0.488	0.357	0.419	0.460
2	0.503	0.467	0.506	0.529	0.524	0.501	0.335	0.416	0.468
3	0.471	0.424	0.470	0.500	0.493	0.463	0.271	0.363	0.424
4	0.490	0.434	0.488	0.523	0.517	0.484	0.256	0.366	0.440
5	0.500	0.441	0.500	0.541	0.534	0.496	0.239	0.360	0.446
6	0.514	0.447	0.512	0.556	0.549	0.507	0.222	0.359	0.455
7	0.520	0.450	0.521	0.564	0.558	0.511	0.211	0.356	0.459
8	0.527	0.454	0.524	0.574	0.568	0.520	0.198	0.354	0.460
9	0.535	0.456	0.535	0.591	0.581	0.528	0.184	0.349	0.470
10	0.527	0.453	0.526	0.575	0.570	0.520	0.199	0.354	0.462
11	0.519	0.450	0.522	0.569	0.562	0.514	0.205	0.353	0.458
12	0.518	0.448	0.513	0.562	0.554	0.509	0.216	0.356	0.456
13	0.498	0.441	0.496	0.537	0.529	0.493	0.243	0.362	0.446
14	0.485	0.434	0.483	0.518	0.511	0.479	0.259	0.364	0.437
15	0.471	0.428	0.468	0.496	0.492	0.466	0.282	0.370	0.432
16	0.468	0.425	0.465	0.492	0.488	0.463	0.287	0.370	0.428
17	0.456	0.420	0.453	0.476	0.474	0.452	0.300	0.371	0.421
18	0.443	0.414	0.440	0.457	0.456	0.440	0.319	0.378	0.415
19	0.431	0.407	0.429	0.441	0.442	0.429	0.335	0.380	0.408
20	0.423	0.404	0.421	0.430	0.431	0.423	0.346	0.383	0.406
21	0.412	0.400	0.410	0.419	0.419	0.414	0.357	0.385	0.399

$$H_i = z_i + \frac{p_i}{\rho g} + \frac{V_i^2}{2g}$$

ΠΙ-6 Δεύτερο πείραμα. Υπολογισμός απωλειών ενέργειας μεταξύ θέσεων για τα δύο πρώτα κολουροκωνικά τμήματα (h_L $n - n+1$, $n=1\div 7$).

α/α	h _{n-1} (mm)	h ₁₋₂ (mm)	h ₂₋₃ (mm)	h ₃₋₄ (mm)	h ₄₋₅ (mm)	h ₅₋₆ (mm)	h ₆₋₇ (mm)	h ₇₋₈ (mm)
x (cm)	5.1	15.2	25.2	35.5	45.8	60.8	80.5	100.3
1	0.032	-0.030	-0.018	0.000	0.018	0.131	-0.062	-0.041
2	0.036	-0.039	-0.023	0.004	0.024	0.166	-0.081	-0.051
3	0.047	-0.046	-0.031	0.008	0.029	0.193	-0.093	-0.061
4	0.056	-0.054	-0.035	0.006	0.033	0.228	-0.110	-0.074
5	0.059	-0.058	-0.041	0.007	0.037	0.257	-0.121	-0.086
6	0.067	-0.065	-0.044	0.006	0.043	0.285	-0.138	-0.095
7	0.070	-0.071	-0.043	0.006	0.047	0.300	-0.146	-0.102
8	0.073	-0.070	-0.049	0.006	0.047	0.322	-0.156	-0.107
9	0.079	-0.080	-0.056	0.010	0.053	0.344	-0.165	-0.121
10	0.073	-0.073	-0.049	0.005	0.050	0.321	-0.155	-0.108
11	0.069	-0.072	-0.047	0.006	0.049	0.308	-0.148	-0.104
12	0.070	-0.066	-0.049	0.008	0.045	0.293	-0.140	-0.100
13	0.057	-0.055	-0.041	0.008	0.036	0.250	-0.119	-0.084
14	0.051	-0.048	-0.035	0.006	0.032	0.221	-0.106	-0.073
15	0.043	-0.040	-0.028	0.004	0.026	0.184	-0.088	-0.062
16	0.042	-0.040	-0.027	0.004	0.026	0.176	-0.084	-0.057
17	0.036	-0.033	-0.023	0.002	0.022	0.153	-0.072	-0.050
18	0.029	-0.026	-0.017	0.000	0.016	0.121	-0.059	-0.037
19	0.023	-0.021	-0.013	-0.001	0.013	0.095	-0.045	-0.028
20	0.018	-0.016	-0.009	-0.001	0.008	0.077	-0.037	-0.023
21	0.013	-0.010	-0.009	0.000	0.005	0.057	-0.027	-0.014

$$h_{i-(i+1)} = H_i - H_{i+1}$$

ΠΙ-7 Δεύτερο πείραμα. Υπολογισμός μέσης κλίσης γραμμής ενέργειας ανάμεσα σε διαφορετικά πιεζόμετρα.

a/a	Q (L/s)	J_{in-8}	J_{5-8}	J_{4-8}
1	8.57	0.0264	0.0475	0.0666
2	9.66	0.0308	0.0559	0.0820
3	10.54	0.0405	0.0661	0.0986
4	11.51	0.0439	0.0746	0.1116
5	12.21	0.0467	0.0847	0.1260
6	12.86	0.0512	0.0881	0.1363
7	13.25	0.0534	0.0881	0.1432
8	13.70	0.0581	0.1017	0.1547
9	14.24	0.0566	0.0983	0.1599
10	13.71	0.0564	0.0983	0.1559
11	13.38	0.0533	0.0949	0.1512
12	13.10	0.0536	0.0898	0.1412
13	12.07	0.0451	0.0797	0.1195
14	11.22	0.0416	0.0712	0.1070
15	10.32	0.0337	0.0576	0.0870
16	10.05	0.0348	0.0593	0.0874
17	9.29	0.0303	0.0525	0.0761
18	8.29	0.0240	0.0424	0.0593
19	7.30	0.0195	0.0356	0.0485
20	6.57	0.0147	0.0288	0.0359
21	5.50	0.0118	0.0254	0.0292

$$J_{i-(u+1)} = \frac{\Delta H_{i-(i+1)}}{L_{i-(i+1)}}$$

Π Ι-8 Μετρήσεις τρίτου πειράματος ($p_i/\rho g+z_i$) για ένδειξη μανομέτρου συμπιεσμένου αέρα (ΔH_{Vent}).

α/α	ΔH_{Vent}	Q	$p_1/\rho g+z_1$	$p_2/\rho g+z_2$	$p_3/\rho g+z_3$	$p_4/\rho g+z_4$	$p_5/\rho g+z_5$	$p_6/\rho g+z_6$	$p_7/\rho g+z_7$	$p_8/\rho g+z_8$	$p_9/\rho g+z_9$	$p_{10}/\rho g+z_{10}$
	(mm)	(L/s)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	103	6.33	363	385	362	363	347	315	271	274	226	198
2	145	7.51	400	433	398	399	377	330	267	272	202	161
3	171	8.15	423	462	417	420	396	339	264	270	187	139
4	205	8.92	450	495	443	443	415	350	259	268	168	111
5	230	9.45	421	473	414	417	385	312	214	221	111	48
6	253	9.91	437	491	426	429	396	314	205	214	94	25
7	272	10.28	496	558	489	490	454	367	249	258	129	56
8	289	10.60	522	590	511	514	475	384	256	270	131	53
9	321	11.17	538	610	524	525	485	385	244	258	104	18
10	354	11.73	744	825	734	734	690	576	429	445	276	182
11	395	12.39	773	862	760	761	713	587	415	436	245	140
12	436	13.01	758	860	749	750	565	425	373	395	186	71
13	466	13.46	781	890	770	770	496	349	365	390	166	41
14	496	13.88	863	981	851	852	679	522	418	452	213	80
15	518	14.19	883	1005	867	868	606	443	424	458	208	71
16	462	13.40	788	897	776	778	555	408	377	402	182	59
17	419	12.76	785	882	772	773	535	404	408	431	230	119
18	344	11.56	642	718	631	633	593	487	337	353	191	100
19	315	11.06	523	596	516	517	477	378	242	277	106	23
20	274	10.32	481	545	473	475	440	353	237	247	117	43
21	239	9.64	431	483	419	424	393	316	216	223	111	45
22	186	8.50	396	437	390	392	365	308	229	232	145	95
23	131	7.13	357	386	356	357	337	297	243	244	185	147
24	97	6.14	333	352	331	333	319	288	249	250	208	180

ΠΙ-9 Τρίτο πείραμα. Υπολογισμός ταχυτήτων σε κάθε θέση (V_i) για κάθε παροχή (Q).

α/α	ΔH_{Vent}	Q	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}
	(mm)	(L/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
1	103	6.33	0.931	0.759	0.952	0.994	0.952	1.115	1.228	0.973	1.115	1.115
2	145	7.51	1.105	0.901	1.129	1.180	1.129	1.323	1.457	1.154	1.323	1.323
3	171	8.15	1.200	0.978	1.226	1.281	1.226	1.436	1.582	1.253	1.436	1.436
4	205	8.92	1.314	1.071	1.342	1.403	1.342	1.573	1.732	1.372	1.573	1.573
5	230	9.45	1.392	1.134	1.422	1.486	1.422	1.666	1.834	1.453	1.666	1.666
6	253	9.91	1.459	1.190	1.491	1.558	1.491	1.747	1.924	1.524	1.747	1.747
7	272	10.28	1.513	1.234	1.546	1.616	1.546	1.812	1.995	1.581	1.812	1.812
8	289	10.60	1.560	1.272	1.594	1.666	1.594	1.867	2.056	1.629	1.867	1.867
9	321	11.17	1.644	1.340	1.680	1.755	1.680	1.968	2.167	1.717	1.968	1.968
10	354	11.73	1.726	1.407	1.764	1.843	1.764	2.067	2.276	1.803	2.067	2.067
11	395	12.39	1.824	1.487	1.864	1.947	1.864	2.183	2.404	1.905	2.183	2.183
12	436	13.01	1.916	1.562	1.958	2.046	1.958	2.294	2.526	2.001	2.294	2.294
13	466	13.46	1.981	1.615	2.024	2.115	2.024	2.371	2.611	2.069	2.371	2.371
14	496	13.88	2.044	1.666	2.088	2.182	2.088	2.446	2.694	2.134	2.446	2.446
15	518	14.19	2.088	1.703	2.134	2.230	2.134	2.500	2.753	2.181	2.500	2.500
16	462	13.40	1.972	1.608	2.015	2.106	2.015	2.361	2.600	2.060	2.361	2.361
17	419	12.76	1.878	1.531	1.919	2.006	1.919	2.248	2.476	1.962	2.248	2.248
18	344	11.56	1.702	1.387	1.739	1.817	1.739	2.037	2.243	1.777	2.037	2.037
19	315	11.06	1.629	1.328	1.664	1.739	1.664	1.950	2.147	1.701	1.950	1.950
20	274	10.32	1.519	1.238	1.552	1.622	1.552	1.818	2.002	1.586	1.818	1.818
21	239	9.64	1.419	1.156	1.450	1.515	1.450	1.698	1.870	1.482	1.698	1.698
22	186	8.50	1.251	1.020	1.279	1.336	1.279	1.498	1.650	1.307	1.498	1.498
23	131	7.13	1.050	0.856	1.073	1.121	1.073	1.257	1.384	1.097	1.257	1.257
24	97	6.14	0.904	0.737	0.923	0.965	0.923	1.082	1.191	0.944	1.082	1.082

Π Ι—10 Τρίτο πείραμα. Υπολογισμός ύψους ενέργειας σε κάθε θέση πιεζομέτρου (H_i).

α/α	H_1 (m)	H_2 (m)	H_3 (m)	H_4 (m)	H_5 (m)	H_6 (m)	H_7 (m)	H_8 (m)	H_9 (m)	H_{10} (m)
x (m)	0	0.457	0.562	0.634	1.155	1.279	1.914	2.571	3.23	3.867
1	0.41	0.41	0.41	0.41	0.39	0.38	0.35	0.32	0.29	0.26
2	0.46	0.47	0.46	0.47	0.44	0.42	0.38	0.34	0.29	0.25
3	0.50	0.51	0.49	0.50	0.47	0.44	0.39	0.35	0.29	0.24
4	0.54	0.55	0.53	0.54	0.51	0.48	0.41	0.36	0.29	0.24
5	0.52	0.54	0.52	0.53	0.49	0.45	0.39	0.33	0.25	0.19
6	0.55	0.56	0.54	0.55	0.51	0.47	0.39	0.33	0.25	0.18
7	0.61	0.64	0.61	0.62	0.58	0.53	0.45	0.39	0.30	0.22
8	0.65	0.67	0.64	0.66	0.60	0.56	0.47	0.41	0.31	0.23
9	0.68	0.70	0.67	0.68	0.63	0.58	0.48	0.41	0.30	0.22
10	0.90	0.93	0.89	0.91	0.85	0.79	0.69	0.61	0.49	0.40
11	0.94	0.97	0.94	0.95	0.89	0.83	0.71	0.62	0.49	0.38
12	0.95	0.98	0.94	0.96	0.76	0.69	0.70	0.60	0.45	0.34
13	0.98	1.02	0.98	1.00	0.70	0.64	0.71	0.61	0.45	0.33
14	1.08	1.12	1.07	1.09	0.90	0.83	0.79	0.68	0.52	0.39
15	1.10	1.15	1.10	1.12	0.84	0.76	0.81	0.70	0.53	0.39
16	0.99	1.03	0.98	1.00	0.76	0.69	0.72	0.62	0.47	0.34
17	0.96	1.00	0.96	0.98	0.72	0.66	0.72	0.63	0.49	0.38
18	0.79	0.82	0.78	0.80	0.75	0.70	0.59	0.51	0.40	0.31
19	0.66	0.69	0.66	0.67	0.62	0.57	0.48	0.42	0.30	0.22
20	0.60	0.62	0.60	0.61	0.56	0.52	0.44	0.38	0.29	0.21
21	0.53	0.55	0.53	0.54	0.50	0.46	0.39	0.33	0.26	0.19
22	0.48	0.49	0.47	0.48	0.45	0.42	0.37	0.32	0.26	0.21
23	0.41	0.42	0.41	0.42	0.40	0.38	0.34	0.31	0.27	0.23
24	0.37	0.38	0.37	0.38	0.36	0.35	0.32	0.30	0.27	0.24

Π Ι-11 Τρίτο πείραμα. Υπολογισμός κλίσης (J) γραμμής ενέργειας ανάμεσα σε διαφορετικά πιεζόμετρα και υπολογισμός του συντελεστή τραχύτητας (f).

α/α	Q (m ³ /s)	Re	ΔH_{4-10} (m)	ΔL_{4-10} (m)	J ₄₋₁₀	f ₄₋₁₀	ΔH_{6-10} (m)	ΔL_{6-10} (m)	J ₆₋₁₀	f ₆₋₁₀
1	0.0063	67343	0.152	3.233	0.0470	0.1548	0.117	2.588	0.0452	0.1488
2	0.0075	79902	0.220	3.233	0.0680	0.1589	0.169	2.588	0.0653	0.1526
3	0.0082	86771	0.260	3.233	0.0803	0.1591	0.200	2.588	0.0773	0.1532
4	0.0089	95006	0.306	3.233	0.0947	0.1566	0.239	2.588	0.0923	0.1527
5	0.0095	100633	0.340	3.233	0.1052	0.1550	0.264	2.588	0.1020	0.1503
6	0.0099	105545	0.372	3.233	0.1151	0.1542	0.289	2.588	0.1117	0.1496
7	0.0103	109436	0.400	3.233	0.1237	0.1541	0.311	2.588	0.1202	0.1497
8	0.0106	112804	0.425	3.233	0.1314	0.1540	0.331	2.588	0.1279	0.1500
9	0.0112	118885	0.467	3.233	0.1443	0.1524	0.367	2.588	0.1418	0.1497
10	0.0117	124847	0.507	3.233	0.1568	0.1501	0.394	2.588	0.1520	0.1456
11	0.0124	131879	0.571	3.233	0.1767	0.1516	0.447	2.588	0.1727	0.1482
12	0.0130	138554	0.624	3.233	0.1931	0.1501	0.354	2.588	0.1368	0.1063
13	0.0135	143242	0.670	3.233	0.2074	0.1508	0.308	2.588	0.1190	0.0866
14	0.0139	147780	0.710	3.233	0.2195	0.1500	0.442	2.588	0.1708	0.1167
15	0.0142	151022	0.731	3.233	0.2262	0.1480	0.372	2.588	0.1435	0.0939
16	0.0134	142625	0.661	3.233	0.2044	0.1500	0.349	2.588	0.1347	0.0988
17	0.0128	135826	0.601	3.233	0.1860	0.1504	0.285	2.588	0.1101	0.0891
18	0.0116	123071	0.489	3.233	0.1513	0.1491	0.387	2.588	0.1493	0.1471
19	0.0111	117769	0.454	3.233	0.1406	0.1512	0.355	2.588	0.1372	0.1476
20	0.0103	109838	0.397	3.233	0.1228	0.1519	0.310	2.588	0.1198	0.1482
21	0.0096	102583	0.349	3.233	0.1079	0.1531	0.271	2.588	0.1047	0.1485
22	0.0085	90497	0.274	3.233	0.0846	0.1542	0.213	2.588	0.0823	0.1500
23	0.0071	75947	0.194	3.233	0.0599	0.1549	0.150	2.588	0.0580	0.1499
24	0.0061	65352	0.141	3.233	0.0436	0.1522	0.11	2.588	0.0417	0.1458

Π Ι–12 Τρίτο πείραμα. Υπολογισμός κλίσης (J) γραμμής ενέργειας ανάμεσα σε διαφορετικά πιεζόμετρα και υπολογισμός του συντελεστή τραχύτητας (f).

a/α	Q (m ³ /s)	ΔH ₇₋₁₀ (m)	ΔL ₇₋₁₀ (m)	J ₇₋₁₀	f ₇₋₁₀	ΔH ₈₋₁₀ (m)	ΔL ₈₋₁₀ (m)	J ₈₋₁₀	f ₈₋₁₀	ΔH ₉₋₁₀ (m)	ΔL ₉₋₁₀ (m)	J ₉₋₁₀	f ₉₋₁₀
1	0.0063	0.086	1.953	0.0443	0.1457	0.061	1.296	0.0470	0.1546	0.028	0.637	0.0440	0.1446
2	0.0075	0.125	1.953	0.0640	0.1496	0.090	1.296	0.0692	0.1618	0.041	0.637	0.0644	0.1504
3	0.0082	0.147	1.953	0.0755	0.1495	0.106	1.296	0.0817	0.1619	0.048	0.637	0.0754	0.1493
4	0.0089	0.175	1.953	0.0895	0.1480	0.127	1.296	0.0979	0.1619	0.057	0.637	0.0895	0.1479
5	0.0095	0.196	1.953	0.1004	0.1479	0.139	1.296	0.1074	0.1583	0.063	0.637	0.0989	0.1457
6	0.0099	0.213	1.953	0.1091	0.1462	0.152	1.296	0.1172	0.1570	0.069	0.637	0.1083	0.1451
7	0.0103	0.229	1.953	0.1170	0.1458	0.162	1.296	0.1250	0.1558	0.073	0.637	0.1146	0.1428
8	0.0106	0.241	1.953	0.1233	0.1446	0.175	1.296	0.1347	0.1580	0.078	0.637	0.1224	0.1436
9	0.0112	0.268	1.953	0.1372	0.1449	0.193	1.296	0.1488	0.1571	0.086	0.637	0.1350	0.1425
10	0.0117	0.293	1.953	0.1502	0.1438	0.211	1.296	0.1628	0.1559	0.094	0.637	0.1476	0.1413
11	0.0124	0.327	1.953	0.1673	0.1435	0.238	1.296	0.1836	0.1576	0.105	0.637	0.1648	0.1414
12	0.0130	0.359	1.953	0.1838	0.1429	0.260	1.296	0.2006	0.1559	0.115	0.637	0.1805	0.1403
13	0.0135	0.385	1.953	0.1971	0.1433	0.281	1.296	0.2165	0.1575	0.125	0.637	0.1962	0.1427
14	0.0139	0.403	1.953	0.2063	0.1409	0.299	1.296	0.2308	0.1577	0.133	0.637	0.2088	0.1427
15	0.0142	0.421	1.953	0.2154	0.1410	0.311	1.296	0.2399	0.1570	0.137	0.637	0.2151	0.1407
16	0.0134	0.378	1.953	0.1938	0.1421	0.275	1.296	0.2123	0.1558	0.123	0.637	0.1931	0.1416
17	0.0128	0.344	1.953	0.1760	0.1424	0.250	1.296	0.1933	0.1563	0.111	0.637	0.1743	0.1409
18	0.0116	0.282	1.953	0.1444	0.1423	0.202	1.296	0.1562	0.1539	0.091	0.637	0.1429	0.1407
19	0.0111	0.260	1.953	0.1332	0.1433	0.208	1.296	0.1603	0.1725	0.083	0.637	0.1303	0.1402
20	0.0103	0.230	1.953	0.1177	0.1456	0.164	1.296	0.1264	0.1563	0.074	0.637	0.1162	0.1437
21	0.0096	0.202	1.953	0.1036	0.1469	0.143	1.296	0.1103	0.1564	0.066	0.637	0.1036	0.1469
22	0.0085	0.158	1.953	0.0811	0.1477	0.110	1.296	0.0846	0.1542	0.050	0.637	0.0785	0.1430
23	0.0071	0.113	1.953	0.0579	0.1499	0.078	1.296	0.0600	0.1552	0.038	0.637	0.0597	0.1543
24	0.0061	0.082	1.953	0.0418	0.1461	0.056	1.296	0.0430	0.1503	0.028	0.637	0.0440	0.1536

$$f_{i-(i+1)} = \frac{g\pi^2 D^5 J_{i-(i+1)}}{8Q^2}$$

Παράρτημα II

Παρατίθενται πίνακες από την μετέπειτα επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε.

Περιεχόμενα

- Π II—1** Θεωρητικός υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση σχέσεων Swamme & Jain.
Theoretical calculation of linear losses (h_f) using Swamme & Jain relationship.
- Π II—2** Θεωρητικός υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση σχέσεων Colebrook-White (για λείους αγωγούς).
Theoretical calculation of linear losses (h_f) using Colebrook-White relationship for smooth pipes.
- Π II—3** Θεωρητικός υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση σχέσεων Colebrook-White (για τραχείς αγωγούς).
Theoretical calculation of linear losses (h_f) using Colebrook-White relationship for rough pipes.
- Π II—4** Θεωρητικός υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση σχέσεων Colebrook-White (για ενδιάμεσους αγωγούς).
Theoretical calculation of linear losses (h_f) using Colebrook-White relationship.
- Π II—5** Θεωρητικός υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση γενικευμένης εξίσωσης Manning.
Theoretical calculation of linear losses (h_f) using the generalized Manning equation.
- Π II—6** Θεωρητικός υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση θεωρίας Shames.
Theoretical calculation of linear losses (h_f) using Shames' relationship.
- Π II—7** Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Swamme & Jain και θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a).
Theoretical calculation of equivalent diameter (D_{ave}) for linear losses calculated by Swamme & Jain theory and theoretical calculation of local losses (h_a).
- Π II—8** Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Colebrook-White (για λείους αγωγούς) και θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a).
Theoretical calculation of equivalent diameter (D_{ave}) for linear losses calculated by Colebrook-White (for smooth pipes) theory and theoretical calculation of local losses (h_a).
- Π II—9** Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Colebrook-White (για τραχείς αγωγούς) και θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a).
Theoretical calculation of equivalent diameter (D_{ave}) for linear losses calculated by Colebrook-White (for rough pipes) theory and theoretical calculation of local losses (h_a).

- Π II—10** Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Colebrook-White και θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a).
- Theoretical calculation of equivalent diameter (D_{ave}) for linear losses calculated by Colebrook-White theory and theoretical calculation of local losses (h_a).
- Π II—11** Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία γενικευμένης εξίσωσης Manning και θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a).
- Theoretical calculation of equivalent diameter (D_{ave}) for linear losses calculated by Generalized Manning equation and theoretical calculation of local losses (h_a).
- Π II—12** Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από τη θεωρία του Shames και θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a).
- Theoretical calculation of equivalent diameter (D_{ave}) for linear losses calculated from Shames' equation and theoretical calculation of local losses (h_a).
- Π II—13** Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για ολικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα $k_s = 1$ mm.
- Theoretical calculation of equivalent diameter (D_{ave}) for total losses calculated with Swamme & Jain theory for Nikuradse Roughness $k_s = 1$ mm.
- Π II—14** Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης τραχύτητας k_s για μέση διάμετρο (D_{ave}) ίση με 10.3 cm και ολικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Swamme & Jain.
- Theoretical calculation of Nikuradse Roughness k_s for total losses calculated by Swamme & Jain theory and equivalent diameter equal to $D_{ave} = 10.3$ cm.
- Π II—15** Αποτελέσματα των Webster et al. (2010).
- Experimental results of Webster et al. (2010).
- Π II—15a** Θεωρητικός υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με σχέση των Swamme & Jain.
- Theoretical calculation of linear losses calculated by Swamme & Jain relationship.
- Π II—15b** Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Swamme & Jain και θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a).
- Theoretical calculation of equivalent diameter (D_{ave}) for linear losses calculated by Swamme & Jain theory and theoretical calculation of local losses (h_a).
- Π II—16** Ανάλυση ευαισθησίας. Υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση θεωρίας Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα $k_s = 1$ mm.
- Sensitivity analysis. Calculation of linear losses (h_f) using Swamme & Jain theory with Nikuradse roughness $k_s = 1$ mm.
- Π II—17** Ανάλυση ευαισθησίας. Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα $k_s = 1$ mm.

Sensitivity analysis. Theoretical calculation of equivalent diameter (D_{ave}) for linear losses calculated by Swamme & Jain theory with Nikuradse roughness $k_s = 1$ mm.

- Π II—18** Ανάλυση ευαισθησίας. Υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση θεωρίας Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα $k_s=0.5$ mm.

Sensitivity analysis. Calculation of linear losses (h_f) using Swamme & Jain theory with Nikuradse roughness $k_s = 0.5$ mm.

- Π II—19** Ανάλυση ευαισθησίας. Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα $k_s = 0.5$ mm.

Sensitivity analysis. Theoretical calculation of equivalent diameter (D_{ave}) for linear losses calculated by Swamme & Jain theory for Nikuradse roughness $k_s = 0.5$ mm.

- Π II—20** Ανάλυση ευαισθησίας. Υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση θεωρίας Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα $k_s=0.2$ mm.

Sensitivity analysis. Calculation of linear losses (h_f) using Swamme & Jain theory for Nikuradse roughness $k_s = 0.5$ mm.

- Π II—21** Ανάλυση ευαισθησίας. Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα $k_s=0.2$ mm.

Sensitivity analysis. Theoretical calculation of equivalent diameter (D_{ave}) for linear losses calculated by Swamme & Jain theory for Nikuradse roughness $k_s = 0.2$ mm.

- Π II—22** Διερεύνηση απότομης διεύρυνσης. Θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a), έχοντας ως δεδομένες τις γραμμικές απώλειες (h_f) από την θεωρία των Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα ίση με $k_s = 1$ mm και την κλίση της γραμμής ενέργειας (J πείραμα 3) από το τρίτο πείραμα.

Investigation of sudden expansion. Theoretical calculation of local losses (h_a), for given linear losses (h_f) from the Swamme & Jain theory for Nikuradse roughness $k_s = 1$ mm and energy grade line slope (J experiment 3) from the third experiment.

- Π II—22a** Θεωρητικός υπολογισμός διαμέτρου διατομής εισόδου (D_{in}) για δεδομένη διάμετρο εξόδου (D_{out}).

Theoretical calculation of input diameter (D_{in}), for given output diameter (D_{out}).

- Π II—22b** Θεωρητικός υπολογισμός διαμέτρου διατομής εξόδου (D_{out}) για δεδομένη διάμετρο εισόδου (D_{in}).

Theoretical calculation of output diameter (D_{out}), for given input diameter (D_{in}).

- Π II—23** Διερεύνηση απότομης διεύρυνσης. Θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a), έχοντας ως δεδομένες τις γραμμικές απώλειες (h_f) από την θεωρία των Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα ίση με $k_s = 0.5$ mm και την κλίση της γραμμής ενέργειας (J πείραμα 3) από το τρίτο πείραμα.

Investigation of sudden expansion. Theoretical calculation of local losses (h_a), for given linear losses (h_f) from the Swamme & Jain theory for Nikuradse roughness $k_s = 0.5$ mm and energy grade line slope (J experiment 3) from the third experiment.

Π ΙΙ–23a Θεωρητικός υπολογισμός διαμέτρου διατομής εισόδου (D_{in}) για δεδομένη διάμετρο εξόδου (D_{out}).
Theoretical calculation of input diameter (D_{in}), for given output diameter (D_{out}).

Π ΙΙ–23b Θεωρητικός υπολογισμός διαμέτρου διατομής εξόδου (D_{out}) για δεδομένη διάμετρο εισόδου (D_{in}).
Theoretical calculation of output diameter (D_{out}), for given input diameter (D_{in}).

Π ΙΙ–24 Διερεύνηση απότομης διεύρυνσης. Θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a), έχοντας ως δεδομένες τις γραμμικές απώλειες (h_f) από την θεωρία των Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα ίση με $k_s = 0.2$ mm και την κλίση της γραμμής ενέργειας (J πείραμα 3) από το τρίτο πείραμα. Investigation of sudden expansion.

Investigation of sudden expansion. Theoretical calculation of local losses (h_a), for given linear losses (h_f) from the Swamme & Jain theory for Nikuradse roughness $k_s = 0.2$ mm and energy grade line slope (J experiment 3) from the third experiment.

Π ΙΙ–24a Θεωρητικός υπολογισμός διαμέτρου διατομής εισόδου (D_{in}) για δεδομένη διάμετρο εξόδου (D_{out}).
Theoretical calculation of input diameter (D_{in}), for given output diameter (D_{out}).

Π ΙΙ–24b Θεωρητικός υπολογισμός διαμέτρου διατομής εξόδου (D_{out}) για δεδομένη διάμετρο εισόδου (D_{in}).
Theoretical calculation of output diameter (D_{out}), for given input diameter (D_{in}).

Π II-1 Θεωρητικός υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση σχέσεων Swamme & Jain.

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	L (m)	k_s (m)	x (m)	D(x) (m)	$k_s/D(x)$	V(x) (m/s)	Re(x)	f(x) (m)	J(x)	dhf(x) (m)	$h_f(x)$ (m)
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.00	0.135	0.0074	0.489	57409	0.0359	0.0032	-	0
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.05	0.131	0.0076	0.519	59127	0.0362	0.0038	0.00018	0.0002
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.10	0.127	0.0079	0.551	60951	0.0365	0.0044	0.00021	0.0004
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.15	0.123	0.0081	0.587	62891	0.0368	0.0052	0.00024	0.0006
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.20	0.119	0.0084	0.626	64959	0.0371	0.0062	0.00029	0.0009
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.25	0.115	0.0087	0.669	67168	0.0374	0.0074	0.00034	0.0012
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.30	0.111	0.0090	0.717	69532	0.0378	0.0089	0.00041	0.0017
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.35	0.108	0.0093	0.771	72069	0.0381	0.0107	0.00049	0.0021
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.40	0.104	0.0097	0.830	74797	0.0386	0.0131	0.00060	0.0027
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.45	0.100	0.0100	0.897	77741	0.0390	0.0160	0.00073	0.0035
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.50	0.096	0.0104	0.972	80925	0.0395	0.0198	0.00090	0.0044
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.55	0.092	0.0109	1.057	84382	0.0400	0.0247	0.00111	0.0055
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.60	0.088	0.0114	1.153	88147	0.0405	0.0312	0.00140	0.0069
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.65	0.084	0.0119	1.263	92264	0.0411	0.0398	0.00177	0.0087

$$D(x)_n = D(x)_{n-1} - \frac{(x_n - x_{n-1})(D_{in} - D_{out})}{L}$$

$$J(x) = \frac{f(x) V^2(x)}{D(x) 2g}$$

$$Re(x) = \frac{V(x)D(x)}{v}$$

$$\bar{J}(x) = \frac{J(x_n) + J(x_{n-1})}{2}$$

$$V(x) = \frac{Q}{A(x)} = \frac{4Q}{\pi D^2(x)}$$

$$h_f(x) = \bar{J}(x) \Delta x$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{0.27k_s}{D(x)} + \frac{5.72}{Re(x)^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Π ΙΙ–2 Θεωρητικός υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση σχέσεων Colebrook-White (για λείους αγωγούς).

Q (L/s)	D _{in} (m)	D _{out} (m)	L (m)	ks (m)	x (m)	D(x) (m)	ks/D(x)	V(x) (m/s)	Re(x)	f(x) (m)	J(x)	dhf(x) (m)	h _f (x) (m)	εξ. Col & White	Όρος σύγκλισης
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.00	0.135	0.0074	0.489	57409	0.0163	0.0015	-	0.0000	0.0208	4.56E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.05	0.131	0.0076	0.519	59127	0.0162	0.0017	0.0001	0.0001	0.0207	4.52E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.10	0.127	0.0079	0.551	60951	0.0161	0.0020	0.0001	0.0002	0.0205	4.48E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.15	0.123	0.0081	0.587	62891	0.0160	0.0023	0.0001	0.0003	0.0204	4.43E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.20	0.119	0.0084	0.626	64959	0.0159	0.0027	0.0001	0.0004	0.0203	4.39E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.25	0.115	0.0087	0.669	67168	0.0158	0.0031	0.0001	0.0005	0.0201	4.34E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.30	0.111	0.0090	0.717	69532	0.0157	0.0037	0.0002	0.0007	0.0200	4.29E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.35	0.108	0.0093	0.771	72069	0.0155	0.0044	0.0002	0.0009	0.0198	4.25E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.40	0.104	0.0097	0.830	74797	0.0154	0.0052	0.0002	0.0012	0.0196	4.20E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.45	0.100	0.0100	0.897	77741	0.0153	0.0063	0.0004	0.0014	0.0195	4.15E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.50	0.096	0.0104	0.972	80925	0.0152	0.0076	0.0004	0.0018	0.0193	4.10E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.55	0.092	0.0109	1.057	84382	0.0151	0.0093	0.0004	0.0022	0.0191	4.04E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.60	0.088	0.0114	1.153	88147	0.0150	0.0115	0.0005	0.0027	0.0189	3.99E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.65	0.084	0.0119	1.263	92264	0.0148	0.0144	0.0007	0.0034	0.0188	3.93E-01

$$D(x)_n = D(x)_{n-1} - \frac{(x_n - x_{n-1})(D_{in} - D_{out})}{L}$$

$$Re(x) = \frac{V(x)D(x)}{\nu}$$

$$V(x) = \frac{Q}{A(x)} = \frac{4Q}{\pi D^2(x)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{9.35}{Re \sqrt{f}} \right)$$

$$J(x) = \frac{f(x) V^2(x)}{D(x) 2g}$$

$$\bar{J}(x) = \frac{J(x_n) + J(x_{n-1})}{2}$$

$$h_f(x) = \bar{J}(x) \Delta x$$

Π ΙΙ–3 Θεωρητικός υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση σχέσεων Colebrook-White (για τραχείς αγωγούς).

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	L (m)	k_s (m)	x (m)	D(x) (m)	$k_s/D(x)$	V(x) (m/s)	Re(x)	f(x) (m)	J(x)	dhf(x) (m)	$h_f(x)$ (m)
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.00	0.135	0.0074	0.489	57409	0.0343	0.0031		0
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.05	0.131	0.0076	0.519	59127	0.0346	0.0036	1.68E-04	0.0002
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.10	0.127	0.0079	0.551	60951	0.0350	0.0043	1.97E-04	0.0004
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.15	0.123	0.0081	0.587	62891	0.0353	0.0050	2.32E-04	0.0006
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.20	0.119	0.0084	0.626	64959	0.0357	0.0060	2.75E-04	0.0009
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.25	0.115	0.0087	0.669	67168	0.0361	0.0071	3.28E-04	0.0012
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.30	0.111	0.0090	0.717	69532	0.0365	0.0086	3.93E-04	0.0016
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.35	0.108	0.0093	0.771	72069	0.0369	0.0104	4.75E-04	0.0021
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.40	0.104	0.0097	0.830	74797	0.0374	0.0127	5.77E-04	0.0026
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.45	0.100	0.0100	0.897	77741	0.0379	0.0156	7.06E-04	0.0034
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.50	0.096	0.0104	0.972	80925	0.0384	0.0193	8.72E-04	0.0042
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.55	0.092	0.0109	1.057	84382	0.0390	0.0241	1.09E-03	0.0053
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.60	0.088	0.0114	1.153	88147	0.0396	0.0305	1.37E-03	0.0067
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.65	0.084	0.0119	1.263	92264	0.0402	0.0389	1.73E-03	0.0084

$$D(x)_n = D(x)_{n-1} - \frac{(x_n - x_{n-1})(D_{in} - D_{out})}{L}$$

$$J(x) = \frac{f(x) V^2(x)}{D(x) 2g}$$

$$Re(x) = \frac{V(x)D(x)}{\nu}$$

$$\bar{J}(x) = \frac{J(x_n) + J(x_{n-1})}{2}$$

$$V(x) = \frac{Q}{A(x)} = \frac{4Q}{\pi D^2(x)}$$

$$h_f(x) = \bar{J}(x)\Delta x$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log\left(\frac{k_s}{D}\right)$$

Π ΙΙ-4 Θεωρητικός υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση σχέσεων Colebrook-White (για ενδιάμεσους αγωγούς).

Q (L/s)	D _{in} (m)	D _{out} (m)	L (m)	ks (m)	x (m)	D(x) (m)	ks/D(x)	V(x) (m/s)	Re(x)	f(x) (m)	J(x)	dhf(x) (m)	h _f (x) (m)	Col & White	Όρος σύγκλισης
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.0	0.135	0.0074	0.489	57409	0.0383	0.0035		0	0.0355	-2.77E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.1	0.131	0.0076	0.519	59127	0.0384	0.0040	1.87E-04	0.0002	0.0358	-2.66E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.1	0.127	0.0079	0.551	60951	0.0386	0.0047	2.18E-04	0.0004	0.0361	-2.54E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.2	0.123	0.0081	0.587	62891	0.0388	0.0055	2.56E-04	0.0007	0.0364	-2.43E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.2	0.119	0.0084	0.626	64959	0.0390	0.0065	3.02E-04	0.0010	0.0367	-2.32E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.3	0.115	0.0087	0.669	67168	0.0392	0.0078	3.58E-04	0.0013	0.0370	-2.22E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.3	0.111	0.0090	0.717	69532	0.0395	0.0093	4.27E-04	0.0017	0.0374	-2.11E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.4	0.108	0.0093	0.771	72069	0.0398	0.0112	5.12E-04	0.0023	0.0378	-2.00E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.4	0.104	0.0097	0.830	74797	0.0401	0.0136	6.20E-04	0.0029	0.0382	-1.90E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.5	0.100	0.0100	0.897	77741	0.0404	0.0166	7.56E-04	0.0036	0.0386	-1.79E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.5	0.096	0.0104	0.972	80925	0.0408	0.0205	9.28E-04	0.0046	0.0391	-1.69E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.6	0.092	0.0109	1.057	84382	0.0412	0.0255	1.15E-03	0.0057	0.0396	-1.59E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.6	0.088	0.0114	1.153	88147	0.0417	0.0321	1.44E-03	0.0072	0.0402	-1.49E-01
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.7	0.084	0.0119	1.263	92264	0.0421	0.0408	1.82E-03	0.0090	0.0408	-1.39E-01

$$D(x)_n = D(x)_{n-1} - \frac{(x_n - x_{n-1})(D_{in} - D_{out})}{L}$$

$$Re(x) = \frac{V(x)D(x)}{v}$$

$$V(x) = \frac{Q}{A(x)} = \frac{4Q}{\pi D^2(x)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{k_s}{D} + \frac{9.35}{Re \sqrt{f}} \right)$$

$$J(x) = \frac{f(x) V^2(x)}{D(x) 2g}$$

$$\bar{J}(x) = \frac{J(x_n) + J(x_{n-1})}{2}$$

$$h_f(x) = \bar{J}(x) \Delta x$$

Π II-5 Θεωρητικός υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση γενικευμένης εξίσωσης Manning.

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	L (m)	x (m)	D(x) (m)	V(x) (m/s)	J(x)	dhf(x)	$h_f(x)$ (m)
7	0.135	0.084	0.65	0.0	0.135	0.489	0.0036		0
7	0.135	0.084	0.65	0.1	0.131	0.519	0.0041	0.0002	0.0002
7	0.135	0.084	0.65	0.1	0.127	0.551	0.0049	0.0002	0.0004
7	0.135	0.084	0.65	0.2	0.123	0.587	0.0057	0.0003	0.0007
7	0.135	0.084	0.65	0.2	0.119	0.626	0.0068	0.0003	0.0010
7	0.135	0.084	0.65	0.3	0.115	0.669	0.0081	0.0004	0.0014
7	0.135	0.084	0.65	0.3	0.111	0.717	0.0097	0.0004	0.0018
7	0.135	0.084	0.65	0.4	0.108	0.771	0.0117	0.0005	0.0023
7	0.135	0.084	0.65	0.4	0.104	0.830	0.0142	0.0006	0.0030
7	0.135	0.084	0.65	0.5	0.100	0.897	0.0174	0.0008	0.0038
7	0.135	0.084	0.65	0.5	0.096	0.972	0.0214	0.0010	0.0047
7	0.135	0.084	0.65	0.6	0.092	1.057	0.0266	0.0012	0.0059
7	0.135	0.084	0.65	0.6	0.088	1.153	0.0335	0.0015	0.0075
7	0.135	0.084	0.65	0.7	0.084	1.263	0.0425	0.0019	0.0094

$$D(x)_n = D(x)_{n-1} - \frac{(x_n - x_{n-1})(D_{in} - D_{out})}{L}$$

$$\bar{J}(x) = \frac{J(x_n) + J(x_{n-1})}{2}$$

$$Re(x) = \frac{V(x)D(x)}{v}$$

$$h_f(x) = \bar{J}(x)\Delta x$$

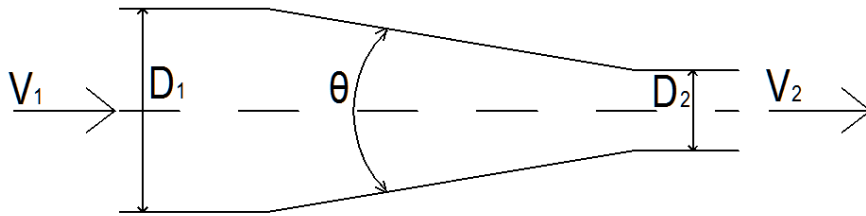
$$V(x) = \frac{Q}{A(x)} = \frac{4Q}{\pi D^2(x)}$$

$$J(x) = \left(\frac{4^{1+\beta} N^2 V^2(x)}{D^{1+b}(x)} \right)^{\frac{1}{1+\gamma}}$$

ϵ (mm)	1.0
β	0.29000
γ	0.01400
N	0.01280

Π ΙΙ–6 Θεωρητικός υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση θεωρίας Shames.

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	L (m)	Θ (deg)	K	V_{in} (m)	h_f (m)
	0.135	0.084	0.65				
2	0.135	0.084	0.65	4.48	0.2514	0.140	0.0003
4	0.135	0.084	0.65	4.48	0.2514	0.279	0.0010
6	0.135	0.084	0.65	4.48	0.2514	0.419	0.0023
8	0.135	0.084	0.65	4.48	0.2514	0.559	0.0040
10	0.135	0.084	0.65	4.48	0.2514	0.699	0.0063
12	0.135	0.084	0.65	4.48	0.2514	0.838	0.0090
14	0.135	0.084	0.65	4.48	0.2514	0.978	0.0123
16	0.135	0.084	0.65	4.48	0.2514	1.118	0.0160
18	0.135	0.084	0.65	4.48	0.2514	1.258	0.0203
20	0.135	0.084	0.65	4.48	0.2514	1.397	0.0250



$$K = \frac{0.8 \sin \theta [1 - (D_2/D_1)^2]}{(D_2/D_1)^4}, \quad \Theta < 45^\circ$$

$$h_f = K \frac{V_1^2}{2g}$$

Π ΙΙ–7 Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Swamme & Jain και θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a).

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	k_s (m)	V_{out} (m)	D_{ave} (m)	k_s/D_{ave}	V_{ave} (m/s)	Re_{ave}	f_{ave} (m)	J_{ave}	J	h_f (m)	dJ	100XdJ	h_a (m)	h_{tot} (m)
2	0.135	0.084	0.001	0.361	0.103	0.010	0.239	21437	0.0408	0.0011	0.0011	0.0007	0.0000	8.83E-05	0.0025	0.0032
4	0.135	0.084	0.001	0.722	0.103	0.010	0.478	42890	0.0393	0.0044	0.0044	0.0029	0.0000	3.34E-04	0.0100	0.0128
6	0.135	0.084	0.001	1.083	0.103	0.010	0.717	64343	0.0388	0.0098	0.0098	0.0064	0.0000	7.37E-04	0.0224	0.0288
8	0.135	0.084	0.001	1.444	0.103	0.010	0.955	85785	0.0385	0.0173	0.0173	0.0113	0.0000	8.52E-06	0.0399	0.0512
10	0.135	0.084	0.001	1.804	0.103	0.010	1.194	107236	0.0383	0.0270	0.0270	0.0175	0.0000	1.32E-05	0.0623	0.0799
12	0.135	0.084	0.001	2.165	0.103	0.010	1.433	128688	0.0382	0.0387	0.0387	0.0252	0.0000	1.89E-05	0.0898	0.1149
14	0.135	0.084	0.001	2.526	0.103	0.010	1.672	150139	0.0381	0.0526	0.0526	0.0342	0.0000	2.56E-05	0.1222	0.1564
16	0.135	0.084	0.001	2.887	0.103	0.010	1.911	171591	0.0380	0.0686	0.0686	0.0446	0.0000	3.33E-05	0.1596	0.2041
18	0.135	0.084	0.001	3.248	0.103	0.010	2.150	193042	0.0380	0.0867	0.0867	0.0563	0.0000	4.21E-05	0.2019	0.2583
20	0.135	0.084	0.001	3.609	0.103	0.010	2.389	214494	0.0379	0.1069	0.1069	0.0695	0.0000	5.18E-05	0.2493	0.3188

Π ΙΙ–8 Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Colebrook-White (για λείους αγωγούς) και θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a).

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	k_s (m)	V_{out} (m)	D_{ave} (m)	k_s/D_{ave}	V_{ave} (m/s)	Re_{ave}	f_{ave} (m)	J_{ave}	J	h_f (m)	dJ	100XdJ	h_a (m)	h_{tot} (m)
2	0.135	0.084	0.001	0.361	0.114	0.009	0.197	19481	0.0400	0.0007	0.0007	0.0005	0.0000	-2.89E-04	0.0025	0.0029
4	0.135	0.084	0.001	0.722	0.116	0.009	0.377	38122	0.0382	0.0024	0.0024	0.0015	0.0000	3.10E-04	0.0100	0.0115
6	0.135	0.084	0.001	1.083	0.118	0.008	0.550	56376	0.0374	0.0049	0.0049	0.0032	0.0000	-1.18E-04	0.0224	0.0256
8	0.135	0.084	0.001	1.444	0.119	0.008	0.719	74428	0.0370	0.0082	0.0082	0.0053	0.0000	-4.21E-05	0.0399	0.0452
10	0.135	0.084	0.001	1.804	0.120	0.008	0.885	92318	0.0367	0.0122	0.0122	0.0079	0.0000	-2.61E-04	0.0623	0.0703
12	0.135	0.084	0.001	2.165	0.121	0.008	1.049	110091	0.0364	0.0169	0.0169	0.0110	0.0000	-1.25E-05	0.0898	0.1008
14	0.135	0.084	0.001	2.526	0.121	0.008	1.211	127758	0.0363	0.0224	0.0224	0.0145	0.0000	-8.19E-05	0.1222	0.1367
16	0.135	0.084	0.001	2.887	0.127	0.008	1.266	139651	0.0357	0.0230	0.0230	0.0149	0.0000	9.55E-04	0.1596	0.1745
18	0.135	0.084	0.001	3.248	0.122	0.008	1.530	162853	0.0360	0.0352	0.0352	0.0228	0.0000	-8.35E-06	0.2019	0.2248
20	0.135	0.084	0.001	3.609	0.123	0.008	1.688	180299	0.0359	0.0425	0.0425	0.0276	0.0000	-5.14E-05	0.2493	0.2770

Π ΙΙ—9 Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Colebrook-White (για τραχείς αγωγούς) και θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a).

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	ks (m)	V_{out} (m)	D_{ave} (m)	ks/ D_{ave}	V_{ave} (m/s)	Re_{ave}	f_{ave} (m)	J_{ave}	J	h_f (m)	dJ	100XdJ	h_a (m)	h_{tot} (m)
2	0.135	0.084	0.001	0.361	0.105	0.010	0.231	21077	0.0406	0.0010	0.0011	0.0007	0.0000	-6.88E-04	0.0025	0.0032
4	0.135	0.084	0.001	0.722	0.104	0.010	0.469	42510	0.0392	0.0042	0.0042	0.0027	0.0000	-9.66E-05	0.0100	0.0127
6	0.135	0.084	0.001	1.083	0.104	0.010	0.708	63931	0.0387	0.0095	0.0095	0.0062	0.0000	-5.77E-04	0.0224	0.0286
8	0.135	0.084	0.001	1.444	0.104	0.010	0.946	85371	0.0384	0.0169	0.0169	0.0110	0.0000	-1.98E-05	0.0399	0.0509
10	0.135	0.084	0.001	1.804	0.104	0.010	1.185	106807	0.0382	0.0264	0.0264	0.0172	0.0000	-4.62E-05	0.0623	0.0795
12	0.135	0.084	0.001	2.165	0.104	0.010	1.424	128245	0.0381	0.0380	0.0380	0.0247	0.0000	-8.65E-05	0.0898	0.1145
14	0.135	0.084	0.001	2.526	0.104	0.010	1.662	149684	0.0380	0.0518	0.0518	0.0336	0.0000	-1.42E-04	0.1222	0.1558
16	0.135	0.084	0.001	2.887	0.104	0.010	1.901	171125	0.0380	0.0676	0.0676	0.0439	0.0000	-2.13E-04	0.1596	0.2035
18	0.135	0.084	0.001	3.248	0.103	0.010	2.140	192566	0.0379	0.0855	0.0855	0.0556	0.0000	-2.99E-04	0.2019	0.2576
20	0.135	0.084	0.001	3.609	0.103	0.010	2.379	214008	0.0379	0.1056	0.1056	0.0687	0.0000	-4.02E-04	0.2493	0.3180

Π ΙΙ—10 Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Colebrook-White και θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a).

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	ks (m)	V_{out} (m)	D_{ave} (m)	ks/ D_{ave}	V_{ave} (m/s)	Re_{ave}	f_{ave} (m)	J_{ave}	J	h_f (m)	dJ	100XdJ	h_a (m)	h_{tot} (m)
2	0.135	0.084	0.001	0.361	0.104	0.010	0.237	21360	0.0407	0.0011	0.0011	0.0007	0.0000	-2.77E-04	0.0025	0.0032
4	0.135	0.084	0.001	0.722	0.103	0.010	0.475	42792	0.0393	0.0044	0.0044	0.0029	0.0000	-2.49E-05	0.0100	0.0128
6	0.135	0.084	0.001	1.083	0.103	0.010	0.714	64223	0.0387	0.0097	0.0097	0.0064	0.0000	-5.85E-05	0.0224	0.0288
8	0.135	0.084	0.001	1.444	0.103	0.010	0.953	85658	0.0385	0.0172	0.0172	0.0113	0.0000	-1.08E-04	0.0399	0.0511
10	0.135	0.084	0.001	1.804	0.103	0.010	1.191	107095	0.0383	0.0268	0.0268	0.0175	0.0000	-1.73E-04	0.0623	0.0797
12	0.135	0.084	0.001	2.165	0.103	0.010	1.430	128534	0.0382	0.0385	0.0385	0.0252	0.0000	-2.55E-04	0.0898	0.1148
14	0.135	0.084	0.001	2.526	0.103	0.010	1.669	149974	0.0381	0.0523	0.0523	0.0342	0.0000	-3.53E-04	0.1222	0.1562
16	0.135	0.084	0.001	2.887	0.103	0.010	1.908	171415	0.0380	0.0682	0.0682	0.0446	0.0000	-4.69E-04	0.1596	0.2039
18	0.135	0.084	0.001	3.248	0.103	0.010	2.146	192857	0.0380	0.0862	0.0862	0.0563	0.0000	-6.02E-04	0.2019	0.2580
20	0.135	0.084	0.001	3.609	0.103	0.010	2.385	214299	0.0379	0.1064	0.1064	0.0695	0.0000	-7.51E-04	0.2493	0.3185

Π II–11 Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία γενικευμένης εξίσωσης Manning και θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a).

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	k_s (m)	V_{out} (m)	D_{ave} (m)	k_s/D_{ave}	V_{ave} (m/s)	Re_{ave}	f_{ave} (m)	J_{ave}	J	h_f (m)	dJ	100XdJ	h_a (m)	h_{tot} (m)
2	0.135	0.084	0.0013	0.361	0.104	0.013	0.237	21349	0.0439	0.0012	0.0012	0.0008	0.0000	-3.25E-04	0.0025	0.0033
4	0.135	0.084	0.0013	0.722	0.103	0.013	0.476	42827	0.0426	0.0048	0.0048	0.0031	0.0000	-2.59E-05	0.0100	0.0131
6	0.135	0.084	0.0013	1.083	0.103	0.013	0.715	64253	0.0421	0.0106	0.0106	0.0069	0.0000	-7.17E-05	0.0224	0.0293
8	0.135	0.084	0.0013	1.444	0.103	0.013	0.952	85646	0.0419	0.0187	0.0187	0.0122	0.0000	-5.10E-04	0.0399	0.0521
10	0.135	0.084	0.0013	1.804	0.103	0.013	1.190	107024	0.0417	0.0291	0.0291	0.0189	0.0000	6.88E-06	0.0623	0.0812
12	0.135	0.084	0.0013	2.165	0.103	0.013	1.427	128379	0.0416	0.0417	0.0417	0.0271	0.0000	2.92E-05	0.0898	0.1169
14	0.135	0.084	0.0013	2.526	0.104	0.013	1.663	149718	0.0415	0.0565	0.0565	0.0367	0.0000	8.70E-05	0.1222	0.1589
16	0.135	0.084	0.0013	2.887	0.104	0.013	1.899	171043	0.0415	0.0736	0.0736	0.0478	0.0000	2.09E-04	0.1596	0.2074
18	0.135	0.084	0.0013	3.248	0.104	0.013	2.135	192357	0.0414	0.0929	0.0928	0.0604	0.0000	4.34E-04	0.2019	0.2623
20	0.135	0.084	0.0013	3.609	0.104	0.013	2.371	213660	0.0414	0.1143	0.1143	0.0743	0.0000	8.09E-04	0.2493	0.3236

Π II–12 Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από τη θεωρία του Shames και θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a).

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	k_s (m)	V_{out} (m)	D_{ave} (m)	k_s/D_{ave}	V_{ave} (m/s)	Re_{ave}	f_{ave} (m)	J_{ave}	J	h_f (m)	dJ	100XdJ	h_a (m)	h_{tot} (m)
2	0.135	0.084	0.001	0.361	0.144	0.0069	0.122	15344	0.0386	0.0002	0.0002	0.0001	0.0000	7.87E-04	0.0025	0.0026
4	0.135	0.084	0.001	0.722	0.144	0.0070	0.247	30822	0.0364	0.0008	0.0008	0.0005	0.0000	2.85E-04	0.0100	0.0105
6	0.135	0.084	0.001	1.083	0.143	0.0070	0.373	46435	0.0357	0.0018	0.0018	0.0011	0.0000	6.35E-04	0.0224	0.0236
8	0.135	0.084	0.001	1.444	0.143	0.0070	0.499	62016	0.0352	0.0031	0.0031	0.0020	0.0000	2.48E-05	0.0399	0.0419
10	0.135	0.084	0.001	1.804	0.143	0.0070	0.626	77634	0.0350	0.0049	0.0049	0.0032	0.0000	3.83E-05	0.0623	0.0655
12	0.135	0.084	0.001	2.165	0.142	0.0070	0.753	93255	0.0348	0.0071	0.0071	0.0046	0.0000	5.47E-05	0.0898	0.0943
14	0.135	0.084	0.001	2.526	0.142	0.0070	0.879	108878	0.0347	0.0096	0.0096	0.0062	0.0000	7.39E-05	0.1222	0.1284
16	0.135	0.084	0.001	2.887	0.142	0.0070	1.006	124502	0.0346	0.0125	0.0125	0.0082	0.0000	9.60E-05	0.1596	0.1677
18	0.135	0.084	0.001	3.248	0.142	0.0070	1.133	140128	0.0345	0.0159	0.0159	0.0103	0.0000	1.21E-04	0.2019	0.2123
20	0.135	0.084	0.001	3.609	0.142	0.0070	1.260	155754	0.0344	0.0196	0.0196	0.0127	0.0000	1.49E-04	0.2493	0.2621

$$D_{ave}: 100XdJ \rightarrow 0$$

$$dJ = J_{ave} - J$$

$$h_{tot} = h_a + h_f$$

$$V_{ave} = \frac{4Q}{\pi D_{ave}^2}$$

$$f_{ave} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{0.27k_s}{D_{ave}} + \frac{5.72}{Re_{ave}^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$h_a = \left[1 - \left(\frac{D_{out}}{D_{in}} \right)^2 \right]^2 \frac{V_{out}^2}{2g}$$

$$Re_{ave} = \frac{V_{ave} D_{ave}}{\nu}$$

Π ΙΙ–13 Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για ολικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα $k_s = 1$ mm.

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	h_f+h_a (m)	J_{ave}	k_s (m)	V_{out} (m/s)	D_{ave} (m)	k_s/D_{ave}	V_{ave} (m/s)	Re_{ave}	f_{ave}	J_{ave}
2	0.135	0.084	0.0037	0.0056	0.001	0.361	0.076	0.013	0.440	29123	0.0432	0.0056
4	0.135	0.084	0.0145	0.0223	0.001	0.722	0.0759	0.013	0.885	58371	0.0425	0.0223
6	0.135	0.084	0.0326	0.0501	0.001	1.083	0.0758	0.013	1.329	87619	0.0422	0.0501
8	0.135	0.084	0.0578	0.0890	0.001	1.444	0.0758	0.013	1.773	116870	0.0421	0.0890
10	0.135	0.084	0.0903	0.1389	0.001	1.804	0.0758	0.013	2.218	146118	0.042	0.1389
12	0.135	0.084	0.1300	0.2000	0.001	2.165	0.0758	0.013	2.662	175366	0.0419	0.2000
14	0.135	0.084	0.1768	0.2720	0.001	2.526	0.0758	0.013	3.106	204613	0.0419	0.2720
16	0.135	0.084	0.2309	0.3552	0.001	2.887	0.0757	0.013	3.550	233860	0.0419	0.3552
18	0.135	0.084	0.2921	0.4494	0.001	3.248	0.0757	0.013	3.995	263108	0.0419	0.4494
20	0.135	0.084	0.3606	0.5548	0.001	3.609	0.0757	0.013	4.439	292355	0.0418	0.5548

Π ΙΙ–14 Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης τραχύτητας k_s για μέση διάμετρο (D_{ave}) ίση με 10.3 cm και ολικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Swamme & Jain.

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	h_f+h_a (m)	J_{ave}	k_s (m)	V_{out} (m/s)	D_{ave} (m)	k_s/D_{ave}	V_{ave} (m/s)	Re_{ave}	f_{ave}	J_{ave}
2	0.135	0.084	0.0037	0.0056	0.0286	0.361	0.103	0.278	0.240	21498	0.1975	0.0056
4	0.135	0.084	0.0145	0.0223	0.0283	0.722	0.103	0.275	0.480	42997	0.1959	0.0223
6	0.135	0.084	0.0326	0.0501	0.0283	1.083	0.103	0.274	0.720	64495	0.1954	0.0501
8	0.135	0.084	0.0578	0.0890	0.0282	1.444	0.103	0.274	0.960	85993	0.1951	0.0890
10	0.135	0.084	0.0903	0.1389	0.0282	1.804	0.103	0.274	1.200	107492	0.1949	0.1389
12	0.135	0.084	0.1300	0.2000	0.0282	2.165	0.103	0.273	1.440	128990	0.1948	0.2000
14	0.135	0.084	0.1768	0.2720	0.0282	2.526	0.103	0.273	1.680	150488	0.1947	0.2720
16	0.135	0.084	0.2309	0.3552	0.0281	2.887	0.103	0.273	1.920	171987	0.1947	0.3552
18	0.135	0.084	0.2921	0.4494	0.0281	3.248	0.103	0.273	2.160	193485	0.1946	0.4494
20	0.135	0.084	0.3606	0.5548	0.0281	3.609	0.103	0.273	2.400	214983	0.1946	0.5549

Π II–15 Αποτελέσματα των Webster et al. (2010). **Π II–15a** Θεωρητικός υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με σχέση των Swamme & Jain.

α/α	Q (L/s)	h_L per pipe section (1-3) (m)	h_L per joint (1-2) (m)
1	13.46	0.26	0.26
2	13.74	0.23	0.26
3	12.98	0.19	0.23
4	9.4	0.08	0.12
5	9.89	0.12	0.13
6	7.77	0.05	0.07
7	14.31	0.31	0.29

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	L (m)	k_s (m)	x (m)	D(x) (m)	$k_s/D(x)$	V(x) (m/s)	Re(x)	f(x) (m)	J(x)	dhf(x) (m)	$h_f(x)$ (m)
15	0.15	0.07	0.73	0.0005	0.00	0.150	0.0033	0.85	110716	0.0283	0.0069	-	0
15	0.15	0.07	0.73	0.0005	0.06	0.144	0.0035	0.92	115527	0.0285	0.0086	0.0004	0.0004
15	0.15	0.07	0.73	0.0005	0.11	0.138	0.0036	1.01	120776	0.0288	0.0109	0.0006	0.0010
15	0.15	0.07	0.73	0.0005	0.17	0.131	0.0038	1.11	126523	0.0291	0.0139	0.0007	0.0017
15	0.15	0.07	0.73	0.0005	0.23	0.125	0.0040	1.22	132845	0.0295	0.0179	0.0009	0.0026
15	0.15	0.07	0.73	0.0005	0.29	0.119	0.0042	1.35	139832	0.0298	0.0235	0.0012	0.0038
15	0.15	0.07	0.73	0.0005	0.34	0.113	0.0044	1.51	147595	0.0302	0.0311	0.0016	0.0053
15	0.15	0.07	0.73	0.0005	0.40	0.106	0.0047	1.69	156270	0.0306	0.0420	0.0021	0.0074
15	0.15	0.07	0.73	0.0005	0.46	0.100	0.0050	1.91	166029	0.0311	0.0578	0.0028	0.0103
15	0.15	0.07	0.73	0.0005	0.51	0.094	0.0053	2.17	177088	0.0317	0.0811	0.0040	0.0142
15	0.15	0.07	0.73	0.0005	0.57	0.088	0.0057	2.49	189725	0.0323	0.1167	0.0056	0.0199
15	0.15	0.07	0.73	0.0005	0.63	0.081	0.0062	2.89	204305	0.0329	0.1725	0.0082	0.0281
15	0.15	0.07	0.73	0.0005	0.68	0.075	0.0067	3.39	221312	0.0337	0.2632	0.0124	0.0405

Π II–15b Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Swamme & Jain και θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a).

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	k_s (m)	V_{out} (m)	D_{ave} (m)	k_s/D_{ave}	V_{ave} (m/s)	Re_{ave}	f_{ave} (m)	J_{ave}	J	h_f (m)	dJ	100XdJ	h_a (m)	h_{tot} (m)
7	0.15	0.07	0.0005	1.819	0.099	0.005	0.916	78581	0.0319	0.0139	0.0139	0.0090	0.0000	-8.93E-05	0.1032	0.1122
8	0.15	0.07	0.0005	2.079	0.099	0.005	1.047	89814	0.0318	0.0180	0.0180	0.0117	0.0000	-1.13E-04	0.1348	0.1465
9	0.15	0.07	0.0005	2.339	0.099	0.005	1.178	101048	0.0317	0.0227	0.0227	0.0148	0.0000	-1.41E-04	0.1706	0.1853
10	0.15	0.07	0.0005	2.598	0.099	0.005	1.310	112282	0.0316	0.0280	0.0280	0.0182	0.0000	-1.78E-04	0.2106	0.2287
11	0.15	0.07	0.0005	2.858	0.099	0.005	1.441	123516	0.0315	0.0338	0.0338	0.0219	0.0000	-2.15E-04	0.2548	0.2767
12	0.15	0.07	0.0005	3.118	0.099	0.005	1.572	134750	0.0314	0.0401	0.0401	0.0261	0.0000	-2.56E-04	0.3032	0.3293
13	0.15	0.07	0.0005	3.378	0.099	0.005	1.703	145984	0.0313	0.0470	0.0470	0.0305	0.0000	-3.01E-04	0.3559	0.3864
14	0.15	0.07	0.0005	3.638	0.099	0.005	1.834	157219	0.0313	0.0544	0.0544	0.0354	0.0000	-3.50E-04	0.4127	0.4481
15	0.15	0.07	0.0005	3.898	0.099	0.005	1.965	168453	0.0312	0.0624	0.0624	0.0405	0.0000	-4.02E-04	0.4738	0.5143

Π II–16 Ανάλυση ευαισθησίας. Υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση θεωρίας Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα $k_s=1$ mm.

Q (L/s)	D _{in} (m)	D _{out} (m)	L (m)	k _s (m)	x (m)	D(x) (m)	k _s /D(x)	V(x) (m/s)	Re(x)	f(x) (m)	J(x)	dhf(x) (m)	h _f (x) (m)
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.00	0.135	0.0074	0.49	57409	0.0359	0.0032	-	0
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.05	0.131	0.0076	0.52	59127	0.0362	0.0038	0.0002	0.0002
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.10	0.127	0.0079	0.55	60951	0.0365	0.0044	0.0002	0.0004
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.15	0.123	0.0081	0.59	62891	0.0368	0.0052	0.0002	0.0006
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.20	0.119	0.0084	0.63	64959	0.0371	0.0062	0.0003	0.0009
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.25	0.115	0.0087	0.67	67168	0.0374	0.0074	0.0003	0.0012
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.30	0.111	0.0090	0.72	69532	0.0378	0.0089	0.0004	0.0017
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.35	0.108	0.0093	0.77	72069	0.0381	0.0107	0.0005	0.0021
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.40	0.104	0.0097	0.83	74797	0.0386	0.0131	0.0006	0.0027
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.45	0.100	0.0100	0.90	77741	0.0390	0.0160	0.0007	0.0035
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.50	0.096	0.0104	0.97	80925	0.0395	0.0198	0.0009	0.0044
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.55	0.092	0.0109	1.06	84382	0.0400	0.0247	0.0011	0.0055
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.60	0.088	0.0114	1.15	88147	0.0405	0.0312	0.0014	0.0069
7	0.135	0.084	0.65	0.001	0.65	0.084	0.0119	1.26	92264	0.0411	0.0398	0.0018	0.0087

Π II–17 Ανάλυση ευαισθησίας. Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα $k_s = 1$ mm.

Q (L/s)	D _{in} (m)	D _{out} (m)	k _s (m)	V _{out} (m)	D _{ave} (m)	k _s /D _{ave}	V _{ave} (m/s)	Re _{ave}	f _{ave} (m)	J _{ave}	J	h _f (m)	dJ	100XdJ	h _a (m)	h _{tot} (m)
4	0.135	0.084	0.001	0.722	0.103	0.010	0.478	42893	0.0393	0.0044	0.0044	0.0029	0.0000	5.43E-04	0.0100	0.0128
5	0.135	0.084	0.001	0.902	0.103	0.010	0.597	53621	0.0390	0.0069	0.0069	0.0045	0.0000	8.47E-04	0.0156	0.0200
6	0.135	0.084	0.001	1.083	0.103	0.010	0.717	64334	0.0388	0.0098	0.0098	0.0064	0.0000	1.93E-05	0.0224	0.0288
7	0.135	0.084	0.001	1.263	0.103	0.010	0.836	75060	0.0386	0.0133	0.0133	0.0087	0.0000	2.82E-05	0.0305	0.0392
8	0.135	0.084	0.001	1.444	0.103	0.010	0.955	85785	0.0385	0.0173	0.0173	0.0113	0.0000	3.69E-05	0.0399	0.0512
9	0.135	0.084	0.001	1.624	0.103	0.010	1.075	96511	0.0384	0.0219	0.0219	0.0142	0.0000	4.67E-05	0.0505	0.0647
10	0.135	0.084	0.001	1.804	0.103	0.010	1.194	107237	0.0383	0.0270	0.0270	0.0175	0.0000	5.77E-05	0.0623	0.0799
11	0.135	0.084	0.001	1.985	0.103	0.010	1.314	117962	0.0382	0.0326	0.0326	0.0212	0.0000	6.98E-05	0.0754	0.0966
12	0.135	0.084	0.001	2.165	0.103	0.010	1.433	128688	0.0382	0.0387	0.0387	0.0252	0.0000	8.30E-05	0.0898	0.1149
13	0.135	0.084	0.001	2.346	0.103	0.010	1.553	139414	0.0381	0.0454	0.0454	0.0295	0.0000	9.74E-05	0.1053	0.1348
14	0.135	0.084	0.001	2.526	0.103	0.010	1.672	150140	0.0381	0.0526	0.0526	0.0342	0.0000	1.13E-04	0.1222	0.1564
15	0.135	0.084	0.001	2.707	0.103	0.010	1.792	160866	0.0381	0.0603	0.0603	0.0392	0.0000	1.30E-04	0.1402	0.1794

Π ΙΙ–18 Ανάλυση ευαισθησίας. Υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση θεωρίας Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα $k_s=0.5$ mm.

Q (L/s)	D _{in} (m)	D _{out} (m)	L (m)	ks (m)	x (m)	D(x) (m)	ks/D(x)	V(x) (m/s)	Re(x)	f(x) (m)	J(x)	dhf(x) (m)	h _f (x) (m)
7	0.135	0.084	0.65	0.0005	0.00	0.135	0.0037	0.489	57409	0.0300	0.0027	-	0
7	0.135	0.084	0.65	0.0005	0.05	0.131	0.0038	0.519	59127	0.0302	0.0032	0.0001	0.0001
7	0.135	0.084	0.65	0.0005	0.10	0.127	0.0039	0.551	60951	0.0303	0.0037	0.0002	0.0003
7	0.135	0.084	0.65	0.0005	0.15	0.123	0.0041	0.587	62891	0.0305	0.0043	0.0002	0.0005
7	0.135	0.084	0.65	0.0005	0.20	0.119	0.0042	0.626	64959	0.0307	0.0051	0.0002	0.0008
7	0.135	0.084	0.65	0.0005	0.25	0.115	0.0043	0.669	67168	0.0309	0.0061	0.0003	0.0010
7	0.135	0.084	0.65	0.0005	0.30	0.111	0.0045	0.717	69532	0.0311	0.0073	0.0003	0.0014
7	0.135	0.084	0.65	0.0005	0.35	0.108	0.0046	0.771	72069	0.0313	0.0088	0.0004	0.0018
7	0.135	0.084	0.65	0.0005	0.40	0.104	0.0048	0.830	74797	0.0316	0.0107	0.0005	0.0023
7	0.135	0.084	0.65	0.0005	0.45	0.100	0.0050	0.897	77741	0.0319	0.0131	0.0006	0.0029
7	0.135	0.084	0.65	0.0005	0.50	0.096	0.0052	0.972	80925	0.0322	0.0162	0.0007	0.0036
7	0.135	0.084	0.65	0.0005	0.55	0.092	0.0054	1.057	84382	0.0325	0.0201	0.0009	0.0045
7	0.135	0.084	0.65	0.0005	0.60	0.088	0.0057	1.153	88147	0.0328	0.0253	0.0011	0.0056
7	0.135	0.084	0.65	0.0005	0.65	0.084	0.0060	1.263	92264	0.0332	0.0321	0.0014	0.0071

Π ΙΙ–19 Ανάλυση ευαισθησίας. Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα $k_s = 0.5$ mm.

Q (L/s)	D _{in} (m)	D _{out} (m)	ks (m)	V _{out} (m/s)	D _{ave} (m)	ks/D _{ave}	V _{ave} (m/s)	Re _{ave}	f _{ave} (m)	J _{ave}	J	h _f (m)	dJ	100XdJ	h _a (m)	h _{tot} (m)
4	0.135	0.084	0.0005	0.722	0.103	0.005	0.477	42867	0.0326	0.0037	0.0037	0.0024	0.0000	4.88E-04	0.0100	0.0123
5	0.135	0.084	0.0005	0.902	0.103	0.005	0.597	53589	0.0321	0.0056	0.0056	0.0037	0.0000	6.72E-04	0.0156	0.0192
6	0.135	0.084	0.0005	1.083	0.103	0.005	0.716	64312	0.0318	0.0081	0.0080	0.0052	0.0000	9.66E-04	0.0224	0.0277
7	0.135	0.084	0.0005	1.263	0.103	0.005	0.835	75019	0.0316	0.0109	0.0109	0.0071	0.0000	2.06E-05	0.0305	0.0376
8	0.135	0.084	0.0005	1.444	0.103	0.005	0.954	85741	0.0314	0.0141	0.0141	0.0092	0.0000	2.86E-05	0.0399	0.0491
9	0.135	0.084	0.0005	1.624	0.103	0.005	1.074	96463	0.0313	0.0178	0.0178	0.0116	0.0000	3.52E-05	0.0505	0.0621
10	0.135	0.084	0.0005	1.804	0.103	0.005	1.193	107184	0.0312	0.0219	0.0219	0.0143	0.0000	4.35E-05	0.0623	0.0766
11	0.135	0.084	0.0005	1.985	0.103	0.005	1.313	117906	0.0311	0.0265	0.0265	0.0172	0.0000	5.26E-05	0.0754	0.0926
12	0.135	0.084	0.0005	2.165	0.103	0.005	1.432	128628	0.0310	0.0314	0.0314	0.0204	0.0000	6.43E-05	0.0898	0.1102
13	0.135	0.084	0.0005	2.346	0.103	0.005	1.552	139350	0.0310	0.0368	0.0368	0.0239	0.0000	7.55E-05	0.1053	0.1293
14	0.135	0.084	0.0005	2.526	0.103	0.005	1.671	150072	0.0309	0.0426	0.0426	0.0277	0.0000	8.76E-05	0.1222	0.1499
15	0.135	0.084	0.0005	2.707	0.103	0.005	1.790	160794	0.0309	0.0488	0.0488	0.0317	0.0000	1.01E-04	0.1402	0.1720

Π ΙΙ–20 Ανάλυση ευαισθησίας. Υπολογισμός γραμμικών απωλειών (h_f) με χρήση θεωρίας Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα $k_s=0.2$ mm.

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	L (m)	k_s (m)	x (m)	D(x) (m)	$k_s/D(x)$	V(x) (m/s)	Re(x)	$f(x)$ (m)	J(x)	d $h_f(x)$ (m)	$h_f(x)$ (m)
7	0.135	0.084	0.65	0.0002	0.00	0.135	0.001	0.489	57409	0.0251	0.0023	-	0
7	0.135	0.084	0.65	0.0002	0.05	0.131	0.002	0.519	59127	0.0251	0.0026	0.0001	0.0001
7	0.135	0.084	0.65	0.0002	0.10	0.127	0.002	0.551	60951	0.0252	0.0031	0.0001	0.0003
7	0.135	0.084	0.65	0.0002	0.15	0.123	0.002	0.587	62891	0.0253	0.0036	0.0002	0.0004
7	0.135	0.084	0.65	0.0002	0.20	0.119	0.002	0.626	64959	0.0253	0.0042	0.0002	0.0006
7	0.135	0.084	0.65	0.0002	0.25	0.115	0.002	0.669	67168	0.0254	0.0050	0.0002	0.0009
7	0.135	0.084	0.65	0.0002	0.30	0.111	0.002	0.717	69532	0.0255	0.0060	0.0003	0.0011
7	0.135	0.084	0.65	0.0002	0.35	0.108	0.002	0.771	72069	0.0256	0.0072	0.0003	0.0015
7	0.135	0.084	0.65	0.0002	0.40	0.104	0.002	0.830	74797	0.0257	0.0087	0.0004	0.0019
7	0.135	0.084	0.65	0.0002	0.45	0.100	0.002	0.897	77741	0.0258	0.0106	0.0005	0.0023
7	0.135	0.084	0.65	0.0002	0.50	0.096	0.002	0.972	80925	0.0259	0.0130	0.0006	0.0029
7	0.135	0.084	0.65	0.0002	0.55	0.092	0.002	1.057	84382	0.0261	0.0161	0.0007	0.0037
7	0.135	0.084	0.65	0.0002	0.60	0.088	0.002	1.153	88147	0.0262	0.0202	0.0009	0.0046
7	0.135	0.084	0.65	0.0002	0.65	0.084	0.002	1.263	92264	0.0264	0.0256	0.0011	0.0057

Π ΙΙ–21 Ανάλυση ευαισθησίας. Θεωρητικός υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου (D_{ave}) για γραμμικές απώλειες υπολογισμένες από θεωρία Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα $k_s =0.2$ mm.

Q (L/s)	D_{in} (m)	D_{out} (m)	k_s (m)	V_{out} (m/s)	D_{ave} (m)	k_s/D_{ave}	V_{ave} (m/s)	Re_{ave}	f_{ave} (m)	J_{ave}	J	h_f (m)	dJ	100XdJ	h_a (m)	h_{tot} (m)
4	0.135	0.084	0.0002	0.722	0.103	0.002	0.476	42823	0.0270	0.0030	0.0030	0.0020	0.0000	3.85E-04	0.0100	0.0119
5	0.135	0.084	0.0002	0.902	0.103	0.002	0.595	53539	0.0264	0.0046	0.0046	0.0030	0.0000	5.46E-04	0.0156	0.0186
6	0.135	0.084	0.0002	1.083	0.103	0.002	0.715	64255	0.0260	0.0065	0.0065	0.0043	0.0000	7.46E-04	0.0224	0.0267
7	0.135	0.084	0.0002	1.263	0.103	0.002	0.834	74957	0.0257	0.0088	0.0088	0.0057	0.0000	1.54E-05	0.0305	0.0363
8	0.135	0.084	0.0002	1.444	0.103	0.002	0.953	85673	0.0254	0.0114	0.0114	0.0074	0.0000	2.01E-05	0.0399	0.0473
9	0.135	0.084	0.0002	1.624	0.103	0.002	1.072	96390	0.0252	0.0143	0.0143	0.0093	0.0000	2.63E-05	0.0505	0.0598
10	0.135	0.084	0.0002	1.804	0.103	0.002	1.192	107107	0.0250	0.0175	0.0175	0.0114	0.0000	3.26E-05	0.0623	0.0737
11	0.135	0.084	0.0002	1.985	0.103	0.002	1.311	117824	0.0249	0.0211	0.0211	0.0137	0.0000	3.94E-05	0.0754	0.0891
12	0.135	0.084	0.0002	2.165	0.103	0.002	1.430	128541	0.0248	0.0250	0.0250	0.0163	0.0000	4.69E-05	0.0898	0.1060
13	0.135	0.084	0.0002	2.346	0.103	0.002	1.549	139258	0.0247	0.0292	0.0292	0.0190	0.0000	5.50E-05	0.1053	0.1243
14	0.135	0.084	0.0002	2.526	0.103	0.002	1.669	149976	0.0246	0.0338	0.0338	0.0220	0.0000	6.40E-05	0.1222	0.1441
15	0.135	0.084	0.0002	2.707	0.103	0.002	1.788	160694	0.0245	0.0387	0.0387	0.0251	0.0000	7.35E-05	0.1402	0.1654

Π ΙΙ–22 Διερεύνηση απότομης διεύρυνσης. Θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a), έχοντας ως δεδομένες τις γραμμικές απώλειες (h_f) από την θεωρία των Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα ίση με $k_s = 1 \text{ mm}$ και την κλίση της γραμμής ενέργειας (J πείραμα 3) από το τρίτο πείραμα.

Q (L/s)	h_f (m)	$h_{f,tot}$ (m)	L_{3-10} (m)	J_f	J_a	$h_{a,tot}$ (m)	h_a (m)	J_{sum}	Q (L/s)	J_{3-10} πείραμα 3	100XdJ
6	0.0064	0.0319	3.305	0.0097	0.0311	0.1029	0.0206	0.0408	6.14	0.0408	0
7	0.0087	0.0433	3.305	0.0131	0.0435	0.1439	0.0288	0.0566	7.13	0.0566	0
8	0.0113	0.0563	3.305	0.0170	0.0628	0.2076	0.0415	0.0799	8.50	0.0799	0
9	0.0142	0.0711	3.305	0.0215	0.0796	0.2630	0.0526	0.1011	9.64	0.1011	0
10	0.0175	0.0877	3.305	0.0265	0.0896	0.2961	0.0592	0.1161	10.32	0.1161	0
11	0.0212	0.1059	3.305	0.0320	0.1012	0.3345	0.0669	0.1333	11.06	0.1333	0
12	0.0252	0.1258	3.305	0.0381	0.1383	0.4572	0.0914	0.1764	12.76	0.1764	0
13	0.0295	0.1475	3.305	0.0446	0.1490	0.4924	0.0985	0.1936	13.40	0.1936	0
14	0.0342	0.1709	3.305	0.0517	0.1628	0.5381	0.1076	0.2145	14.19	0.2145	0

Π ΙΙ–22a Θεωρητικός υπολογισμός διαμέτρου διατομής εισόδου (D_{in}) για δεδομένη διάμετρο εξόδου (D_{out}).

Q (L/s)	D_{out} (m)	V_{out} (m/s)	h_a (m)	K_{se}	D_{in} (m)
6	0.084	1.083	0.0206	0.3445	0.131
7	0.084	1.263	0.0288	0.3538	0.132
8	0.084	1.444	0.0415	0.3909	0.137
9	0.084	1.624	0.0526	0.3913	0.137
10	0.084	1.804	0.0592	0.3569	0.132
11	0.084	1.985	0.0669	0.3332	0.129
12	0.084	2.165	0.0914	0.3827	0.136
13	0.084	2.346	0.0985	0.3511	0.132
14	0.084	2.526	0.1076	0.3309	0.129

Π ΙΙ–22b Θεωρητικός υπολογισμός διαμέτρου διατομής εξόδου (D_{out}) για δεδομένη διάμετρο εισόδου (D_{in}).

Q (L/s)	D_{in} (m)	h_a (m)	V_{out} (m/s)	K_{se}	D_{out} (m)	* h_a (m)	100Xdh
6	0.135	0.0206	1.055	0.3630	0.085	0.0206	-1.98E-05
7	0.135	0.0288	1.240	0.3669	0.085	0.0288	-2.75E-05
8	0.135	0.0415	1.461	0.3814	0.083	0.0415	-3.87E-05
9	0.135	0.0526	1.645	0.3815	0.083	0.0526	-4.91E-05
10	0.135	0.0592	1.777	0.3682	0.085	0.0592	-5.67E-05
11	0.135	0.0669	1.914	0.3583	0.086	0.0669	-6.50E-05
12	0.135	0.0914	2.178	0.3783	0.084	0.0914	-8.59E-05
13	0.135	0.0985	2.298	0.3658	0.085	0.0985	-9.47E-05
14	0.135	0.1076	2.431	0.3573	0.086	0.1076	-1.05E-04

Π ΙΙ–23 Διερεύνηση απότομης διεύρυνσης. Θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a), έχοντας ως δεδομένες τις γραμμικές απώλειες (h_f) από την θεωρία των Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα ίση με $k_s = 0.5$ mm και την κλίση της γραμμής ενέργειας (J πείραμα 3) από το τρίτο πείραμα.

Q (L/s)	h_f (m)	$h_{f,tot}$ (m)	L_{3-10} (m)	J_f	J_a	$h_{a,tot}$ (m)	h_a (m)	J_{sum}	Q (L/s)	J_{3-10} πείραμα 3	100XdJ
6	0.0052	0.0261	3.305	0.0079	0.0329	0.1087	0.0217	0.0408	6.14	0.0408	0
7	0.0071	0.0354	3.305	0.0107	0.0459	0.1518	0.0304	0.0566	7.13	0.0566	0
8	0.0092	0.0459	3.305	0.0139	0.0660	0.2180	0.0436	0.0799	8.50	0.0799	0
9	0.0116	0.0579	3.305	0.0175	0.0836	0.2762	0.0552	0.1011	9.64	0.1011	0
10	0.0143	0.0713	3.305	0.0216	0.0946	0.3125	0.0625	0.1161	10.32	0.1161	0
11	0.0172	0.0860	3.305	0.0260	0.1072	0.3545	0.0709	0.1333	11.06	0.1333	0
12	0.0204	0.1021	3.305	0.0309	0.1455	0.4810	0.0962	0.1764	12.76	0.1764	0
13	0.0239	0.1196	3.305	0.0362	0.1574	0.5203	0.1041	0.1936	13.40	0.1936	0
14	0.0277	0.1384	3.305	0.0419	0.1727	0.5706	0.1141	0.2145	14.19	0.2145	0

Π ΙΙ–23a Θεωρητικός υπολογισμός διαμέτρου διατομής εισόδου (D_{in}) για δεδομένη διάμετρο εξόδου (D_{out}).

Q (L/s)	D_{out} (m)	V_{out} (m/s)	h_a (m)	K_{sc}	D_{in} (m)
6	0.084	1.083	0.0217	0.3638	0.133
7	0.084	1.263	0.0304	0.3733	0.135
8	0.084	1.444	0.0436	0.4105	0.140
9	0.084	1.624	0.0552	0.4109	0.140
10	0.084	1.804	0.0625	0.3766	0.135
11	0.084	1.985	0.0709	0.3530	0.132
12	0.084	2.165	0.0962	0.4025	0.139
13	0.084	2.346	0.1041	0.3710	0.134
14	0.084	2.526	0.1141	0.3509	0.132

Π ΙΙ–23b Θεωρητικός υπολογισμός διαμέτρου διατομής εξόδου (D_{out}) για δεδομένη διάμετρο εισόδου (D_{in}).

Q (L/s)	D_{in} (m)	h_a (m)	V_{out} (m/s)	K_{sc}	D_{out} (m)	* h_a (m)	100Xdh
6	0.135	0.0217	1.072	0.3709	0.084	0.0217	-9.53E-04
7	0.135	0.0304	1.261	0.3747	0.084	0.0304	-2.86E-05
8	0.135	0.0436	1.484	0.3886	0.083	0.0436	-3.88E-05
9	0.135	0.0552	1.670	0.3887	0.083	0.0552	-4.91E-05
10	0.135	0.0625	1.806	0.3760	0.084	0.0625	-5.83E-05
11	0.135	0.0709	1.948	0.3666	0.085	0.0709	-6.85E-05
12	0.135	0.0962	2.212	0.3857	0.083	0.0962	-8.64E-05
13	0.135	0.1041	2.337	0.3738	0.084	0.1041	-9.79E-05
14	0.135	0.1141	2.474	0.3657	0.085	0.1141	-1.11E-04

Π ΙΙ–24 Διερεύνηση απότομης διεύρυνσης. Θεωρητικός υπολογισμός τοπικών απωλειών (h_a), έχοντας ως δεδομένες τις γραμμικές απώλειες (h_f) από την θεωρία των Swamme & Jain για ισοδύναμη τραχύτητα ίση με $k_s = 0.2$ mm και την κλίση της γραμμής ενέργειας (J πείραμα 3) από το τρίτο πείραμα.

Q (L/s)	h_f (m)	h_{f_tot} (m)	L_{3-10} (m)	J_f	J_a	h_{a_tot} (m)	h_a (m)	J_{sum}	Q (L/s)	J_{3-10} πείραμα 3	100XdJ
6	0.0043	0.0213	3.305	0.0064	0.0344	0.1136	0.0227	0.0408	6.14	0.0408	0
7	0.0057	0.0286	3.305	0.0086	0.0480	0.1586	0.0317	0.0566	7.13	0.0566	0
8	0.0074	0.0370	3.305	0.0112	0.0687	0.2270	0.0454	0.0799	8.50	0.0799	0
9	0.0093	0.0465	3.305	0.0141	0.0870	0.2877	0.0575	0.1011	9.64	0.1011	0
10	0.0114	0.0570	3.305	0.0172	0.0989	0.3268	0.0654	0.1161	10.32	0.1161	0
11	0.0137	0.0686	3.305	0.0208	0.1125	0.3718	0.0744	0.1333	11.06	0.1333	0
12	0.0163	0.0813	3.305	0.0246	0.1518	0.5018	0.1004	0.1764	12.76	0.1764	0
13	0.0190	0.0950	3.305	0.0287	0.1649	0.5449	0.1090	0.1936	13.40	0.1936	0
14	0.0220	0.1098	3.305	0.0332	0.1813	0.5993	0.1199	0.2145	14.19	0.2145	0

Π ΙΙ–24a Θεωρητικός υπολογισμός διαμέτρου διατομής εισόδου (D_{in}) για δεδομένη διάμετρο εξόδου (D_{out}).

Q (L/s)	D_{out} (m)	V_{out} (m/s)	h_a (m)	K_{sc}	D_{in} (m)
6	0.084	1.083	0.0227	0.3801	0.136
7	0.084	1.263	0.0317	0.3899	0.137
8	0.084	1.444	0.0454	0.4274	0.143
9	0.084	1.624	0.0575	0.4280	0.143
10	0.084	1.804	0.0654	0.3938	0.138
11	0.084	1.985	0.0744	0.3703	0.134
12	0.084	2.165	0.1004	0.4200	0.142
13	0.084	2.346	0.1090	0.3886	0.137
14	0.084	2.526	0.1199	0.3685	0.134

Π ΙΙ–24b Θεωρητικός υπολογισμός διαμέτρου διατομής εξόδου (D_{out}) για δεδομένη διάμετρο εισόδου (D_{in}).

Q (L/s)	D_{in} (m)	h_a (m)	V_{out} (m/s)	K_{sc}	D_{out} (m)	* h_a (m)	100Xdh
6	0.135	0.0227	1.087	0.3773	0.0838	0.0227	-8.22E-04
7	0.135	0.0317	1.278	0.3810	0.0835	0.0317	-2.69E-05
8	0.135	0.0454	1.503	0.3945	0.0823	0.0454	-3.58E-05
9	0.135	0.0575	1.691	0.3947	0.0823	0.0575	-4.52E-05
10	0.135	0.0654	1.831	0.3825	0.0834	0.0654	-5.46E-05
11	0.135	0.0744	1.976	0.3735	0.0842	0.0744	-6.49E-05
12	0.135	0.1004	2.242	0.3919	0.0826	0.1004	-7.95E-05
13	0.135	0.1090	2.370	0.3805	0.0836	0.1090	-9.16E-05
14	0.135	0.1199	2.512	0.3728	0.0842	0.1199	-1.05E-04

h_f : από ανάλυση ευαισθησίας

$$h_{f_tot} = 5h_f$$

$$J_f = h_{f_tot} / L$$

$$K_{se} = 2g \frac{h_a}{V_{out}^2} = \left[1 - \left(\frac{D_{out}}{D_{in}} \right)^2 \right]^2$$

$$D_{in} = \left(\frac{D_{out}^2}{1 - K_{SE}^{0.5}} \right)^{0.5}$$

h_a : $100 \times dJ \rightarrow 0$

$$h_{a_tot} = 5h_a$$

$$J_a = h_{a_tot} / L$$

D_{out} : $100 \times dh \rightarrow 0$

$$*h_a = K_{SE} \frac{V_{out}^2}{2g}$$

$$100 \times dh = 100 \times (h_a - *h_a)$$

$$J_{sum} = J_a + J_f$$

$$100 \times dJ = 100 \times (J_{sum} - J_{3-10})$$