



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ
ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΑΕΡΙΩΝ**

υπό

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΝΤΕΛΗ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2022

© 2022 Κωνσταντίνος Ντελής

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Δημήτρης Βαλουγεώργης
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
 Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Λυχνάρopoulos Ιωάννης

 ΕΔΙΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Παπαδημητρίου Κωνσταντίνος

 Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
 Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βαλουγεώργη που δέχτηκε να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία υπό την επίβλεψη του, για τη συνεχή καθοδήγηση και βοήθεια και γενικότερα για όλο το χρόνο που αφιέρωσε. Υπέρ πολύτιμη ήταν η βοήθεια του Μάκη και του Θανάση οι οποίοι με βοήθησαν να αντιμετωπίζω τα εμπόδια που έβρισκα και να προχωρώ τη διπλωματική μου εργασία. Δεν μπορώ να ξεχάσω βέβαια να ευχαριστήσω και τους δικούς μου ανθρώπους, ξεκινώντας πάντα από την οικογένειά μου, τους γονείς μου και τα τρία αδέρφια μου. Δίχως αυτούς δεν θα ήμουν αυτός που είμαι τώρα και τους οφείλω πολλά για αυτό. Φυσικά δεν μπορώ να ξεχάσω τα τρία φιλαράκια της σχολής τον Κώστα, τον Γιώργο και τον Αποστολή. Από παρακολουθήσεις διαλέξεων και εργασίες μέχρι βόλτες και εξόδους. Πέρασαμε τέλεια πέντε χρόνια. Εύχομαι καλό πτυχίο σε όλους. Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης διπλωματικής εργασίας μου είχα και ένα άτομο να ακούει συνέχεια την γκρίνια μου και τα παράπονά μου και αυτό δεν ήταν άλλο από την κοπέλα μου τη Χαρά. Την ευχαριστώ ολόψυχα, λοιπόν για την υπομονή και τη θέληση της να με βοηθάει συνεχώς. Αφιερώνω την εργασία στη γιαγιά μου την Ντίνα. Δυστυχώς δεν μπορεί να το δει αλλά είμαι σίγουρος πως θα την έκανα πολύ χαρούμενη με αυτή μου την κίνηση.

Ντίνος
Ιούνιος 2022

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΝΤΕΛΗΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2022

Επιβλέπων μέλος ΔΕΠ: Καθηγητής Δημήτρης Βαλουγεώργης,

Κατεύθυνση: Ενέργεια, βιομηχανικές διεργασίες και αντιρρυπαντική τεχνολογία

Περίληψη

Ο υπολογισμός της παροχής εσωτερικά των αγωγών και των πιέσεων στους κόμβους δικτύων σωληνώσεων, στα οποία κυκλοφορούν αέρια, αποτελεί ένα κοινό θέμα με πολλές αναφορές στη βιβλιογραφία. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η αβεβαιότητα της λύσης τέτοιου είδους προβλημάτων, λόγω εισαγωγής αβεβαιοτήτων στα δεδομένα αναφορικά με τη γεωμετρία και τις συνθήκες λειτουργίας του προβλήματος, όπως η ακτίνα, το μήκος και η τραχύτητα των αγωγών ή η επιβαλλόμενη πίεση σε συγκεκριμένους κόμβους του δικτύου. Οι αβεβαιότητες αυτές μπορούν να προκύψουν από τη μεταβολή των συνθηκών του περιβάλλοντος, τις ατέλειες του εκάστοτε δικτύου ή και τις αβεβαιότητες που εισάγουν τα μετρητικά όργανα. Οι μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ανάλυση αυτών των αβεβαιοτήτων ονομάζονται Sensitivity Derivatives και Monte Carlo. Η πρώτη αποτελεί μία αναλυτική μέθοδο η οποία μπορεί να εφαρμοσθεί κατά βάση σε δίκτυα μικρού μεγέθους. Στη μέθοδο Monte Carlo εξετάζεται η αβεβαιότητα κάθε μεγέθους με πληθώρα υπολογισμών και δοκιμών, ώστε να εξαχθεί η συνάρτηση κατανομής των αποτελεσμάτων σε συνδυασμό με την αβεβαιότητά τους. Η καταγραφή της προβλεπόμενης επίδρασης των αβεβαιοτήτων για κάθε παράμετρο του συστήματος είναι ωφέλιμη για την ομαλή λειτουργία και την αναγνώριση τυχόντων παρεκκλίσεων από την εκτιμώμενη απόδοση ενός δικτύου σωληνώσεων.

Λέξεις-κλειδιά: Δίκτυα σωληνώσεων, Ανάλυση αβεβαιότητας, Monte Carlo, Sensitivity Derivatives

Υπολογιστικά εργαλεία: Πηγαίοι κώδικες σε MATLAB

UNCERTAINTY PROPAGATION ANALYSIS IN PIPING DISTRIBUTION SYSTEMS OF GASES

KONSTANTINOS NTELIS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2022

Supervisor: Dr Dimitris Valougeorgis
Associate Professor of Operational Research

Abstract

The computation of the flowrates through the pipes and the pressure heads at the nodes of pipe networks, distributing gases is a well-known task and numerous references are available in the literature. Here, the uncertainty in the solution due to induced uncertainties in the input network geometry and operational data, namely, the radius, length and roughness of the pipes, as well as the pressure imposed at specific nodes of the network, is investigated. These uncertainties originate from various sources, including the uncertainty of measurement instruments, changing environmental conditions and flaws in the distribution system setup. The uncertainty analysis is performed by the Sensitivity Derivatives and Monte Carlo methods. The Sensitivity Derivatives method is an analytical one which applies better on smaller networks. In the Monte Carlo method for each input quantity various uncertainty levels are investigated. Conducting the required number of trials, the distribution function of the output quantities and their associated uncertainties are obtained. Documenting the expected effect of the uncertainty in each input parameter is certainly beneficial in the smooth operation of piping distribution systems and in the identification of observed deviations from the expected performance.

Keywords: Pipe networks, Uncertainty propagation analysis, Monte Carlo, Sensitivity Derivatives

Used Software: In house Matlab codes

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ	20
2.1 Δίκτυα Σωληνώσεων	20
2.2 Μέθοδοι Ανάλυσης Αβεβαιότητας.....	21
2.3 Ανάλυση Αβεβαιότητας σε Δίκτυα Σωληνώσεων	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΡΟΩΝ	24
3.1 Εκφράσεις Πτώσης Πίεσης στις Διάφορες Περιπτώσεις Ροής	24
3.1.1 Εισαγωγικές Έννοιες	24
3.1.1.1 Ασυμπίεστη Ροή	24
3.1.1.2 Συμπίεστη Ροή	25
3.1.1.3 Συντελεστής τριβής f	26
3.1.2 Στρωτή Ροή	28
3.1.3 Τυρβώδης Ροή	29
3.2 Κώδικας PNcompdes και υπολογισμός βρόχων και ψευδοβρόχων	29
3.2.1 Περιγραφή του κώδικα PNcompdes	29
3.2.2 Υπορουτίνα υπολογισμού βρόχων και ψευδοβρόχων σε δίκτυα σωληνώσεων.	30
3.2.3 Εφαρμογή υπολογισμού βρόχων και ψευδοβρόχων σε δίκτυο	31
3.3 Ανάλυση και διάδοση αβεβαιοτήτων σε δίκτυα σωληνώσεων με τη χρήση των μεθόδων Sensitivity Derivatives και Monte Carlo.....	33
3.3.1 Μέθοδοι ανάλυση αβεβαιότητας Sensitivity Derivatives και Monte Carlo	33
3.3.1.1 Sensitivity Derivatives (SD)	33
3.3.1.2 Monte Carlo (MC)	34
3.3.2 Εφαρμογή των μεθόδων Sensitivity Derivatives και Monte Carlo σε σύστημα ενός αγωγού	36
3.3.2.1 Sensitivity Derivatives – Σύστημα ενός αγωγού	36
3.3.2.2 Monte Carlo Method – Σύστημα ενός αγωγού	41
3.3.3 Εφαρμογή μεθόδου Monte Carlo σε δίκτυα σωληνώσεων	42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ.....	44
4.1 Εισαγωγικά στοιχεία	44
4.2 Αποτελέσματα ανάλυσης αβεβαιότητας σε σύστημα ενός αγωγού.....	44
4.2.1 Στρωτή Ροή	45
4.2.2 Τυρβώδης Ροή	52
4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης αβεβαιότητας σε δίκτυα σωληνώσεων	61
4.3.1 Εφαρμογή 1	61
4.3.2 Εφαρμογή 2	64
4.3.3 Εφαρμογή 3	68
4.3.4 Εφαρμογή 4	74
4.4 Μελέτη συμπεριφοράς αβεβαιοτήτων στο δίκτυο της Εφαρμογής 3.....	81
4.5 Συμπεράσματα.....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	88
5.1 Συμπεράσματα και Προτάσεις	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	90
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΡΟΧΩΝ ΚΑΙ ΨΕΥΔΟΒΡΟΧΩΝ	92
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ SI ΚΑΙ ΕΥ.....	94

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1. Βρόχοι του δικτύου του Σχήματος 1.	32
Πίνακας 3.2. Ψευδοβρόχοι του δικτύου του Σχήματος 1.....	32
Πίνακας 4.1. Ονομαστικές τιμές για το σύστημα ενός αγωγού σε συνθήκες στρωτής ροής... 45	
Πίνακας 4.2. Ονομαστικές τιμές για το σύστημα ενός αγωγού σε συνθήκες τυρβώδους ροής.	52
Πίνακας 4.3. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε αγωγό για την Εφαρμογή 1.....	62
Πίνακας 4.4. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε κόμβο για την Εφαρμογή 1.	63
Πίνακας 4.5. Τιμές αβεβαιότητας παροχής σε κάθε αγωγό για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 1.	63
Πίνακας 4.6. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης σε κάθε κόμβο για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 1.	63
Πίνακας 4.7. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε αγωγό για την Εφαρμογή 2.....	65
Πίνακας 4.8. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε κόμβο για την Εφαρμογή 2.	66
Πίνακας 4.9. Τιμές αβεβαιότητας παροχής σε κάθε αγωγό για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 2.	66
Πίνακας 4.10. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης σε κάθε κόμβο για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 2.	66
Πίνακας 4.11.1. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε αγωγό για την Εφαρμογή 3.	69

Πίνακας 4.11.2. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε αγωγό για την Εφαρμογή 3.	70
Πίνακας 4.12. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε κόμβο για την Εφαρμογή 2.....	70
Πίνακας 4.13. Τιμές αβεβαιότητας παροχής σε κάθε αγωγό για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 3.	71
Πίνακας 4.14. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης σε κάθε κόμβο για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 3.	72
Πίνακας 4.15.1. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε αγωγό για την Εφαρμογή 4.	75
Πίνακας 4.15.2. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε αγωγό για την Εφαρμογή 4.	76
Πίνακας 4.16. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε κόμβο για την Εφαρμογή 3.	77
Πίνακας 4.17. Τιμές αβεβαιότητας παροχής σε κάθε αγωγό για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 4.....	78
Πίνακας 4.18. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης σε κάθε κόμβο για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 3.....	79
Πίνακας 4.19. Τιμές αβεβαιότητας παροχής για 1% αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο και ζεύγη πιέσεων στις δεξαμενές [200 000, 25 000], [100 000, 25 000] και [50 000, 25 000] Pa.	82
Πίνακας 4.20. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης για 1% αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο και ζεύγη πιέσεων στις δεξαμενές [200 000, 25 000], [100 000, 25 000] και [50 000, 25 000] Pa.	82

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3.1 Γεωμετρία δικτύου για εύρεση βρόχων και ψευδοβρόχων.	31
Σχήμα 4.1. Μεταβολή πτώσης πίεσης με αύξηση της παροχής σε στρωτή ροή.....	45
Σχήμα 4.2. Μεταβολή αριθμού Re με αύξηση της παροχής σε στρωτή ροή.....	46
Σχήμα 4.3. Μεταβολή του αριθμού Ma με αύξηση της παροχής σε στρωτή ροή.	46
Σχήμα 4.4. Μεταβολή του συντελεστή τριβής με αύξηση της παροχής σε στρωτή ροή.....	47
Σχήμα 4.5. Αβεβαιότητα πτώσης πίεσης και συντελεστή τριβής με τις μεθόδους MC (10 000 δοκιμές) και SD για στρωτή ροή με αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της παροχής.	48
Σχήμα 4.6. Αβεβαιότητα πτώσης πίεσης και συντελεστή τριβής με τις μεθόδους MC (10 000 δοκιμές) και SD για στρωτή ροή με αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της διαμέτρου.	48
Σχήμα 4.7. Αβεβαιότητες παροχής και συντελεστή τριβής με τις μεθόδους MC (10 000 δοκιμές) και SD για στρωτή ροή με αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της πτώσης πίεσης.	49
Σχήμα 4.8. Αβεβαιότητες παροχής και συντελεστή τριβής με τις μεθόδους MC (10 000 δοκιμές) και SD για στρωτή ροή με αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της διαμέτρου.....	49
Σχήμα 4.9. Αβεβαιότητα πτώσης πίεσης με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) σε στρωτή ροή με αύξηση της διαμέτρου και αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο 1%,5%,10% και 20%.	51
Σχήμα 4.10. Αβεβαιότητα παροχής με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) σε στρωτή ροή με αύξηση της διαμέτρου και αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο 1%,5%,10% και 20%...	51
Σχήμα 4.11. Μεταβολή πτώσης πίεσης με αύξηση της παροχής σε τυρβώδη ροή.....	53

Σχήμα 4.12. Μεταβολή αριθμού Re με αύξηση της παροχής σε τυρβώδη ροή.....	53
Σχήμα 4.13. Μεταβολή του αριθμού Ma με αύξηση της παροχής σε τυρβώδη ροή.	54
Σχήμα 4.14. Μεταβολή του συντελεστή τριβής με αύξηση της παροχής σε τυρβώδη ροή.....	54
Σχήμα 4.15. Αβεβαιότητα πτώσης πίεσης με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) για τυρβώδη ροή, αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της παροχής.	55
Σχήμα 4.16. Αβεβαιότητα πτώσης πίεσης με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) για τυρβώδη ροή, αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της διαμέτρου.	56
Σχήμα 4.17. Αβεβαιότητα παροχής με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) για τυρβώδη ροή, αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της πτώσης πίεσης.	56
Σχήμα 4.18. Αβεβαιότητα παροχής με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) για τυρβώδη ροή, αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της διαμέτρου.	57
Σχήμα 4.19. Αβεβαιότητα πτώσης πίεσης με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) σε τυρβώδη ροή με αύξηση της διαμέτρου και αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο 1%,5%,10% και 20%.	58
Σχήμα 4.20. Αβεβαιότητα παροχής με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) σε τυρβώδη ροή με αύξηση της διαμέτρου και αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο 1%,5%,10% και 20%...	58
Σχήμα 4.21. Αβεβαιότητα παροχής σε τυρβώδη ροή για αυξανόμενη ονομαστική τιμή και αβεβαιότητα της διαμέτρου με τη μέθοδο MC σε 10 δοκιμές.	59
Σχήμα 4.22. Αβεβαιότητα παροχής σε τυρβώδη ροή για αυξανόμενη ονομαστική τιμή και αβεβαιότητα της διαμέτρου με τη μέθοδο MC σε 100 δοκιμές.	60
Σχήμα 4.23. Αβεβαιότητα παροχής σε τυρβώδη ροή για αυξανόμενη ονομαστική τιμή και αβεβαιότητα της διαμέτρου με τη μέθοδο MC σε 1 000 δοκιμές.	60
Σχήμα 4.24. Αβεβαιότητα παροχής σε τυρβώδη ροή για αυξανόμενη ονομαστική τιμή και αβεβαιότητα της διαμέτρου με τη μέθοδο MC σε 10 000 δοκιμές.	60

Σχήμα 4.25. Γεωμετρία δικτύου Εφαρμογής 1.	61
Σχήμα 4.26. Γεωμετρία δικτύου Εφαρμογής 2.	65
Σχήμα 4.27. Γεωμετρία δικτύου Εφαρμογής 2..	67
Σχήμα 4.28. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης σε κάθε κόμβο για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 2.	68
Σχήμα 4.29. Γεωμετρία δικτύου Εφαρμογής 3.	69
Σχήμα 4.30. Τιμές αβεβαιότητας παροχής σε κάθε αγωγό για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 3.	73
Σχήμα 4.31. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης σε κάθε κόμβο για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 3.	73
Σχήμα 4.32. Γεωμετρία δικτύου Εφαρμογής 3.	74
Σχήμα 4.33. Τιμές αβεβαιότητας παροχής σε κάθε αγωγό για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 4.	80
Σχήμα 4.34. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης σε κάθε κόμβο για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 3.	80
Σχήμα 4.35. Τιμές αβεβαιότητας παροχής για 1% αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο και ζεύγη πιέσεων στις δεξαμενές [200 000, 25 000], [100 000, 25 000] και [50 000 25 000] Pa.	83
Σχήμα 4.36. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης για 1% αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο και ζεύγη πιέσεων στις δεξαμενές [200 000, 25 000], [100 000, 25 000] και [50 000, 25 000] Pa.	83

Σχήμα 4.37. Αβεβαιότητα παροχής σε κάθε αγωγό και για τις τέσσερις εφαρμογές για αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο ίση με 1%, 5%, 10% και 20%.

..... 84

Σχήμα 4.38. Αβεβαιότητα πίεσης σε κάθε κόμβο και για τις τέσσερις εφαρμογές για αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο ίση με 1%, 5%, 10% και 20%.

. 85

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σύγχρονη βιομηχανοποιημένη κοινωνία παρατηρείται έντονα η χρήση δικτύων σωληνώσεων για τη μεταφορά διαφόρων ρευστών τα οποία ικανοποιούν τις καθημερινές ανάγκες των ανθρώπων. Αυτές συνίστανται κυρίως στη μεταφορά πόσιμου νερού, φυσικού αερίου και άλλων βιομηχανικών υγρών και αερίων. Ο σχεδιασμός ενός δικτύου σωληνώσεων έγκειται κατά βάση στη ποσότητα ρευστού προς μεταφορά. Έτσι, παρατηρούνται δίκτυα διαφόρων μεγεθών, από πολύ μεγάλα όπως αυτά της διανομής φυσικού αερίου από χώρα σε χώρα, της υδροδότησης πόλεων, της τηλεθέρμανσης ή δικτύων μεταφοράς πετρελαίου από πηγές άντλησης σε λιμάνια και διωλιστήρια μέχρι και σχετικά μικρά δίκτυα όπως αυτά της μεταφοράς ζεστού νερού για οικιακή χρήση, συστήματα θέρμανσης, κλιματισμού και άλλα. Υπάρχουν διαφόρων ειδών ροές οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες.

Έτσι, μια ροή διακρίνεται σε ασυμπίεστη και συμπίεστη, η οποία έγκειται στη μεταβολή ή όχι της πυκνότητας του ρευστού. Να σημειωθεί ότι στα υγρά η πυκνότητα παραμένει σταθερή σε όλο τον όγκο τους οπότε οι ροές υγρών είναι ασυμπίεστες. Όσον αφορά στα αέρια, η πυκνότητα μπορεί να μεταβληθεί και έτσι η ροή τους μπορεί να γίνει και συμπίεστη. Ακόμη, μια ροή μπορεί να είναι στρωτή, μεταβατική και τυρβώδης ανάλογα με την τιμή του αριθμού Reynolds $Re = \rho u D / \mu$, όπου ρ και μ η πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού αντίστοιχα, u η ταχύτητα ροής και D η διάμετρος του αγωγού.

Ειδικότερα, τα εύρη τιμών αντίστοιχα είναι [3]

- Στρωτή Ροή: $Re < 2300$
- Μεταβατική Ροή: $2300 < Re < 5000$
- Τυρβώδης Ροή: $Re > 5000$

Ο αριθμός των φάσεων στις οποίες μπορεί να βρίσκεται το ρέων ρευστό διαμορφώνει δύο επιπλέον μορφές ροής, τη μονοφασική και τη διφασική. Ακόμη, κάθε ροή μπορεί να είναι μόνιμη ή μη, δηλαδή οι ιδιότητες της να μεταβάλλονται με το χρόνο ή όχι. Τέλος, η κινούσα δύναμη μια ροής σε δίκτυα σωληνώσεων είναι η διαφορά πίεσης. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε μόνιμη, μονοφασική ροή με κινούσα δύναμη τη διαφορά πίεσης και εξετάστηκαν οι περιπτώσεις στρωτής/τυρβώδους και ασυμπίεστης/συμπιεστής ροής.

Κάθε δίκτυο σωληνώσεων αποτελείται από τους κόμβους και τους αγωγούς. Σε συγκεκριμένους κόμβους (σημεία τομής δύο ή περισσότερων αγωγών) εμφανίζονται οι ζητήσεις του δικτύου, οι οποίες θα πρέπει μετά τον τελικό σχεδιασμό να ικανοποιούνται, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του δικτύου. Εν πρώτης αποφασίζεται η κατεύθυνση ροής εντός του δικτύου, ώστε να εξαχθεί και η τελική του γεωμετρία. Έπειτα, επιλέγεται ο σωστός τύπος αγωγών ανάλογα με το ρευστό και τις συνθήκες ροής και τέλος επιλέγονται κατάλληλα οι δεξαμενές, οι αντλίες και οι συμπιεστές για ένα δίκτυο, αλλά και διάφορα εξαρτήματα όπως οι ρυθμιστικές βαλβίδες και οι συνδέσεις. Όλα τα παραπάνω, συμβάλλουν στο σωστό και αξιόπιστο σχεδιασμό ενός δικτύου σωληνώσεων, ικανό να διατηρηθεί στο χρόνο και να τελεί αναπόσπαστα το σκοπό σχεδίασής του.

Η συντήρηση και η επίβλεψη των δικτύων σωληνώσεων κρίνεται επιτακτικής ανάγκης, όχι μόνο για τη σωστή λειτουργία και τη διατήρηση των παραμέτρων σχεδίασης του δικτύου, αλλά και για θέματα ασφαλείας. Ειδικότερα, σημαντικός είναι ο υπολογισμός της παροχής εσωτερικά των αγωγών και των πιέσεων στους κόμβους του δικτύου. Οι μεταβολές των συνθηκών του περιβάλλοντος, οι ατέλειες ενός δικτύου και η ανακρίβεια των μετρητικών οργάνων εισάγουν αβεβαιότητες αναφορικά με τη γεωμετρία και τις συνθήκες λειτουργίας ενός δικτύου σωληνώσεων. Πιο αναλυτικά, εισάγονται αβεβαιότητες στη διάμετρο, το μήκος και την τραχύτητα των αγωγών, τη θερμοκρασία και κατ' επέκταση στις θερμοφυσικές ιδιότητες του ρευστού ή και στην επιβαλλόμενη πίεση ή παροχή. Έτσι, κρίνεται αναγκαίο να μελετηθούν οι αβεβαιότητες στην πίεση και στην παροχή, καθώς τα δυο αυτά μεγέθη είναι τα σημαντικότερα για ένα δίκτυο. Για τη μελέτη προβλημάτων αβεβαιότητας έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα. Αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι η μέθοδος Monte Carlo

(μέθοδος που βασίζεται σε μεγάλο αριθμό δοκιμών) και μέθοδος Sensitivity Derivatives (αναλυτική μέθοδος). Σε επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθούν τέτοιου είδους μεθοδολογίες εκτενέστερα και θα πραγματοποιηθεί ανάλυση αβεβαιοτήτων σε δίκτυα σωληνώσεων με τη χρήση των δύο παραπάνω μεθόδων.

Στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας θα γίνει η βιβλιογραφική ανασκόπηση η οποία θα αφορά αρχικά στα δίκτυα σωληνώσεων. Ακόμη, θα γίνει μία γενική αναφορά στις διάφορες μεθόδους ανάλυσης αβεβαιοτήτων και στο πως αυτές μπορούν να συνδεθούν με τα δίκτυα σωληνώσεων. Περνώντας στο Κεφάλαιο 3, θα πραγματοποιηθεί αναλυτική περιγραφή με εξισώσεις για τα προβλήματα στρωτής/τυρβώδους και ασυμπίεστης/συμπιεστής ροής σε σύστημα ενός αγωγού και θα γίνει αναφορά στον υπάρχοντα κώδικα PNcompdes και στη δημιουργία υπορουτίνας υπολογισμού βρόχων και ψευδοβρόχων. Επίσης, θα αναλυθεί το μοντέλο διάδοσης αβεβαιοτήτων αρχικά σε σύστημα ενός αγωγού, όπου θα γίνει χρήση και των δύο μεθόδων (Sensitivity Derivatives και Monte Carlo), ενώ στη συνέχεια θα παρατεθεί η διάδοση αβεβαιοτήτων σε δίκτυο σωληνώσεων με τη χρήση του κώδικα PNcompdes. Στο Κεφάλαιο 4 θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης αβεβαιοτήτων, αρχικά σε σύστημα ενός αγωγού και έπειτα σε δίκτυα σωληνώσεων. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραπάνω ανάλυση και θα γίνουν προτάσεις σχετικά με την εμβάθυνση στο συγκεκριμένο θέμα.

Κεφάλαιο 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ

2.1 Δίκτυα Σωληνώσεων

Στην παρούσα εργασία αναλύεται η διάδοση αβεβαιοτήτων σε δίκτυα σωληνώσεων. Πρώτα θα κατανοηθούν επιμέρους οι έννοιες της θεωρίας σχεδιασμού και επίλυσης δικτύων σωληνώσεων καθώς και οι διάφορες μέθοδοι ανάλυσης αβεβαιοτήτων. Απώτερος σκοπός είναι ο συνδυασμός των δύο αυτών εννοιών έτσι ώστε να γίνει σαφής η μεθοδολογία της ανάλυσης και διάδοσης αβεβαιοτήτων σε δίκτυα σωληνώσεων. Για τα δίκτυα σωληνώσεων μελετήθηκε σε αρχικό στάδιο το σύγγραμμα των Merle, Potter, Wiggert [1], στο οποίο γίνεται μία λεπτομερής περιγραφή της μεθοδολογίας επίλυσης δικτύων αλλά η ανάλυση αυτή αφορά μόνο σε ασυμπιεστή ροή. Έπειτα, για την καλύτερη κατανόηση των δικτύων σωληνώσεων μελετήθηκε το σύγγραμμά του Larock [2] στο οποίο αναλύεται εκτενέστερα η θεωρία και η ανάλυση δικτύων σωληνώσεων ασυμπιεστών και συμπιεστών ροών. Αναφορικά με τον κώδικα PNcompdes μελετήθηκε η διπλωματική του Μπερσίμη Διονύση [3] και ειδικότερα, το κεφάλαιο 5 όπου γίνεται αναλυτική περιγραφή για την ανάπτυξη του κώδικα. Πολύτιμη ήταν και η βοήθεια του matlab documentation [4] σε όλο το φάσμα της εργασίας και ειδικότερα στο πλαίσιο της δημιουργίας της υπορουτίνας εύρεσης βρόχων και ψευδοβρόχων η οποία προσαρμόστηκε πάνω στον κώδικα PNcompdes. Επίσης, ο κώδικας PNcompdes χρησιμοποιεί το αγγλοσαξονικό σύστημα μονάδων και για το λόγο αυτό στο παράρτημα της εργασίας δίνονται πίνακες μετατροπής των μονάδων σε σύστημα SI. Οι συντελεστές μετατροπής πάρθηκαν από το σύγγραμμα Cooper και Alley [5]. Τέλος, η πηγή που χρησιμοποιήθηκε για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του αέρα στα προβλήματα που θα αναφερθούν είναι η ηλεκτρονική σελίδα engineeringtoolbox.com [6], μια σελίδα με πάρα πολλές πληροφορίες αναφορικά με τον τομέα των μηχανικών.

2.2 Μέθοδοι Ανάλυσης Αβεβαιότητας

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, οι αβεβαιότητες των παραμέτρων ενός δικτύου σωληνώσεων οι οποίες προκύπτουν από μεταβολές των συνθηκών του περιβάλλοντος, ατέλειες του δικτύου και ανακρίβειας των μετρητικών οργάνων, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και τη συντήρηση ενός δικτύου. Η διαδικασία της μελέτης των αβεβαιοτήτων ενός δικτύου ονομάζεται ανάλυση αβεβαιότητας και σε γενικό πλαίσιο έχουν δημιουργηθεί διάφορες μέθοδοι αναλυτικές και στοχαστικές για το σκοπό αυτό. Μία πρώτη μέθοδος είναι η interval analysis [7,8], μία αριθμητική μέθοδος κατάλληλη για διάφορα προβλήματα. Πιο συχνά χρησιμοποιείται για τη στρογγυλοποίηση σφαλμάτων και για τον υπολογισμό αβεβαιοτήτων σε παραμέτρους διαφόρων προβλημάτων. Μία αναλυτική μέθοδος εύρεσης αβεβαιοτήτων σε μεταβλητές εξόδου σε ένα πρόβλημα είναι η sensitivity derivatives [9] η οποία χρησιμοποιεί την παράγωγο της συνάρτησης που συνδέει τις μεταβλητές εισόδου και εξόδου. Η μέθοδος αυτή θα αναλυθεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο, καθώς χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση αβεβαιοτήτων στο σύστημα ενός αγωγού. Μία στοχαστική μέθοδος είναι η μέθοδος των ροπών (moments method) [10]. Χρησιμοποιεί ένα μοντέλο στατιστικής και δημιουργήθηκε από τον Pafnuty Chebysev το 1887 [11]. Μία επιπλέον μέθοδος είναι η polynomial chaos decomposition [12] μία στοχαστική μέθοδος η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και σε πολύπλοκα προβλήματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Τέλος μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για ανάλυση αβεβαιότητας είναι η Monte Carlo [13,14,15]. Είναι στοχαστική και ακριβής μέθοδος η οποία προϋποθέτει μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στα παρακάτω προβλήματα και θα αναλυθεί διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο.

2.3 Ανάλυση Αβεβαιότητας σε Δίκτυα Σωληνώσεων

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση κλείνει με το συνδυασμό των εννοιών των δύο παραπάνω παραγράφων. Έτσι, αξίζει να γίνει αναφορά στο άρθρο του Γιώργου Τάτσιου [15], όπου πραγματοποιήθηκε ανάλυση αβεβαιότητας σε έναν αγωγό για ροές με διαφορετική κινούσα δύναμη. Ειδικότερα αναφέρονται τρία είδη ροής. Το πρώτο αφορά στη ροή Poiseuille, μία ροή όπου κινούσα δύναμη είναι η διαφορά πίεσης υπό σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας. Το δεύτερο είδος ροής είναι αυτό όπου

κινούσα δύναμη είναι ταυτόχρονα η διαφορά θερμοκρασίας και πίεσης (TPD flow) και το τρίτο είδος είναι αυτό στο οποίο το ρευστό κινείται καθαρά λόγω διαφοράς θερμοκρασίας (Thermal Creep Flow). Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στο πρώτο είδος ροής καθώς αποτελεί μία παρόμοια περίπτωση με το είδος ροής το οποίο επεξεργάζεται η παρούσα εργασία.

Κεφάλαιο 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΡΟΩΝ

3.1 Εκφράσεις Πτώσης Πίεσης στις Διάφορες Περιπτώσεις Ροής

3.1.1 Εισαγωγικές Έννοιες

Ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης σε ένα δίκτυο σωληνώσεων κρίνεται απαραίτητος. Για το σκοπό αυτό έχουν δημιουργηθεί διάφορες εκφράσεις για τον υπολογισμό της. Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε χρήση της εξίσωσης πτώσης πίεσης κατά Darcy-Weisbach. Ο βασικός λόγος επιλογής της συγκεκριμένης έκφρασης είναι το γεγονός ότι ο κώδικας PNcompdes [3] χρησιμοποιεί τη συγκεκριμένη έκφραση για τον υπολογισμό των πιέσεων σε κάθε κόμβο του δικτύου. Για να γίνει πιο κατανοητή η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε θα γίνει ανάπτυξη των σχέσεων σε σύστημα ενός αγωγού.

3.1.1.1 Ασυμπίεστη Ροή

Για να διαχωριστεί η συμπίεστη με την ασυμπίεστη ροή θα χρειαστεί να ορίσουμε τον αδιάστατο αριθμό Ma. Αυτός ορίζεται ως το κλάσμα της ταχύτητας ροής προς την ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο συγκεκριμένο ρευστό και στις επικρατούσες συνθήκες. Για να χαρακτηριστεί η ροή ασυμπίεστη θα πρέπει να ισχύει

$$Ma < 0.3 \Rightarrow \frac{u}{a} < 0.3 \quad (3.1)$$

Με u συμβολίζεται η ταχύτητα ροής και a η ταχύτητα διάδοσης του ήχου.

Η έκφραση πτώσης πίεσης κατά Darcy-Weisbach για την ασυμπίεστη ροή είναι

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho u^2}{2} \quad (3.2)$$

όπου:

- ΔP η πτώση πίεσης στον αγωγό [Pa]
- f ο συντελεστής τριβών της ροής
- L το μήκος του αγωγού [m]
- D η διάμετρος του αγωγού [m]
- ρ η πυκνότητα του ρευστού [kg/m^3]
- u η ταχύτητα ροής [m/sec]

Με εισαγωγή της ογκομετρικής παροχής $Q=u A$ η έκφραση Darcy-Weisbach γράφεται ως

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho Q^2}{2A^2} = f \frac{L}{D} \frac{16\rho Q^2}{2\pi^2 D^4} \Rightarrow \Delta P = \frac{8fL\rho Q^2}{\pi^2 D^5} \quad (3.3)$$

όπου Q η ογκομετρική παροχή του ρευστού σε [m^3/sec].

3.1.1.2 Συμπιεστή Ροή

Για τη συμπιεστή ροή θα πρέπει να ισχύει

$$Ma > 0.3 \Rightarrow \frac{u}{a} > 0.3 \quad (3.4)$$

Από την πηγή [3] λαμβάνεται η σχέση πτώσης πίεσης για τη συμπιεστή ροή:

$$\Delta P = \frac{8\rho_m Q^2}{\pi^2 D^4} \left(2 \ln \left(\frac{P1}{P2} \right) + \frac{fL}{D} \right) \quad (3.5)$$

Η ροή είναι συμπιεστή άρα η πυκνότητα μεταβάλλεται κατά μήκος του αγωγού και για αυτό το λόγο επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί μια μέση πίεση ρ_m η οποία

υπολογίζεται ως η μέση τιμή από τις δύο πυκνότητες στα άκρα του αγωγού. Σε συνδυασμό με τη σχέση των ιδανικών αερίων

$$P = \rho RT \quad (3.6)$$

Εξάγεται η παρακάτω έκφραση για τον υπολογισμό της μέσης πυκνότητας ρ_m

$$\rho_m = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} = \frac{P_1 + P_2}{2RT} \quad (3.7)$$

Επιστρέφοντας στην Εξ. (3.5) μπορεί να παρατηρηθεί πως αποτελείται από δυο όρους

$$\Delta P = \frac{16\rho_m Q^2}{\pi^2 D^4} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) + \frac{8\rho_m Q^2 fL}{\pi^2 D^5} \quad (3.8)$$

Ορίζεται ο πρώτος όρος ως όρος συμπιεστότητας και ο δεύτερος ως ο όρος ασυμπιεστότητας. Παρατηρείται πως ο όρος ασυμπιεστότητας ταυτίζεται με την έκφραση πτώσης πίεσης για ασυμπίεστη ροή. Έτσι, εξάγεται το συμπέρασμα πως όταν ο λόγος των δυο πιέσεων είναι κοντά στη μονάδα, δηλαδή όταν η πτώση πίεσης ΔP είναι μικρή, τότε ο όρος συμπιεστότητας τείνει στο μηδέν και η ροή μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστη. Μικρές πτώσεις πίεσης επιτυγχάνονται όταν η παροχή είναι μικρή, άρα και κατ' επέκταση η ταχύτητα είναι μικρή και ως τελικό αποτέλεσμα ο αριθμός Ma να παίρνει τιμές μικρότερες του 0.3. Η Εξ. (3.8) λοιπόν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ασυμπίεστη ροή.

3.1.1.3 Συντελεστής τριβής f

Η Εξ. (3.8) είναι αυτή που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση των προβλημάτων που πραγματεύεται η παρούσα εργασία. Έχει γίνει λοιπόν, εξαγωγή κοινής σχέσης πτώσης πίεσης και για συμπιεστή και ασυμπίεστη ροή. Η διαφοροποίηση στα προβλήματα ροής που θα αντιμετωπιστούν έχει να κάνει με το αν η ροή είναι στρωτή η τυρβώδης. Αυτό έχει να κάνει με την τιμή που λαμβάνει ο αριθμός Re . Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάστηκαν τα εύρη μετάβασης από στρωτή σε μεταβατική και τέλος σε τυρβώδη ροή.

Ανάλογα, τώρα, με το αν η ροή είναι στρωτή η τυρβώδης εξάγεται και η αντίστοιχη έκφραση για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής f . Οι δημοφιλέστερες εκφράσεις για στρωτή και τυρβώδη ροή είναι, (πηγή [3])

- Η έκφραση της στρωτής ροής

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad , \quad \text{Re} < 2300 \quad (3.9)$$

- Η έκφραση της τυρβώδους ροής του Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (3.10)$$

Όπου e είναι η τραχύτητα του αγωγού και D η διάμετρος του. Η συγκεκριμένη έκφραση είναι ακριβής για τιμές του Reynolds μεγαλύτερες από 4000, ενώ σημαντικό μειονέκτημα της είναι το γεγονός πως απαιτεί τη χρήση επαναληπτικής διαδικασίας για την επίλυσή της. Για το λόγο αυτό δεν προτιμήθηκε στην παρακάτω ανάλυση.

- Εναλλακτικά επιλέγεται η έκφραση κατά Swamee-Jain

$$f = \frac{1.325}{\left(\ln \left(0.27 \frac{e}{D} + 5.74 \frac{1}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right)^2} \quad (3.11)$$

Η έκφραση αυτή είναι πειραματική και ακριβής για $5000 < \text{Re} < 10^8$ και $10^{-8} < e/D < 0.01$. Σημαντικό της πλεονέκτημα είναι πως επιλύεται απευθείας, χωρίς τη χρήση κάποιας επαναληπτικής διαδικασίας και αυτό την κάνει προτιμότερη σε προβλήματα όπως αυτά που θα παρατεθούν παρακάτω.

Άλλες εκφράσεις είναι

- $f = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}}$ για $4000 < \text{Re} < 10^5$
- $f = 2 \log(\text{Re} \sqrt{f}) - 0.8$ για $\text{Re} > 10^5$
- $f = 2 \log\left(\frac{D}{e}\right) + 1.14$ για $\frac{\frac{D}{e}}{\text{Re} \sqrt{f}} > 0.005$

Δεν μπορεί να παραλειφθεί φυσικά το διάγραμμα Moody του οποίου η χρήση καθίσταται αρκετά δύσκολη στη φύση των προβλημάτων της παρούσας εργασίας.

3.1.2 Στρωτή Ροή

Για τη στρωτή ροή θα χρησιμοποιηθεί η έκφραση υπολογισμού του συντελεστή τριβής της Εξ. (3.9)

$$f = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64}{\frac{4\rho Q}{\pi D \mu}} = \frac{16\pi D \mu}{\rho Q} \quad (3.12)$$

Εισάγοντας την Εξ. (3.12) στην Εξ. (3.8) έχουμε επιμέρους για τους δύο όρους

Όρος συμπίεστότητας: παραμένει ο ίδιος διότι δεν εξαρτάται από τον συντελεστή τριβής f .

$$\Delta P_{\text{συμπ}} = \frac{16\rho_m Q^2}{\pi^2 D^4} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (3.13)$$

Όρος ασυμπίεστότητας

$$\Delta P_{\text{ασυμπ}} = \frac{8fL\rho_m Q^2}{\pi^2 D^5} = \frac{8 \frac{16\pi D \mu}{\rho_m Q} L \rho_m Q^2}{\pi^2 D^5} = \frac{128\mu L Q}{\pi D^4} \quad (3.14)$$

Συνδυάζοντας τις Εξ. (3.13) και (3.14) λαμβάνεται η τελική έκφραση για την πτώση πίεσης σε στρωτή ροή

$$\Delta P = \frac{16Q^2 \rho_m}{\pi^2 D^4} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) + \frac{128\mu LQ}{\pi D^4} \quad (3.15)$$

3.1.3 Τυρβώδης Ροή

Για την τυρβώδη ροή έγινε χρήση της Εξ. (3.11) (σχέση Swamee-Jain) για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής f . Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με την προηγούμενη παράγραφο έχουμε

$$\Delta P_{\text{συμπ}} = \frac{16\rho_m Q^2}{\pi^2 D^4} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (3.16)$$

$$\Delta P_{\text{ασυμπ}} = \frac{8\rho_m LQ^2}{\pi^2 D^5} \frac{1.325}{\left(\ln\left(0.27\left(\frac{e}{D}\right) + 5.74\frac{1}{\text{Re}^{0.9}}\right)\right)^2} \quad (3.17)$$

Συνδυάζοντας τις Εξ. (3.16) και (3.17) λαμβάνεται η τελική έκφραση υπολογισμού της πτώσης πίεσης για τυρβώδη ροή.

$$\Delta P = \frac{16\rho_m Q^2}{\pi^2 D^4} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) + \frac{8\rho_m LQ^2}{\pi^2 D^5} \frac{1.325}{\left(\ln\left(0.27\left(\frac{e}{D}\right) + 5.74\frac{1}{\text{Re}^{0.9}}\right)\right)^2} \quad (3.18)$$

3.2 Κώδικας PNcompdes και υπολογισμός βρόχων και ψευδοβρόχων

3.2.1 Περιγραφή του κώδικα PNcompdes

Παρουσιάζεται η μεθοδολογία επίλυσης δικτύων σωληνώσεων με τη χρήση του κώδικα PNcompdes. Οι βασικότεροι αλγόριθμοι επίλυσης δικτύων σωληνώσεων είναι η μέθοδος των κόμβων, η μέθοδος των σωλήνων και η μέθοδος των βροχών. Στον παρόν κώδικα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των βρόχων καθώς αποτελεί την

πλέον χρησιμοποιούμενη για συμπίεστες και ασυμπίεστες ροές.

Η μέθοδος των βρόχων προσβλέπει στην βελτιστοποίηση του υπολογιστικού χρόνου επίλυσης ενός δικτύου με δύο βασικές της έννοιες να είναι οι βρόχοι και οι ψευδοβρόχοι. Βρόχος είναι μία κλειστή διαδρομή αγωγών δηλαδή μία διαδρομή με κοινή αρχή και τέλος όπου η πτώση πίεσης είναι ίση με το μηδέν, ενώ ψευδοβρόχοι είναι μία διαδρομή μεταξύ δύο κόμβων δεδομένης πίεσης. Αναλυτικότερα οι σχέσεις οι όποιες εκφράζουν τα παραπάνω και έχουν χρησιμοποιηθεί στην μεθοδολογία του κώδικα αναφέρονται στην πηγή [3]. Η εξίσωση που συνδέει κλάδους, κόμβους, βρόχους και ψευδοβρόχους είναι

$$p = n + l + f - 1 \quad (3.19)$$

Με p να είναι ο αριθμός των αγωγών, n ο αριθμός των κόμβων του δικτύου, l ο αριθμός των βρόχων και f ο αριθμός των κόμβων δεδομένης πίεσης (δεξαμενές). Για να ισχύει λοιπόν η μεθοδολογία επίλυσης του συγκεκριμένου κώδικα θα πρέπει να τηρείται η Έκφραση (3.19). Επίσης, να αναφερθεί πως ο αριθμός των ψευδοβρόχων δίνεται από την Εξ. (3.20)

$$n_{pseudo} = f - 1 \quad (3.20)$$

Αναλυτικότερα για τον αλγόριθμο επίλυσης των εξισώσεων των βρόχων και το μοντέλο σε Matlab, βλέπε Κεφάλαιο 5, πηγή [3].

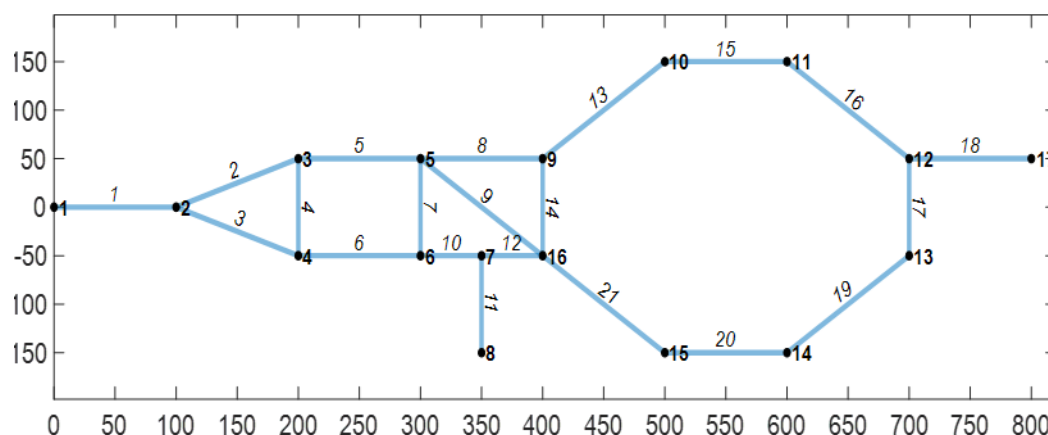
3.2.2 Υπορουτίνα υπολογισμού βρόχων και ψευδοβρόχων σε δίκτυα σωληνώσεων.

Ο υπάρχον κώδικας, χρησιμοποιεί τη μέθοδο των βρόχων για την επίλυση των δικτύων σωληνώσεων. Βασικό ζήτημα σε πολύπλοκα δίκτυα μεγάλου μεγέθους είναι να βρεθεί ο αριθμός των βρόχων και των ψευδοβρόχων από τους οποίους απαρτίζεται ένα δίκτυο. Έτσι, σε συνεργασία με το συνάδελφο Τσουμπαριώτη Κωνσταντίνο δημιουργήθηκε μια επιπλέον υπορουτίνα η οποία ικανοποιεί το σκοπό αυτό. Αυτή ονομάστηκε `findloop` και αφού γίνει συλλογή των δεδομένων της γεωμετρίας του δικτύου, καλείται στο αρχείο εισόδου (`ripenput`) και πραγματοποιεί τις παρακάτω ενέργειες.

- Κατασκευή δικτύου και αρίθμηση των κόμβων και των βρόχων.
- Υπολογισμός του αριθμού των βρόχων με τη χρήση της Εξ. (3.19).
- Υπολογισμός όλων των ανεξάρτητων βρόχων του δικτύου με τη χρήση της εντολής `cyclebasis` της βιβλιοθήκης του Matlab [4].
- Υπολογισμός του αριθμού των ψευδοβρόχων με χρήση της Εξ. (3.20).
- Εύρεση των ψευδοβρόχων με χρήση της εντολής `shortestpath` της βιβλιοθήκης του Matlab [4], η οποία βρίσκει τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ των κόμβων δεδομένης πίεσης.

3.2.3 Εφαρμογή υπολογισμού βρόχων και ψευδοβρόχων σε δίκτυο

Στην παράγραφο αυτή θα παρατεθεί μια εφαρμογή για την καλύτερη κατανόηση του αντικειμένου της Παραγράφου 3.2.2, όπου αναλύθηκε η μεθοδολογία εύρεσης βρόχων και ψευδοβρόχων σε δίκτυα σωληνώσεων. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε το δίκτυο του Σχήματος 1, το οποίο αποτελείται από 17 κόμβους και 21 αγωγούς. Στην προκειμένη φάση δεν ενδιαφέρει το μοντέλο ροής παρά μόνο η εύρεση όλων των ανεξάρτητων βρόχων και του αριθμού τους, καθώς και όλων των ψευδοβρόχων του δικτύου. Μετά τη δημιουργία του δικτύου υπολογίζονται οι παραπάνω ποσότητες σύμφωνα με την υπορουτίνα του Παραρτήματος Α. Τα αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω.



Σχήμα 3.1. Γεωμετρία δικτύου για εύρεση βρόχων και ψευδοβρόχων.

- Αριθμός ανεξάρτητων βρόχων = $n_{loops} = 5$
- Αριθμός ψευδοβρόχων = $n_{pseudoloops} = 2$

Πίνακας 3.1. Βρόχοι του δικτύου του Σχήματος 1.

2	4	3	0	0	0	0	0	0
4	6	7	5	0	0	0	0	0
7	10	12	9	0	0	0	0	0
8	13	15	16	17	19	20	21	9
8	14	9	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 3.2. Ψευδοβρόχοι του δικτύου του Σχήματος 1.

1	3	6	10	11	0	0
11	12	14	13	15	16	18

Ο αριθμός των βρόχων είναι πέντε και στον Πίνακα 1 παρατηρούνται οι βρόχοι του συστήματος ανά γραμμή του πίνακα. Κάθε νούμερο δείχνει τον αριθμό του αγωγού και διαβάζοντας από αριστερά προς τα δεξιά με παράλληλη παρατήρηση του Σχήματος 1 παρατηρούνται οι ανεξάρτητοι βρόχοι του συστήματος. Τα μηδενικά στον πίνακα δημιουργούνται αυτόματα από τον κώδικα όταν ο βρόχος έχει σχηματιστεί. Στον Πίνακα 2 παρατηρούνται οι δύο ψευδοβρόχοι του δικτύου διαβάζοντας τον πίνακα πάλι από αριστερά προς τα δεξιά. Στο σημείο αυτό να σημειωθεί πως αρχικά υπολογίζεται ο αριθμός των ανεξάρτητων βρόχων, ο οποίος στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι ίσος με πέντε και έπειτα οι πέντε πρώτοι ανεξάρτητοι βρόχοι του δικτύου. Αναφορικά με τους ψευδοβρόχους, υπολογίζονται με βάση την κοντινότερη διαδρομή ανάμεσα σε δύο κόμβους δεδομένης πίεσης. Όταν ο αριθμός τους είναι μεγαλύτερος από ένα τότε η αρχή του δεύτερου ψευδοβρόχου ταυτίζεται με το τέλος του πρώτου.

3.3 Ανάλυση και διάδοση αβεβαιοτήτων σε δίκτυα σωληνώσεων με τη χρήση των μεθόδων Sensitivity Derivatives και Monte Carlo

3.3.1 Μέθοδοι ανάλυση αβεβαιότητας Sensitivity Derivatives και Monte Carlo

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αναλύσεις αμοιβαιότητας και κάποιες από αυτές αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση πάνω στην αναλυτική μέθοδο Sensitivity Derivatives (SD) και τη στοχαστική μέθοδο Monte Carlo (MC), καθώς και στην εφαρμογή των μεθόδων αυτών σε δίκτυα σωληνώσεων.

Και στις μεθοδολογίες θεωρούμε μεταβλητές εισόδου x_m , $m=1,2,\dots,M$ με το M να είναι ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου. Η ονομαστική τιμή της μεταβλητής εισόδου και η αντίστοιχη αβεβαιότητα συμβολίζονται με $x_{m,n}$ και $u(x_m)$ αντίστοιχα. Έτσι, κάθε μεταβλητή εισόδου μπορεί να εκφρασθεί με τη σχέση

$$x_m = x_{m,n} \pm u(x_m) \quad (3.21)$$

Η μεταβλητή εξόδου συμβολίζεται με y και υπολογίζεται συναρτήσει των μεταβλητών εισόδου x_m , δηλαδή $y = f(x_1, x_2, \dots, x_M)$ με την αντίστοιχη αβεβαιότητα της να είναι η $u(y)$. Στόχος είναι να αναλυθεί η συμπεριφορά της αβεβαιότητας εξόδου $u(y)$, όσο αλλάζουν οι τιμές των μεταβλητών εισόδου x_m .

3.3.1.1 Sensitivity Derivatives (SD)

Σύμφωνα με τη μέθοδο SD [16] η έκφραση η οποία συνδέει τις δύο αβεβαιότητες είναι

$$u^2(y) = \sum_{m=1}^M \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 u^2(x_m) \quad (3.22)$$

όπου f είναι η συνάρτηση που συνδέει τις μεταβλητές εισόδου (x_m) και εξόδου (y) και η μερική παράγωγος της f ως προς τη μεταβλητή εισόδου x ονομάζεται συντελεστής ευαισθησίας.

Με υπόθεση μιας μεταβλητής εισόδου x ή ω (3.22) απλοποιείται στην έκφραση:

$$u^2(y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 u^2(x) \quad (3.23)$$

και με κατάλληλη επεξεργασία μπορεί να εξαχθεί η έκφραση που συνδέει τις σχετικές αβεβαιότητες των μεταβλητών εισόδου και εξόδου.

$$u^2(y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 u^2(x) \Rightarrow u(y) = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| u(x) \Rightarrow$$

$$\frac{u(y)}{y} = \frac{1}{y} \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| u(x) \quad (3.24)$$

Εφαρμογή της μεθόδου θα γίνει στην Παράγραφο 3.3.2 σε σύστημα ενός αγωγού.

3.3.1.2 Monte Carlo (MC)

Αναφορικά με την μέθοδο MC αξίζει να αναφερθεί πως αποτελεί μια στοχαστική μέθοδο η οποία βασίζεται σε μεγάλο αριθμό δοκιμών (trials) $i=1,2,\dots,N_t$. Για κάθε δοκιμή οι τιμές των μεταβλητών εισόδου οι οποίες υποβάλλονται σε αβεβαιότητα, επιλέγονται τυχαία μέσα από την κατανομή στην οποία έχουν τεθεί και υπολογίζεται η τιμή της αντίστοιχης μεταβλητής εξόδου. Μετά από πολλές δοκιμές της συγκεκριμένης διαδικασίας, διαμορφώνεται η συνάρτηση κατανομής των μεταβλητών εξόδου και υπολογίζεται η αβεβαιότητα εξόδου.

Η αβεβαιότητα της μεταβλητής εξόδου υπολογίζεται ως το 95% του διαστήματος κάλυψης και η μεταβλητή εξόδου εκφράζεται από τη σχέση

$$y = \bar{y} \pm u(y) \quad (3.25)$$

όπου $\bar{y} = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} y_i$ είναι η μέση τιμή των μεταβλητών εξόδου, με y_i να είναι η έξοδος

στην i -οστή δοκιμή. Η αβεβαιότητα εξόδου υπολογίζεται από την έκφραση

$$u(y) = k\sigma_y \quad (3.26)$$

όπου k είναι ο συντελεστής κάλυψης και παίρνει την τιμή $k=2$ για 95% ποσοστό κάλυψης και σ_y η τυπική απόκλιση η οποία δίνεται από τη Εξ. (3.27)

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N_t - 1} \sum_{i=1}^{N_t} (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.27)$$

Οι μεταβλητές εισόδου και η αντίστοιχη αβεβαιότητα συνδέονται με την Εξ. (3.21) με την κατανομή τους να μην είναι πάντα γνωστή. Όταν η κατανομή δεν είναι γνωστή επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί μία ομοιόμορφη κατανομή με τις μεταβλητές εισόδου να ανήκουν στο διάστημα: $x_m \in [x_{m,n} - u(x_m), x_{m,n} + u(x_m)]$. Κάθε μεταβλητή εισόδου επιλέγεται τυχαία σύμφωνα με τον τύπο

$$x_m = x_{m,n} + u(x_m)(1 - 2R_f) \quad (3.28)$$

όπου R_f είναι ένας τυχαίος αριθμός μεταξύ του 0 και 1. Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση ομοιόμορφης κατανομής. Στα παρακάτω προβλήματα χρησιμοποιήθηκε η έννοια της σχετικής αβεβαιότητας μεταβλητών εισόδου και εξόδου η οποίες περιγράφονται μαθηματικά ως εξής

- Σχετική αβεβαιότητα μεταβλητών εισόδου: $u_{rel}(x_m) = \frac{u(x_m)}{x_m} \times 100\%$
- Σχετική αβεβαιότητα μεταβλητής εξόδου: $u_{rel}(y) = \frac{u(y)}{y} \times 100\%$

Να σημειωθεί πως η επίδραση κάθε μεταβλητής εισόδου εξετάζεται μεμονωμένα και πως όταν μία μεταβλητή εισόδου τεθεί σε αβεβαιότητα τότε οι υπόλοιπες μεταβλητές εισόδου έχουν μηδενική αβεβαιότητα. Αυτό γίνεται ώστε να εξεταστεί ευκολότερα η επίδραση της κάθε μεταβλητής εισόδου στην έξοδο. Η συνολική

αβεβαιότητα εξόδου όταν τίθεται αβεβαιότητα σε περισσότερες από μία εισόδους δίνεται από τον παρακάτω τύπο

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{m=1}^m (u_{x_m}(y))^2} \quad (3.29)$$

όπου $u_{x_m}(y)$ είναι η αβεβαιότητα εξόδου, λόγω της αβεβαιότητας εισόδου της μεταβλητής x_m . Να σημειωθεί πως η Εξ. (3.29) ισχύει μόνο στην περίπτωση που οι μεταβλητές εισόδου είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους.

3.3.2 Εφαρμογή των μεθόδων Sensitivity Derivatives και Monte Carlo σε σύστημα ενός αγωγού

3.3.2.1 Sensitivity Derivatives – Σύστημα ενός αγωγού

Αρχικά γίνεται υπόθεση αγωγού μεγάλου μήκους

$$\frac{L}{D} = 10 \quad (3.30)$$

Επίσης για να διευκολυνθεί η εύρεση της πτώσης πίεσης μέσω της Εξ. (3.15) υποθέτουμε πως

$$\begin{aligned} P_1 &= P_0 + \frac{\Delta P}{2} \\ P_2 &= P_0 - \frac{\Delta P}{2} \end{aligned} \quad (3.31)$$

όπου : $P_0 = \frac{P_1 + P_2}{2}$

Εφαρμόζοντας την Εξ. (3.30) και Εξ. (3.31) στην Εξ. (3.15) λαμβάνεται η τελική έκφραση για υπολογισμό της πτώσης πίεσης

$$\Delta P = \frac{16Q^2 \rho_m}{\pi^2 D^4} \ln \left(\frac{P_0 + \frac{\Delta P}{2}}{P_0 - \frac{\Delta P}{2}} \right) + \frac{1280 \mu Q}{\pi D^3} \quad (3.32)$$

με

$$\Delta P_{\text{συμπ}} = \frac{16Q^2 \rho_m}{\pi D^4} \ln \left(\frac{P_0 + \frac{\Delta P}{2}}{P_0 - \frac{\Delta P}{2}} \right) \quad (3.33)$$

και

$$\Delta P_{\text{ασυμπ}} = \frac{1280\mu Q}{\pi D^3} \quad (3.34)$$

Ακολουθεί η εφαρμογή της μεθόδου SD στο παραπάνω πρόβλημα με μεταβλητή εισόδου τη διάμετρο D.

Για τον όρο συμπίεστικότητας η μερική παράγωγος ως προς D θα είναι

$$\frac{\partial \Delta P_{\text{συμπ}}}{\partial D} = \frac{16Q^2 \rho_m}{\pi^2} \ln \left(\frac{P_0 + \frac{\Delta P}{2}}{P_0 - \frac{\Delta P}{2}} \right) \left(-\frac{4}{D^5} \right)$$

και εφαρμόζοντας τη Εξ. (3.24) προκύπτει

$$\begin{aligned} \frac{u(\Delta P_{\text{συμπ}})}{\Delta P_{\text{συμπ}}} &= \frac{1}{\Delta P_{\text{συμπ}}} \left| \frac{\partial(\Delta P_{\text{συμπ}})}{\partial D} \right| \frac{u(D)}{D} = \frac{\frac{16Q^2 \rho_m}{\pi^2} \ln \left(\frac{P_0 + \frac{\Delta P}{2}}{P_0 - \frac{\Delta P}{2}} \right) \left(\frac{4}{D^5} \right)}{\frac{16Q^2 \rho_m}{\pi D^4} \ln \left(\frac{P_0 + \frac{\Delta P}{2}}{P_0 - \frac{\Delta P}{2}} \right)} u(D) \Rightarrow \\ \frac{u(\Delta P_{\text{συμπ}})}{\Delta P_{\text{συμπ}}} &= 4 \frac{u(D)}{D} \end{aligned} \quad (3.35)$$

Για τον όρο ασυμπίεστικότητας η μερική παράγωγος ως προς D είναι

$$\frac{\partial(\Delta P_{\text{ασυμπ}})}{\Delta P_{\text{ασυμπ}}} = \frac{1280\mu Q}{\pi} \left(-\frac{3}{D^4} \right)$$

και εφαρμόζοντας την Εξ. (3.24) προκύπτει

$$\frac{u(\Delta P_{\text{ασυμπ}})}{\Delta P_{\text{ασυμπ}}} = 3 \frac{u(D)}{D} \quad (3.36)$$

Από τις Εξ. (3.35) και (3.36) αυτό που εξάγεται ως συμπέρασμα είναι πως όταν η ροή είναι ασυμπιεστή μια μικρή μεταβολή στη διάμετρο επιφέρει τρεις φορές μεγαλύτερη μεταβολή στη πτώση πίεσης. Ενώ όταν η ροή είναι συμπιεστή τότε επιφέρει τέσσερις φορές μεγαλύτερη μεταβολή.

Η παραπάνω ανάλυση έγινε για να εξαχθεί η αβεβαιότητα της πτώσης πίεσης στον αγωγό. Με επίλυση της Εξ. (3.5) ως προς την παροχή και χρήση των Εξ. (3.30) και (3.31) προκύπτει η σχέση υπολογισμού παροχής στον αγωγό

$$Q = \sqrt{\left(\frac{\pi^2 D^4 \Delta P}{8 \rho_m} \right) \left(2 \ln \left(\frac{P_0 + \frac{\Delta P}{2}}{P_0 - \frac{\Delta P}{2}} \right) + 10f \right)^{-1}} \quad (3.37)$$

$$\text{όπου } f = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64}{\frac{4\rho_m Q}{\pi D \mu}} = \frac{16\pi D \mu}{\rho_m Q} \quad (3.9)$$

Όπως είναι αντιληπτό η Εξ. (3.37) δεν μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα δυο όρων. Αυτό που μπορεί να γίνει είναι να διαχωριστούν οι δύο όροι και να εξεταστούν επιμέρους. Δηλαδή έστω ο όρος συμπίεστικότητας

$$Q_{\text{συμπ}} = \sqrt{\frac{\pi^2 D^4 \Delta P}{16 \rho_m} \left(\ln \left(\frac{P_0 + \frac{\Delta P}{2}}{P_0 - \frac{\Delta P}{2}} \right) \right)^{-1}} \quad (3.38)$$

και ο όρος ασυμπιεστότητας με αντικατάσταση του συντελεστή τριβής f (Εξ. (3.9))

$$Q_{ασυμπ} = \frac{\pi D^3 \Delta P}{1280 \mu} \quad (3.39)$$

Εφαρμόζοντας SD στις δύο παραπάνω σχέσεις με μεταβλητή εισόδου τη διάμετρο D έχουμε για τους δυο όρους αντίστοιχα

$$\frac{u(Q_{συμπ})}{Q_{συμπ}} = 2 \frac{u(D)}{D} \quad (3.40)$$

και

$$\frac{u(Q_{ασυμπ})}{Q_{ασυμπ}} = 3 \frac{u(D)}{D} \quad (3.41)$$

Τέλος, αξίζει να αναλυθεί και η επίδραση της διαμέτρου D στο συντελεστή τριβής f. Αναλύεται η περίπτωση της στρωτής ροής οπότε ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται από την Εξ. (3.12). Υπολογίζοντας τη μερική παράγωγο ως προς η διάμετρο προκύπτει:

$$\frac{\partial f}{\partial D} = \frac{16\pi\mu}{\rho_m Q}$$

Εφαρμόζοντας SD για το συντελεστή τριβής εν τέλει προκύπτει ότι

$$\frac{u(f)}{f} = \frac{u(D)}{D} \quad (3.42)$$

Δηλαδή μια μικρή μεταβολή στη διάμετρο του αγωγού επιφέρει την ίδια μεταβολή και στο συντελεστή τριβής.

Στη συνέχεια θα γίνει η ίδια με την παραπάνω ανάλυση για την περίπτωση της τυρβώδους ροής. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στην τυρβώδη ροή ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται από την Εξ. (3.11) και αποτελεί την αιτία διαφοροποίησης των τύπων υπολογισμού πτώσης πίεσης και παροχής. Η πτώση πίεσης υπολογίζεται από την Εξ. (3.18) και εισάγοντας τις υποθέσεις (3.30) και (3.31) η τελική έκφραση που εξάγεται για την πτώση πίεσης θα είναι

$$\Delta P = \frac{16\rho_m Q^2}{\pi^2 D^4} \ln \left(\frac{P_0 + \frac{\Delta P}{2}}{P_0 - \frac{\Delta P}{2}} \right) + \frac{80\rho_m f Q^2}{\pi^2 D^4} \quad (3.43)$$

όπου: $f = 1.325 \left(\ln \left(0.27 \left(\frac{e}{D} \right) + 5.74 \frac{1}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right)^{-2}$

Μπορεί να παρατηρηθεί από την Εξ. (3.43), πως η απλοποίηση του τελικού τύπου είναι δύσκολο να υλοποιηθεί, καθώς η σχέση υπολογισμού του συντελεστή τριβής είναι αρκετά πιο πολύπλοκη από αυτή της στρωτής ροής. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος για τον οποίο ως πρώτη προσέγγιση ο συντελεστής τριβής f τέθηκε ως μια σταθερά στην ανάλυση αβεβαιότητας με την SD, καθώς απαιτείται αριθμητική παραγωγή της σχέσης αυτής. Έτσι, όπως και στην περίπτωση της στρωτής ροής η Εξ. σ(3.43) μπορεί να αναλυθεί με δύο όρους, τον όρο συμπιεστότητας και ασυμπιεστότητας. Ο πρώτος όρος είναι ταυτόσημος με αυτόν της στρωτής ροής οπότε και στην ανάλυση αβεβαιότητας δε θα αλλάξει κάτι. Αναφορικά με το δεύτερο όρο μετά από τη εξαγωγή της μερικής παραγώγου και την εφαρμογή της SD προκύπτουν τα παρακάτω.

Όρος ασυμπιεστότητας: $\Delta P_{\text{ασυμπ}} = \frac{80\rho_m f Q^2}{\pi^2 D^4}$

$$\frac{u(\Delta P_{\text{ασυμπ}})}{\Delta P_{\text{ασυμπ}}} = 4 \frac{u(D)}{D}$$

Συνολικά λοιπόν και οι δυο όροι δίνουν μεταβολή 4 φορές μεγαλύτερη από αυτή της διαμέτρου.

$$\frac{u(\Delta P_{\text{ασυμπ}})}{\Delta P_{\text{ασυμπ}}} = \frac{u(\Delta P_{\text{συμπ}})}{\Delta P_{\text{συμπ}}} = 4 \frac{u(D)}{D} \quad (3.44)$$

Για την παροχή τώρα, θα πρέπει να γίνει χρήση της Εξ. (3.37). Ο όρος συμπιεστότητας παραμένει ο ίδιος, ενώ διαφοροποιείται αυτός της ασυμπιεστότητας.

Από τη στιγμή που ο πρώτος όρος είναι ο ίδιος μετά από την ανάλυση αβεβαιότητας με την SD θα προκύψει το ίδιο αποτέλεσμα με αυτό της στρωτής ροής

$$\frac{u(Q_{συμπ})}{Q_{συμπ}} = 2 \frac{u(D)}{D} \quad (3.45)$$

Για το δεύτερο όρο τώρα, όπως και στην περίπτωση της πτώσης πίεσης υποτίθεται πώς ο συντελεστής τριβής f είναι μια σταθερά και έτσι εφαρμόζοντας SD θα είναι

$$\text{Όρος ασυμπίεστότητας: } Q_{ασυμπ} = \sqrt{\left(\frac{\pi^2 D^4 \Delta P}{8 \rho_m}\right)} (10f)^{-1}$$

και

$$\frac{u(Q_{ασυμπ})}{Q_{ασυμπ}} = 2 \frac{u(D)}{D}$$

Άρα συγκεντρωτικά είναι

$$\frac{u(Q_{ασυμπ})}{Q_{ασυμπ}} = \frac{u(Q_{συμπ})}{Q_{συμπ}} = 2 \frac{u(D)}{D} \quad (3.46)$$

3.3.2.2 Monte Carlo Method – Σύστημα ενός αγωγού

Για να υλοποιηθεί η μέθοδος MC στο σύστημα του ενός αγωγού έπρεπε πρώτα να επιλυθεί το πρόβλημα της στρωτής και τυρβώδους ροής. Έτσι, έγινε χρήση των Εξ. (3.43) και (3.37) για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης και της παροχής αντίστοιχα για στρωτή και τυρβώδη ροή. Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την εύρεση των αβεβαιοτήτων πτώσης πίεσης και παροχής στον αγωγό είναι η παρακάτω

- Καθορισμός των τιμών όλων των σταθερών παραμέτρων του προβλήματος (στοιχεία αγωγού, στοιχεία αερίου και διάφορες παράμετροι ροής).
- Καθορισμός του αριθμού των δοκιμών (trials) που θα πραγματοποιήσει η MC.
- Καθορισμός της σχετικής αβεβαιότητας της μεταβλητής εισόδου(πχ. 1,5,10 ή 20 %) και της μέσης τιμής της.

- Δημιουργία ομοιόμορφης κατανομής της μεταβλητής εισόδου (στην συγκεκριμένη περίπτωση μεταβλητή εισόδου είναι η διάμετρος D του αγωγού).
- Υπολογισμός της μεταβλητής εξόδου (πτώση πίεσης ή παροχή) για τις διάφορες τιμές της διαμέτρου που έχουν δημιουργηθεί.
- Εύρεση μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης της μεταβλητής εξόδου.
- Υπολογισμός της αβεβαιότητας και της σχετικής αβεβαιότητας της μεταβλητής εξόδου.

3.3.3 Εφαρμογή μεθόδου Monte Carlo σε δίκτυα σωληνώσεων

Για τον υπολογισμό των δικτύων έγινε χρήση του υπάρχοντα κώδικα PNcompdes. Δημιουργήθηκε ένα νέο κομμάτι κώδικα το οποίο υλοποιεί την μέθοδο ανάλυσης αβεβαιοτήτων MC το οποίο χρησιμοποιεί τον υπάρχοντα κώδικα. Πιο αναλυτικά ακολουθείται η παρακάτω μεθοδολογία.

- Καθορισμός των τιμών όλων των παραμέτρων του προβλήματος (στοιχεία αγωγών, στοιχεία αερίου και διάφορες παράμετροι ροής), καθώς και της γεωμετρίας του δικτύου.
- Καθορισμός του αριθμού των δοκιμών (trials) που θα πραγματοποιήσει η MC.
- Καθορισμός της σχετικής αβεβαιότητας της μεταβλητής εισόδου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση μεταβλητή εισόδου είναι η διάμετροι των αγωγών, οι οποίες μεταβάλλονται όλες με τον ίδιο τρόπο αλλά τυχαία.
- Καθορισμός της μέσης τιμής για όλες τις διαμέτρους.
- Δημιουργία της ομοιόμορφης κατανομής για κάθε διάμετρο ξεχωριστά.
- Χρήση του κώδικα για υπολογισμό παροχής στους αγωγούς και πίεσης στους κόμβους του δικτύου.
- Εύρεση μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης για τις μεταβλητές εξόδου (παροχές και πιέσεις).
- Υπολογισμός αβεβαιοτήτων και σχετικών αβεβαιοτήτων των μεταβλητών εξόδου (παροχές και πιέσεις).

Κεφάλαιο 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ

4.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η συσχέτιση των μεθοδολογιών ανάλυσης αβεβαιότητας με τα δίκτυα σωληνώσεων αερίων μέσα από εξειδικευμένες εφαρμογές. Για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος θα πραγματοποιηθεί αρχικά ανάλυση αβεβαιότητας σε σύστημα ενός αγωγού και έπειτα θα γίνει επέκταση και σε δίκτυα σωληνώσεων. Σε όλες τις εφαρμογές που θα ακολουθήσουν το κινούμενο ρευστό είναι αέρας υπό σταθερή θερμοκρασία με κινούσα δύναμη τη διαφορά πίεσης. Η θερμοκρασία του αέρα είναι 100 °C, οπότε προκύπτουν αντίστοιχα και οι θερμοφυσικές ιδιότητες και οι αγωγοί είναι κυκλικής διατομής.

4.2 Αποτελέσματα ανάλυσης αβεβαιότητας σε σύστημα ενός αγωγού

Η ανάλυση και τα αποτελέσματα διαχωρίζονται στις περιπτώσεις της στρωτής ροής της τυρβώδους ροής. Αρχικά, δίνονται κάποιες από τις ονομαστικές τιμές σε πίνακα και έπειτα συγκεκριμένα διαγράμματα όπου μπορεί να παρατηρηθεί η εξάρτηση των αποτελεσμάτων της πτώση πίεσης, του αριθμού Reynolds, του αριθμού Ma και του συντελεστή τριβής f όσο αυξάνεται η παροχή όγκου για στρωτή και τυρβώδη ροή. Έπειτα, παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης αβεβαιότητας (αβεβαιότητα πτώσης πίεσης και ογκομετρικής παροχής) με μεταβλητή εισόδου τη διάμετρο D του αγωγού. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται με συγκεκριμένα διαγράμματα αρχικά για αβεβαιότητα εισόδου 1% και μεγαλύτερες τιμές της διαμέτρου και της παροχής και στη συνέχεια, για διάφορες τιμές αβεβαιότητας εισόδου, έτσι ώστε να εξαχθεί η συμπεριφορά των αβεβαιοτήτων πτώσης πίεσης και παροχής όσο αυξάνει η αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο του αγωγού.

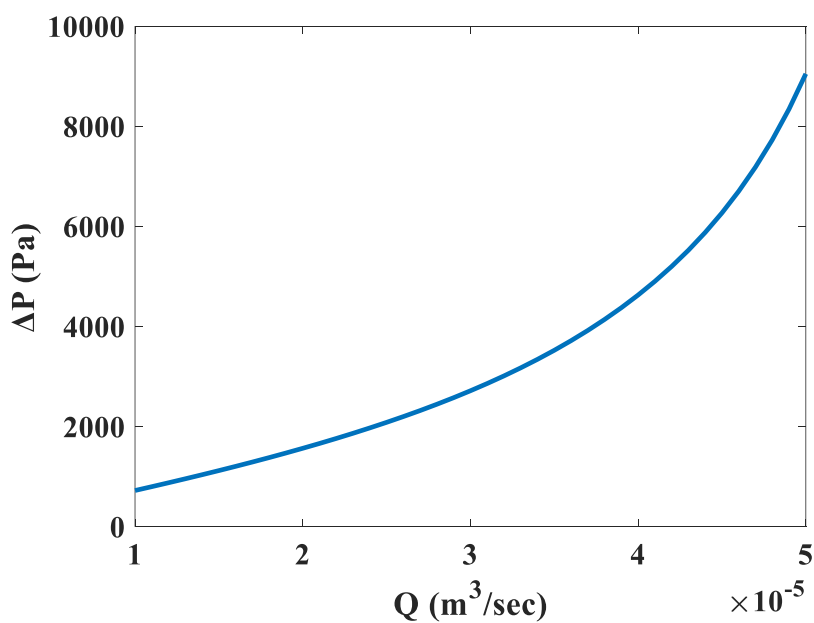
4.2.1 Στρωτή Ροή

Για τη στρωτή ροή χρησιμοποιήθηκε η Σχέση (3.32)

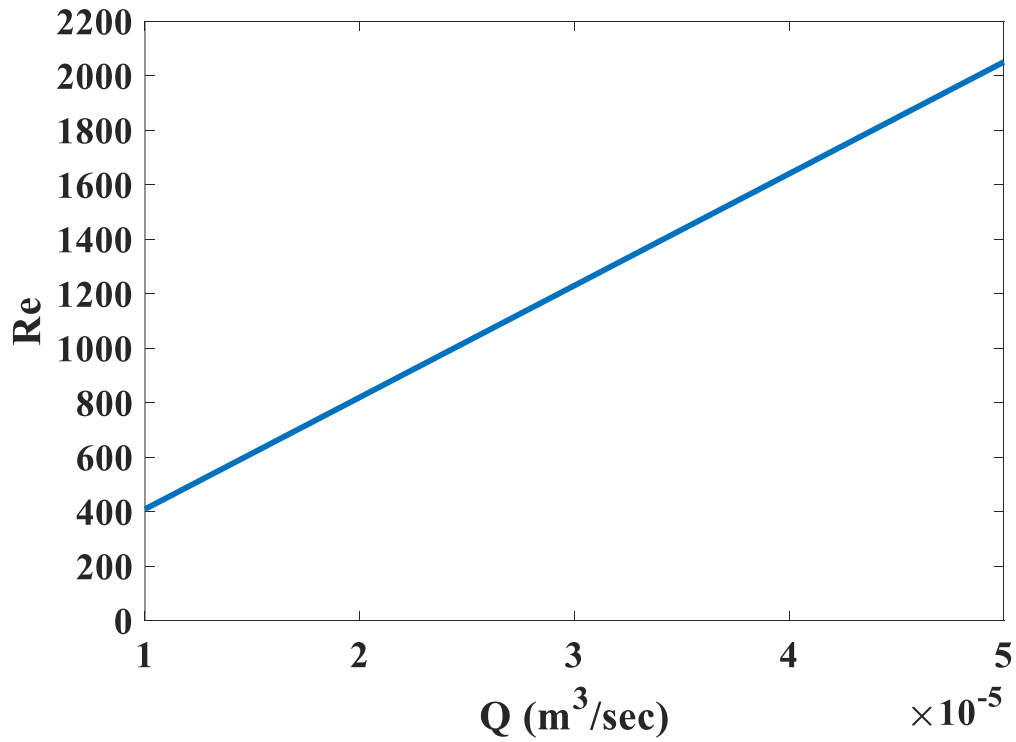
$$\Delta P = \frac{16Q^2 \rho_m}{\pi^2 D^4} \ln \left(\frac{P_o + \frac{\Delta P}{2}}{P_o - \frac{\Delta P}{2}} \right) + \frac{1280 \mu Q}{\pi D^3} \quad (3.32)$$

Πίνακας 4.1. Ονομαστικές τιμές για το σύστημα ενός αγωγού σε συνθήκες στρωτής ροής.

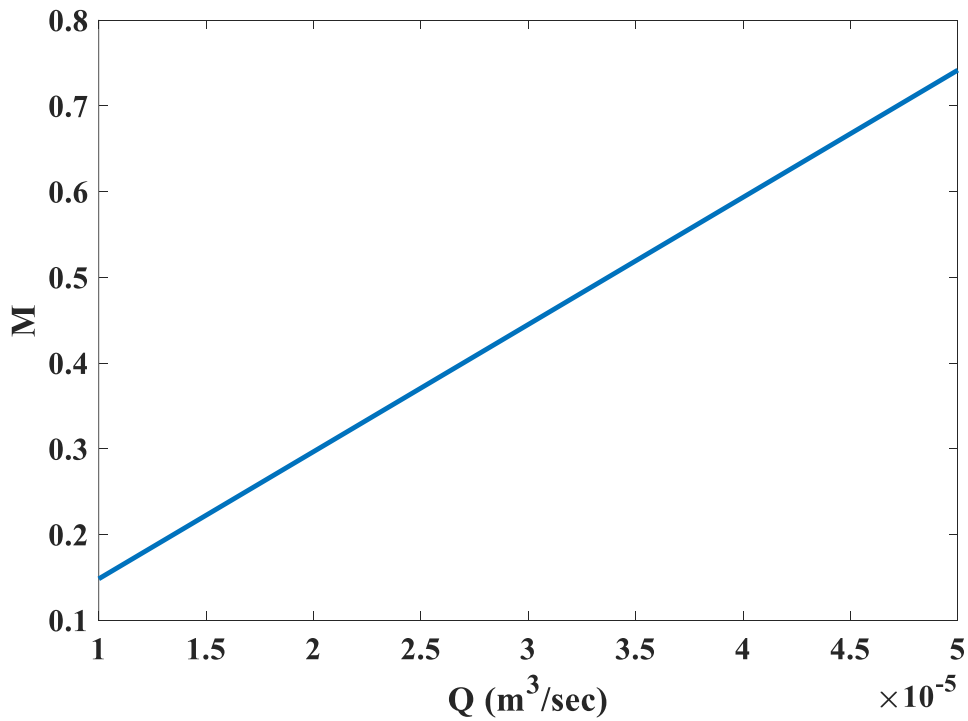
Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα σε SI
Θερμοκρασία αέρα	T	100	°C
Ιξώδες αέρα	μ	2.17E-05	Pa*sec
Ταχύτητα διάδοσης του ήχου	α	343.3	m/sec
Σταθερά ιδανικών αερίων για αέρα	R	287.05	J/kg-K
Διάμετρος αγωγού	D	0.0005	m
Τραχύτητα αγωγού	e	0.00015	m
Μέση πίεση	P ₀	37 500	Pa



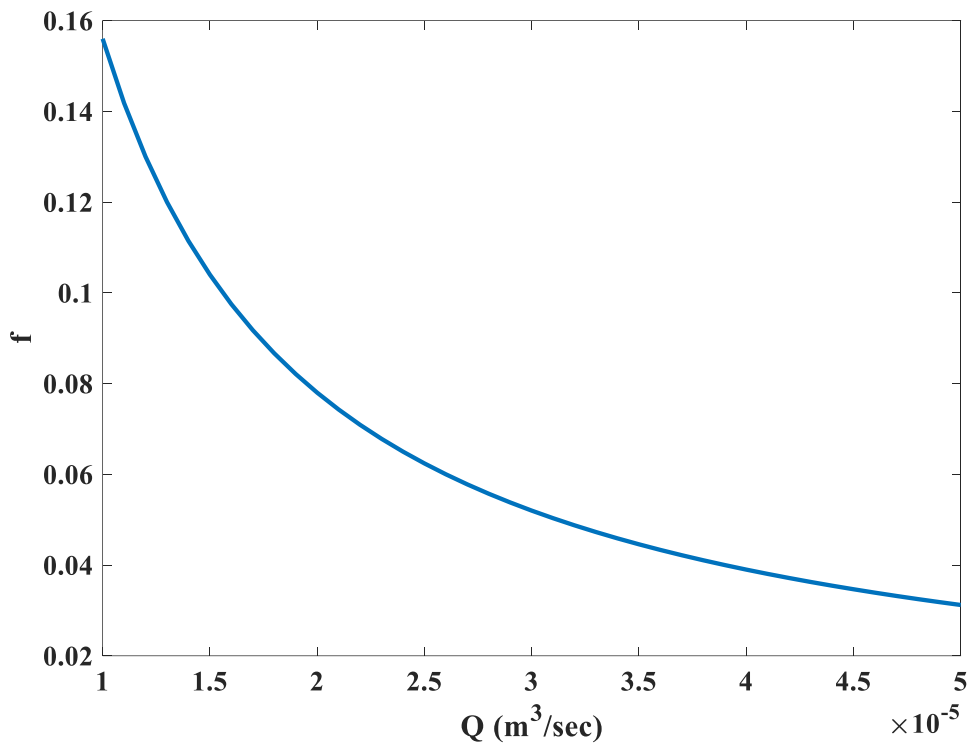
Σχήμα 4.1. Μεταβολή πτώσης πίεσης με αύξηση της παροχής σε στρωτή ροή.



Σχήμα 4.2. Μεταβολή αριθμού Re με αύξηση της παροχής σε στρωτή ροή.



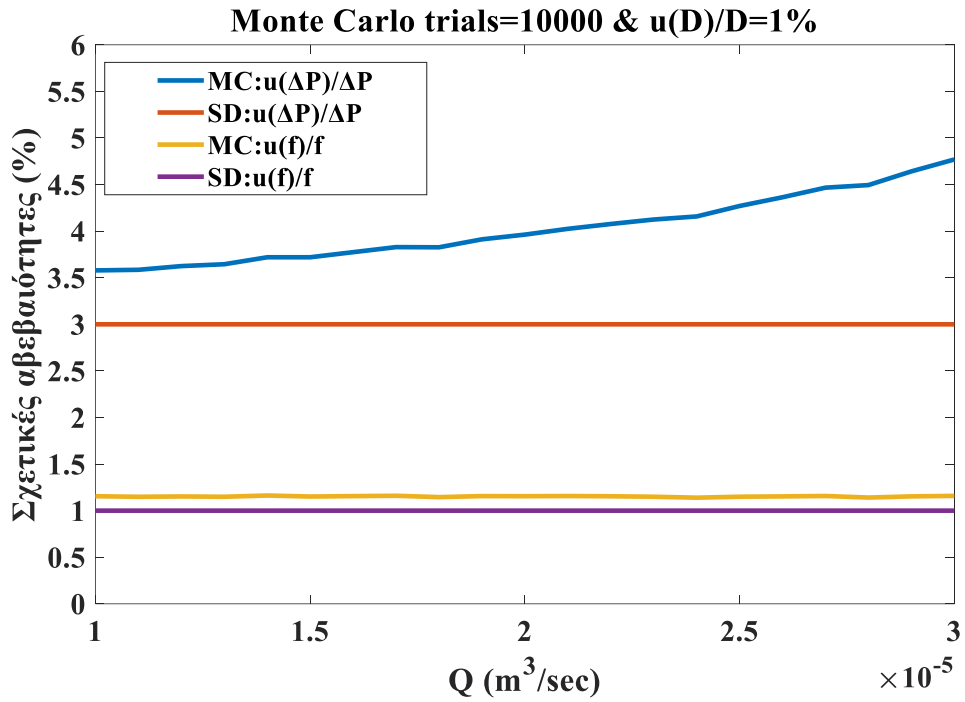
Σχήμα 4.3. Μεταβολή του αριθμού Ma με αύξηση της παροχής σε στρωτή ροή.



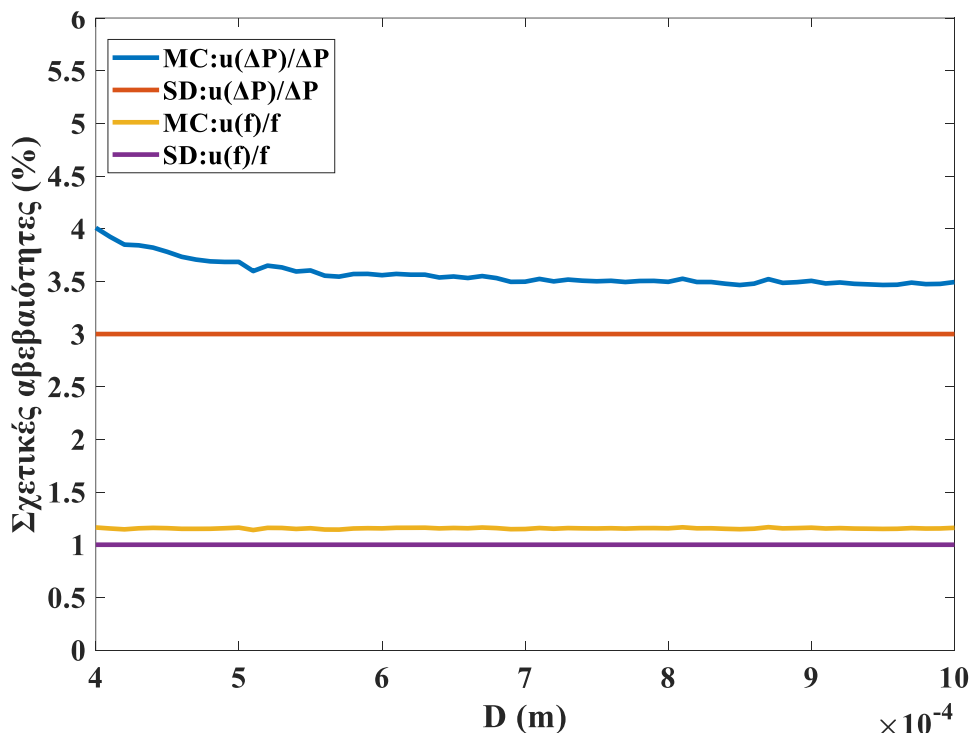
Σχήμα 4.4. Μεταβολή του συντελεστή τριβής με αύξηση της παροχής σε στρωτή ροή.

Παρατηρείται εκθετική αύξηση της πτώσης πίεσης (Σχήμα 4.1) και εκθετική μείωση του συντελεστή τριβής (Σχήμα 4.4), ενώ οι αριθμοί Reynolds (Σχήμα 4.2) και Ma (Σχήμα 4.3) αυξάνονται γραμμικά. Με παρατήρηση των εξισώσεων της Ενότητας 3.1.2 εξηγείται η μεταβολή των παραπάνω ποσοτήτων σε αύξηση της παροχής.

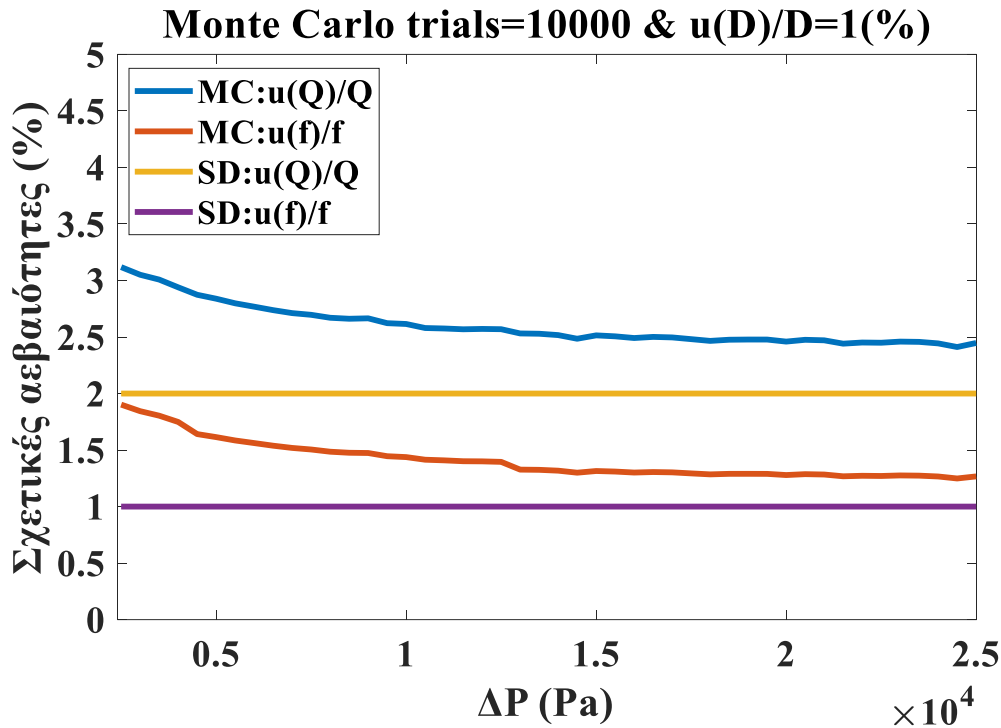
Μετά την επίλυση του προβλήματος στρωτής ροής σ ένα αγωγό υλοποιείται ανάλυση αβεβαιότητας με τη χρήση των μεθόδων SD και MC. Για τη μέθοδο SD η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στην Παράγραφο 3.3.2.1. Για τη μέθοδο MC πραγματοποιήθηκαν 10 000 δοκιμές, και αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο ίση με 1%. Τα αποτελέσματα αβεβαιότητας για πτώση πίεσης και συντελεστή τριβής φαίνονται στα Σχήματα 4.5 και 4.6, ενώ στα Σχήματα 4.7 και 4.8 δίνονται τα αποτελέσματα των αβεβαιοτήτων για την παροχή και συντελεστή τριβής. Η αβεβαιότητα του συντελεστή τριβής συμπεριλαμβάνεται παντού, ώστε να παρατηρηθεί η επίδραση του στην πτώση πίεσης και στην παροχή.



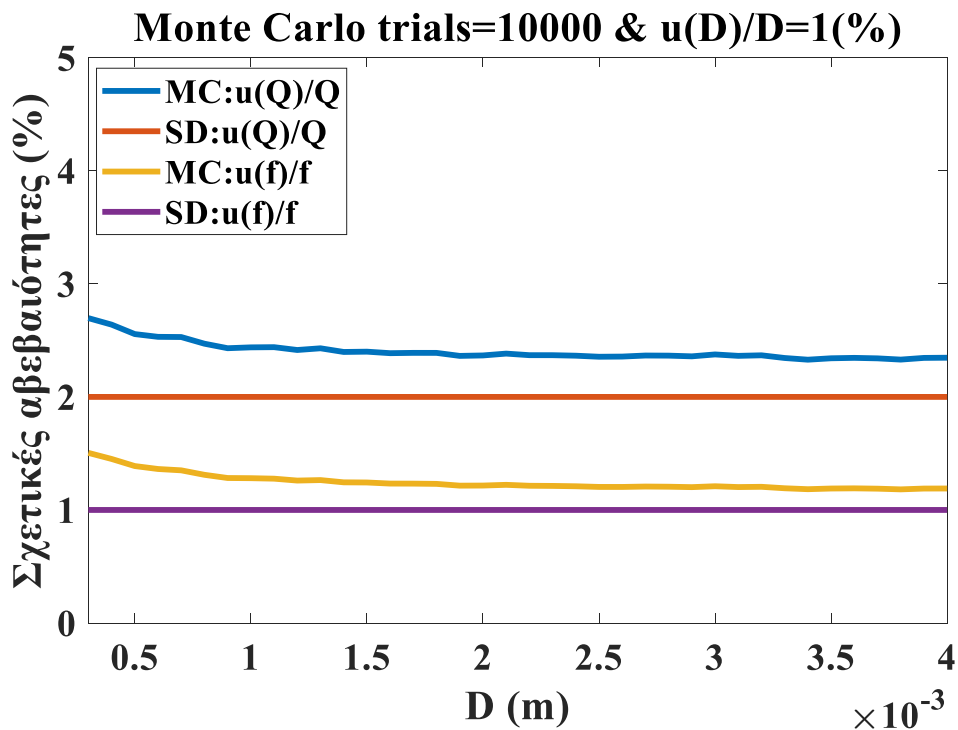
Σχήμα 4.5. Αβεβαιότητα πτώσης πίεσης και συντελεστή τριβής με τις μεθόδους MC (10 000 δοκιμές) και SD για στρωτή ροή με αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της παροχής.



Σχήμα 4.6. Αβεβαιότητα πτώσης πίεσης και συντελεστή τριβής με τις μεθόδους MC (10 000 δοκιμές) και SD για στρωτή ροή με αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της διαμέτρου.



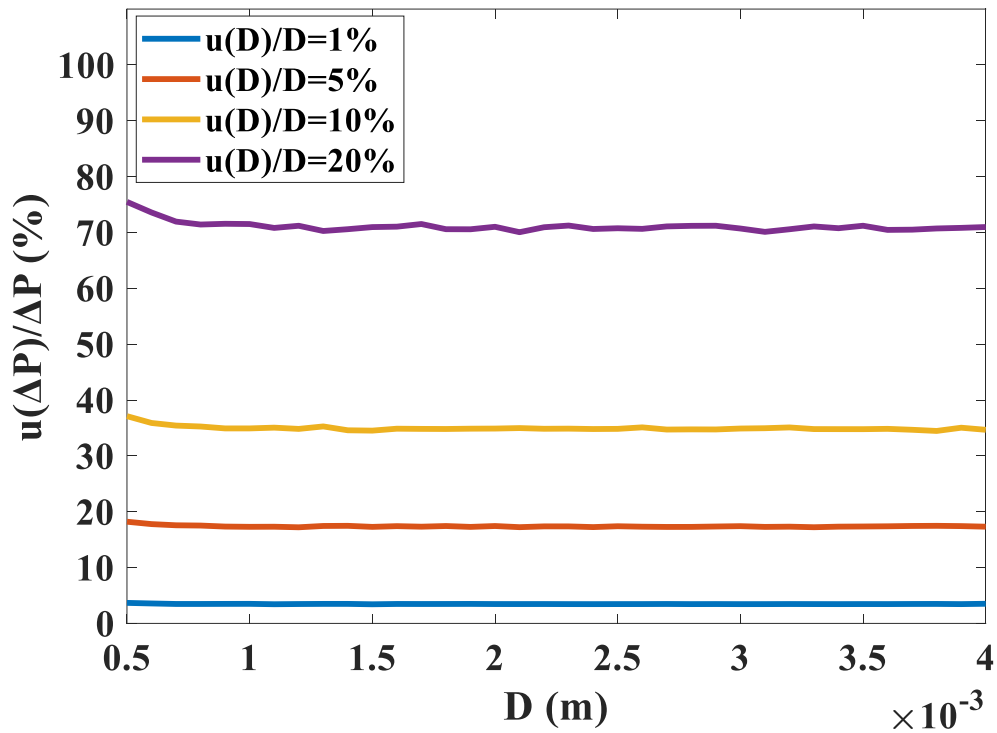
Σχήμα 4.7. Αβεβαιότητες παροχής και συντελεστή τριβής με τις μεθόδους MC (10 000 δοκιμές) και SD για στρωτή ροή με αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της πτώσης πίεσης.



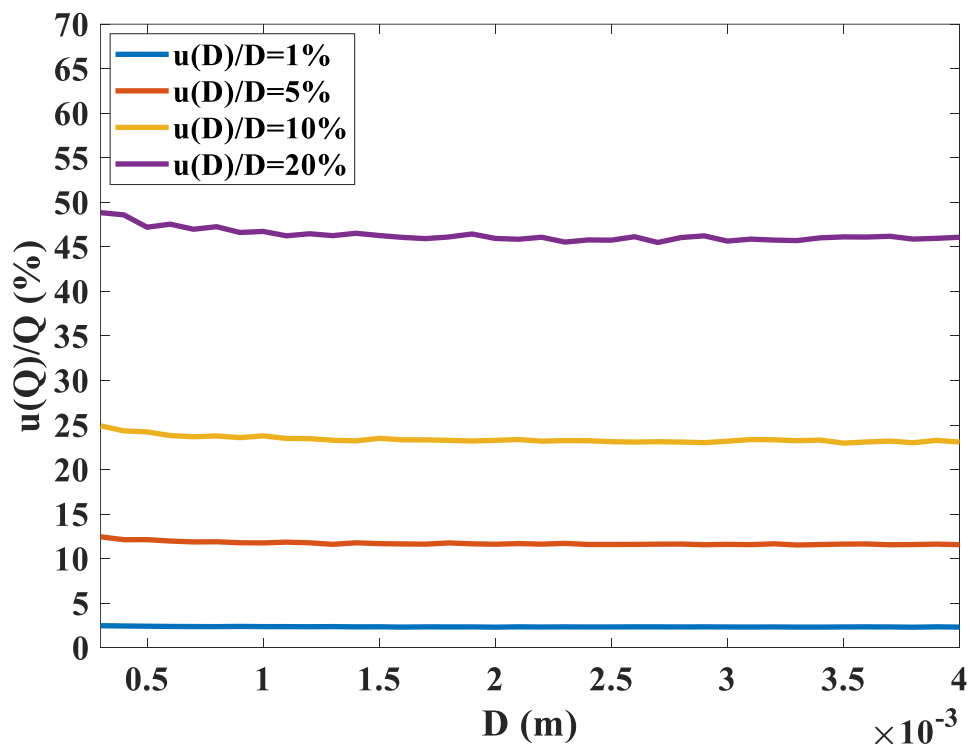
Σχήμα 4.8. Αβεβαιότητες παροχής και συντελεστή τριβής με τις μεθόδους MC (10 000 δοκιμές) και SD για στρωτή ροή με αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της διαμέτρου.

Από τα Σχήματα 4.5 και 4.6 παρατηρείται πως η αβεβαιότητα πτώσης πίεσης λαμβάνει τιμές από 3,5 έως και 4,5% με τις αβεβαιότητες να αυξάνονται όσο αυξάνεται η παροχή και να μειώνονται όσο αυξάνεται η διάμετρος. Επίσης, όσο αυξάνεται η διάμετρος η αβεβαιότητα πτώσης πίεσης τείνει να μειώνεται και πιο συγκεκριμένα φαίνεται να διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο ο όρος συμπίεστότητας (Εξ. (3.35)) σε μικρές διαμέτρους και ο όρος ασυμπίεστότητας σε μεγαλύτερες διαμέτρους (Εξ. (3.36)). Η αβεβαιότητα της παροχής, τώρα παρατηρώντας τα Σχήματα 4.7 και 4.8 λαμβάνει τιμές 2,4 έως 3,2%. Παρατηρείται μείωση των τιμών σε αύξηση της πτώσης πίεσης και της διαμέτρου, ενώ αρχικά επικρατεί ο όρος ασυμπίεστότητας (Εξ. (3.41)), μετά την αύξηση της πτώση πίεσης και της διαμέτρου επικρατεί ο όρος συμπίεστότητας (Εξ. (3.40)). Η αβεβαιότητα του συντελεστή τριβής παραμένει πρακτικά σταθερή και κοντά στην τιμή του 1%. Η ροή είναι στρωτή και αν παρατηρηθεί η Εξ. (3.12) μπορεί να γίνει κατανοητό πως η εξάρτηση του συντελεστή τριβής από τη διάμετρο είναι γραμμική. Η μέθοδος MC δίνει ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές αβεβαιότητας από την SD και αυτό διότι τείνει να υπερεκτιμά ελάχιστα τις αβεβαιότητες εξόδου.

Η εξαγωγή της συμπεριφοράς των αβεβαιοτήτων πτώσης πίεσης και παροχής για μεγαλύτερες τιμές αβεβαιότητας εισόδου στη διάμετρο του αγωγού κρίνεται αναγκαία. Για αυτό, πραγματοποιήθηκε ανάλυση για αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο ίση με 1%, 5%, 10% και 20%



Σχήμα 4.9. Αβεβαιότητα πτώσης πίεσης με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) σε στρωτή ροή με αύξηση της διαμέτρου και αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο 1,5,10 και 20%.



Σχήμα 4.10. Αβεβαιότητα παροχής με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) σε στρωτή ροή με αύξηση της διαμέτρου και αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο 1,5,10 και 20%.

Από τα Σχήματα 4.9 και 4.10, διαφαίνεται πως με αύξηση της αβεβαιότητας εισόδου στη διάμετρο αυξάνονται οι τιμές των αβεβαιοτήτων πτώσης πίεσης και

παροχής. Ειδικότερα, παρατηρείται πως όσο αυξάνει η αβεβαιότητα εισόδου τόσο αυξάνει και αβεβαιότητα στην έξοδο.

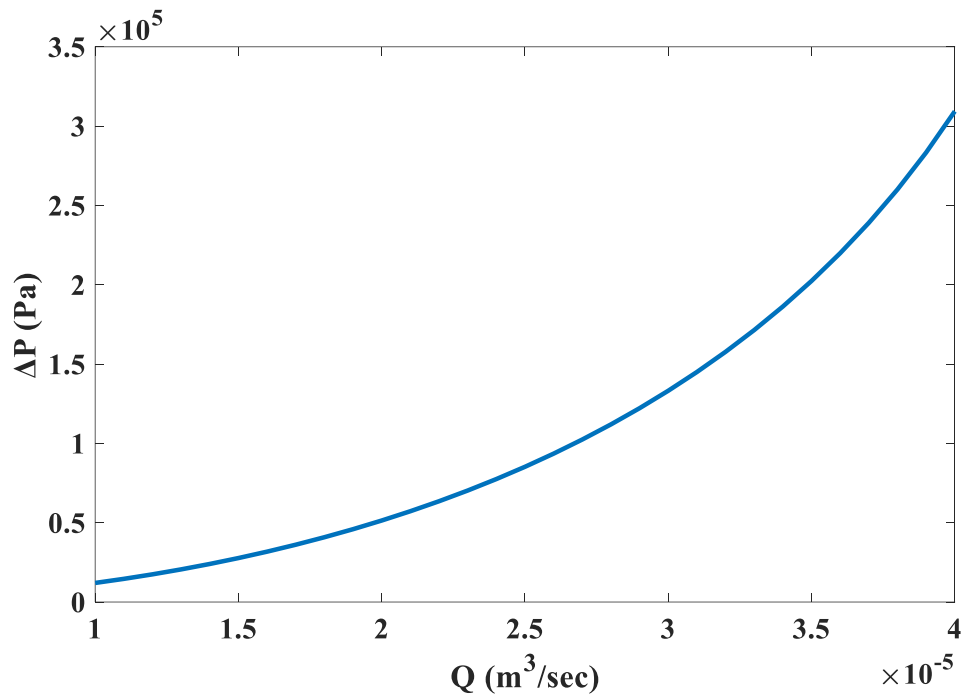
4.2.2 Τυρβώδης Ροή

Για την τυρβώδη ροή χρησιμοποιήθηκε η Εξ. (3.43)

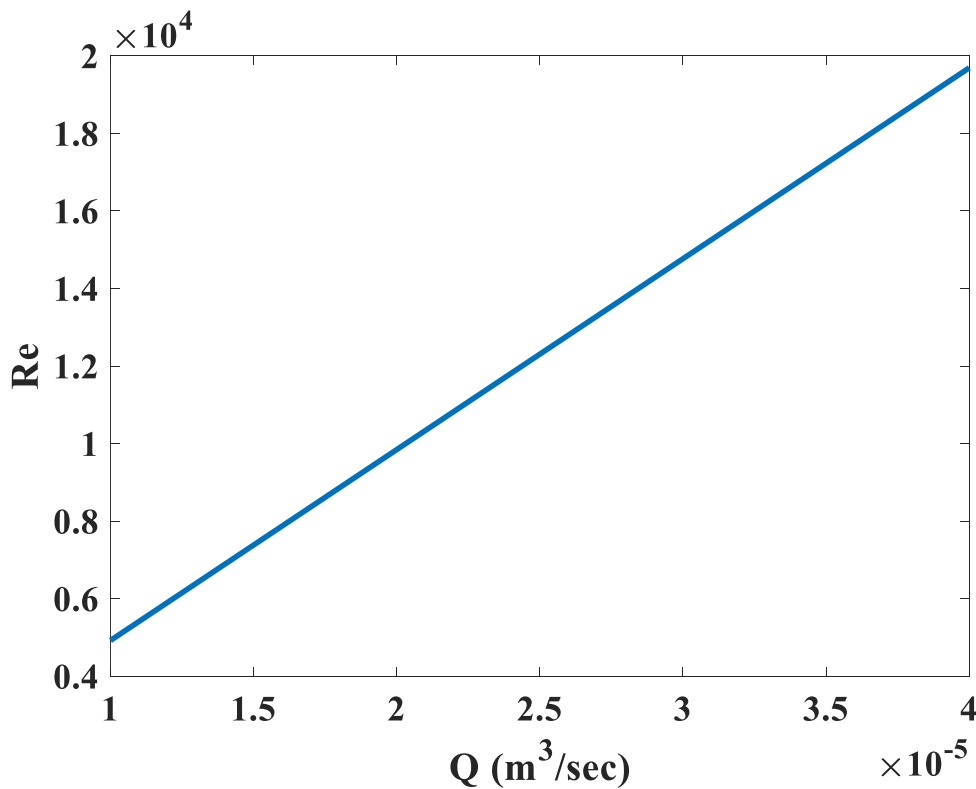
$$\Delta P = \frac{16\rho_m Q^2}{\pi^2 D^4} \ln \left(\frac{P_0 + \frac{\Delta P}{2}}{P_0 - \frac{\Delta P}{2}} \right) + \frac{80\rho_m f Q^2}{\pi^2 D^4}$$

Πίνακας 4.2. Ονομαστικές τιμές για το σύστημα ενός αγωγού σε συνθήκες τυρβώδους ροής.

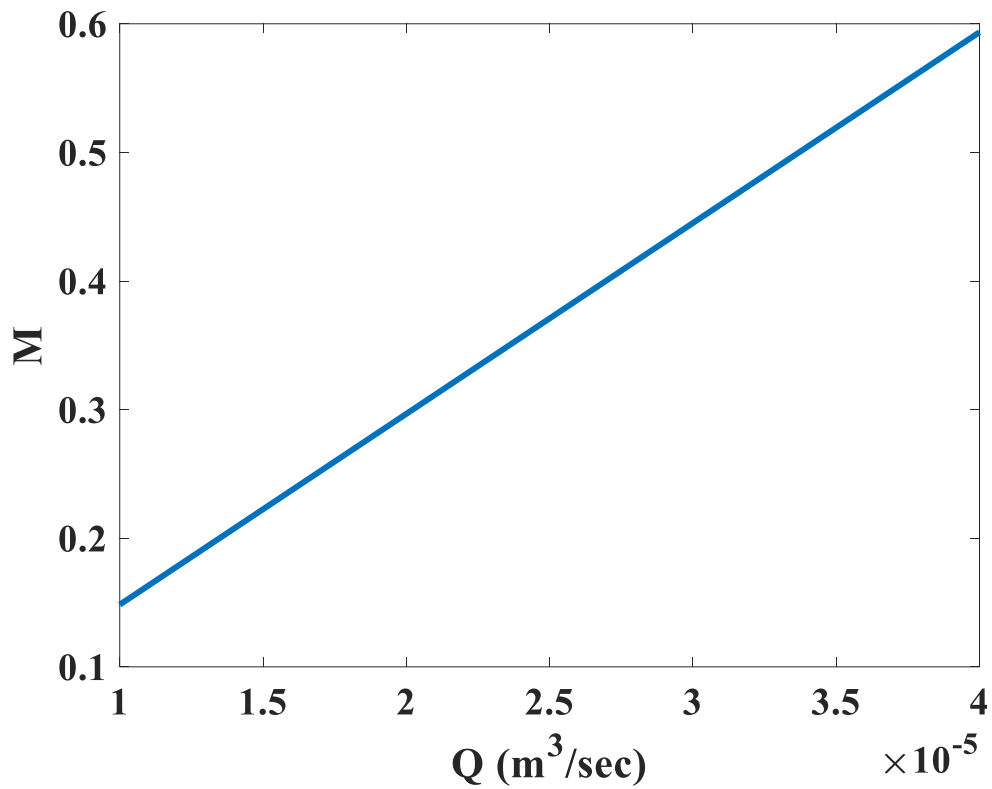
Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα σε SI
Θερμοκρασία αέρα	T	100	°C
Ιξώδες αέρα	μ	2.17E-05	Pa*sec
Ταχύτητα διάδοσης του ήχου	α	343.3	m/sec
Σταθερά ιδανικών αερίων για αέρα	R	287.05	J/kg-K
Διάμετρος αγωγού	D	0.05	m
Τραχύτητα αγωγού	e	0.00015	m
Μέση πίεση	P_0	37 500	Pa



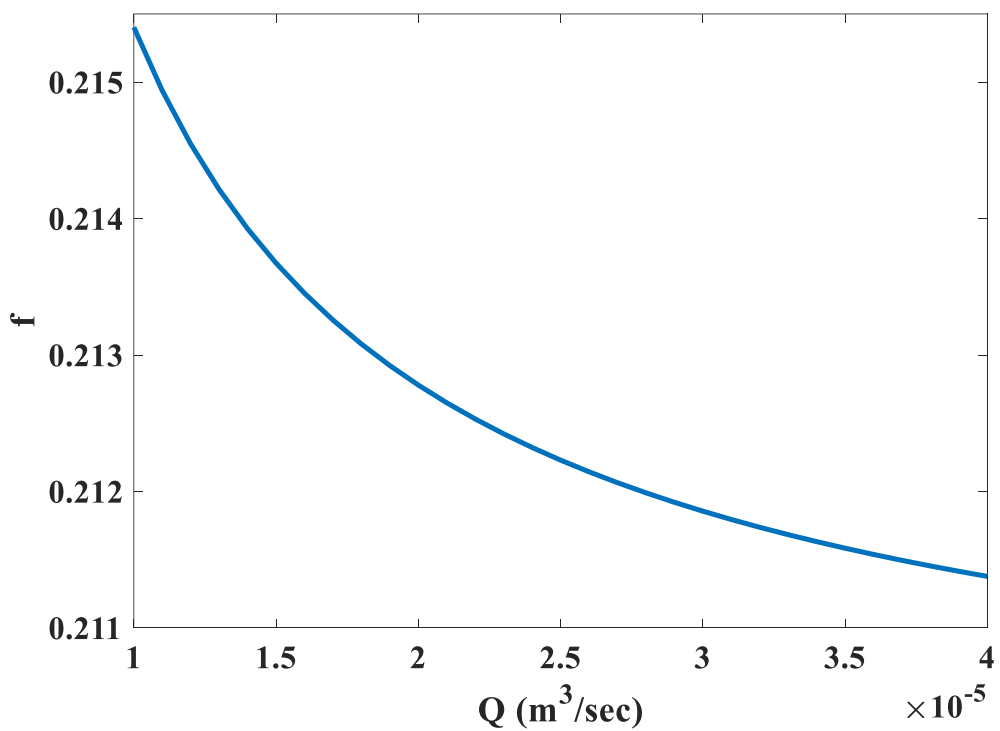
Σχήμα 4.11. Μεταβολή πτώσης πίεσης με αύξηση της παροχής σε τυρβώδη ροή.



Σχήμα 4.12. Μεταβολή αριθμού Re με αύξηση της παροχής σε τυρβώδη ροή.



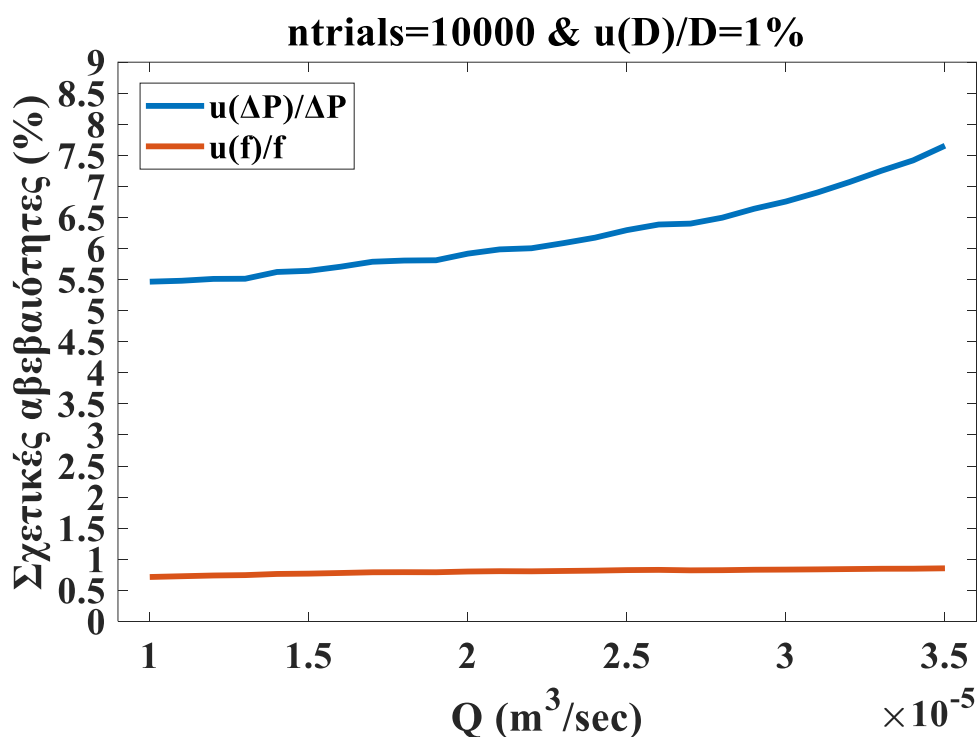
Σχήμα 4.13. Μεταβολή του αριθμού Ma με αύξηση της παροχής σε τυρβώδη ροή.



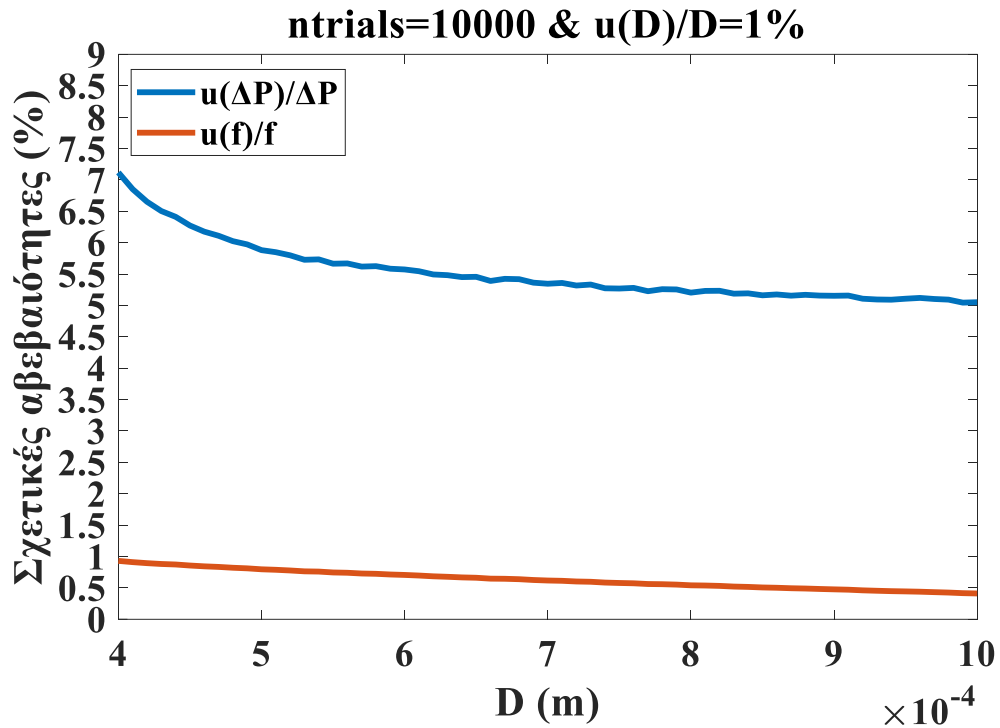
Σχήμα 4.14. Μεταβολή του συντελεστή τριβής με αύξηση της παροχής σε τυρβώδη ροή.

Παρατηρείται εκθετική αύξηση της πτώσης πίεσης (Σχήμα 4.11) και εκθετική μείωση του συντελεστή τριβής (Σχήμα 4.14), ενώ οι αριθμοί Re (Σχήμα 4.12) και Ma (Σχήμα 4.13) αυξάνονται γραμμικά. Με παρατήρηση των εξισώσεων της Ενότητας 3.1.3 εξηγείται η μεταβολή των παραπάνω ποσοτήτων σε αύξηση της παροχής.

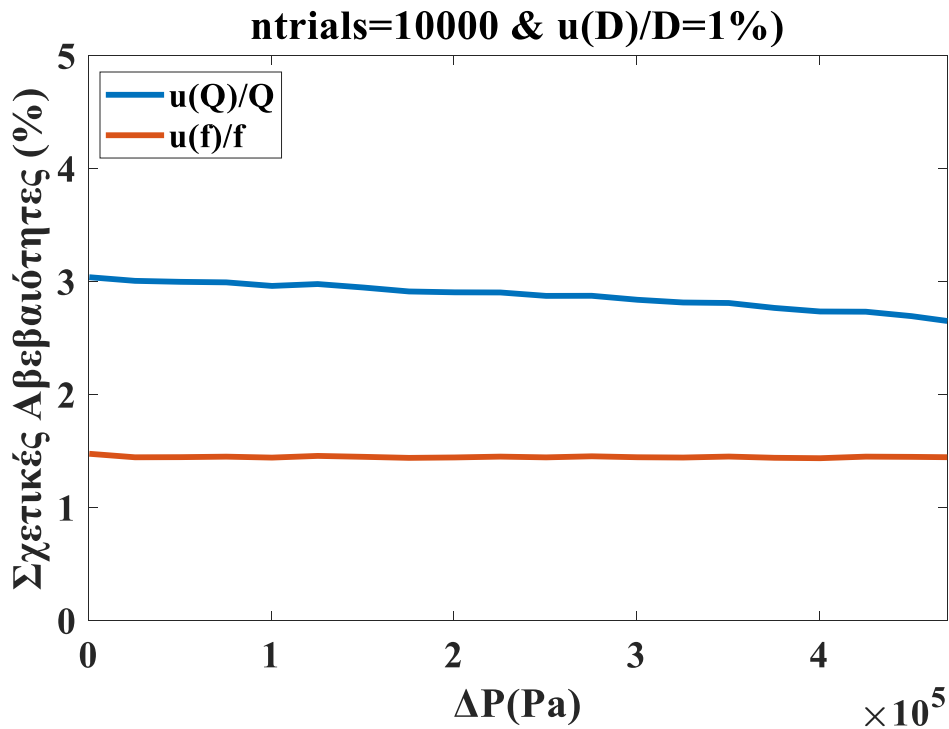
Μετά την επίλυση του προβλήματος τυρβώδους ροής σε ένα αγωγό υλοποιείται ανάλυση αβεβαιότητας με τη χρήση των μεθόδων SD και MC. Για τη μέθοδο SD η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στην Παράγραφο 3.3.2.1. Για τη μέθοδο MC πραγματοποιήθηκαν 10 000 δοκιμές, και αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο ίση με 1%. Τα αποτελέσματα αβεβαιότητας για πτώση πίεσης φαίνονται στα Σχήματα 4.15 και 4.16, ενώ στα Σχήματα 4.17 και 4.18 δίνονται τα αποτελέσματα των αβεβαιοτήτων για την παροχή. Η αβεβαιότητα του συντελεστή τριβής με τη μέθοδο SD δε συμπεριλαμβάνεται στην ανάλυση της τυρβώδους ροής, καθώς η Εξ. (3.11) απαιτεί αριθμητική παραγωγή. Έτσι, τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν παρακάτω αφορούν μόνο τη μέθοδο MC.



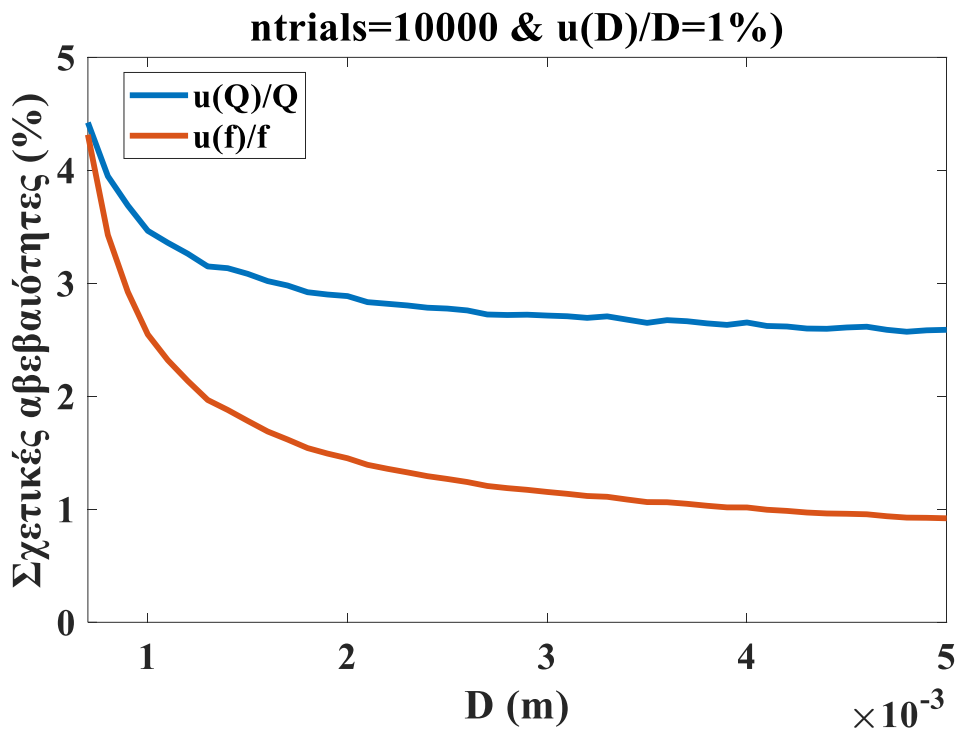
Σχήμα 4.15. Αβεβαιότητα πτώσης πίεσης με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) για τυρβώδη ροή με αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της παροχής.



Σχήμα 4.16. Αβεβαιότητα πτώσης πίεσης με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) για τυρβώδη ρή με αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της διαμέτρου.



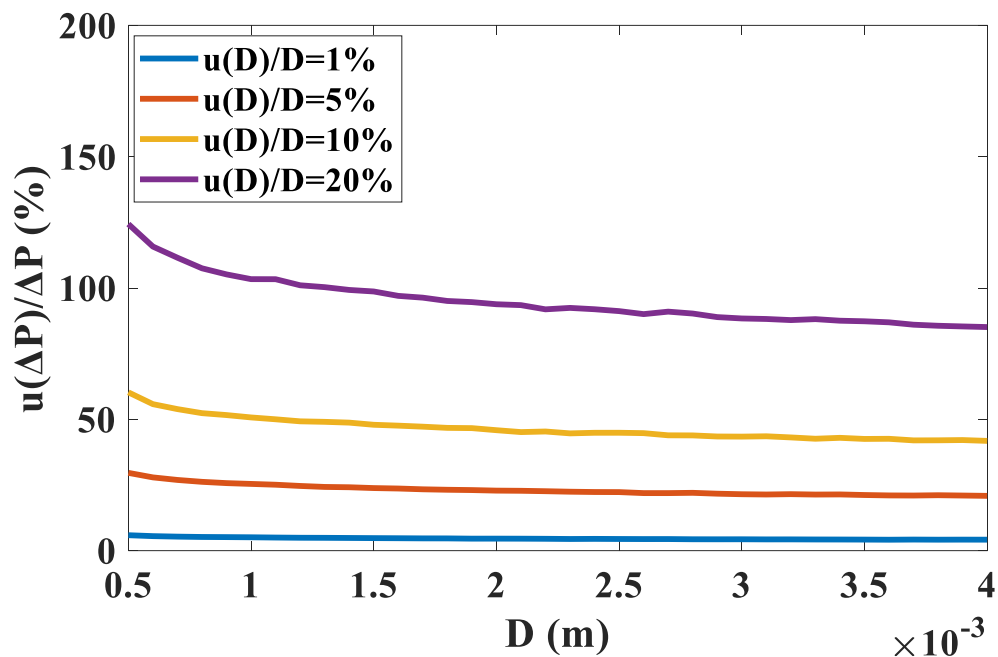
Σχήμα 4.17. Αβεβαιότητα παροχής με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) για τυρβώδη ρή με αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της πτώσης πίεσης.



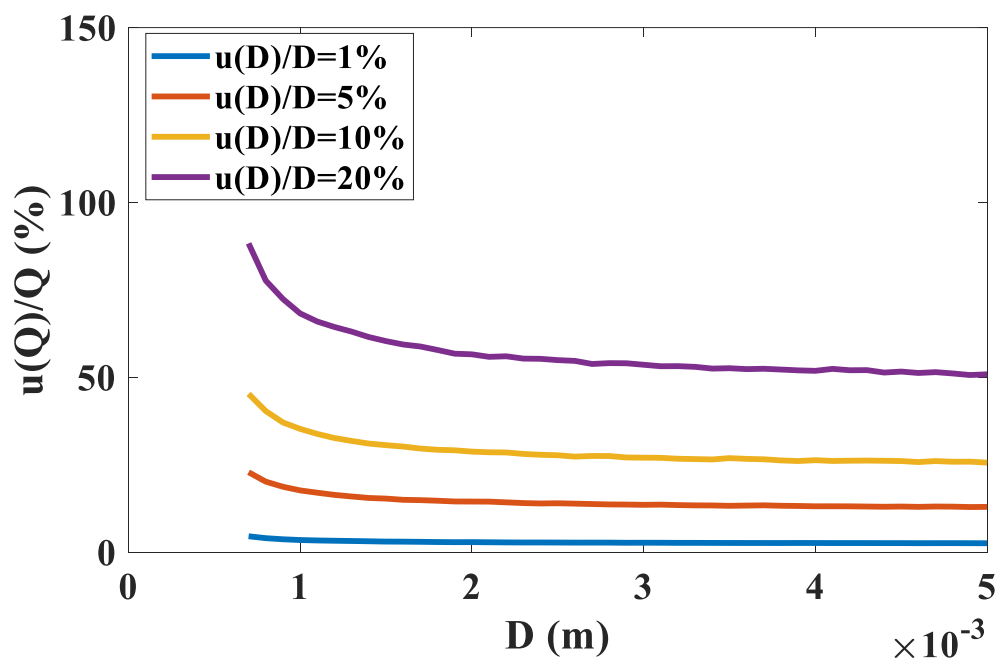
Σχήμα 4.18. Αβεβαιότητα παροχής με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) για τυρβώδη ροή με αβεβαιότητα εισόδου 1% στη διάμετρο και αύξηση στην ονομαστική τιμή της διαμέτρου.

Από τα Σχήματα 4.15 και 4.16 παρατηρείται πως η αβεβαιότητα πτώσης πίεσης λαμβάνει τιμές από 5,5 έως και 7,5% με τις αβεβαιότητες να αυξάνονται όσο αυξάνεται η παροχή και να μειώνονται όσο αυξάνεται η διάμετρος. Η αβεβαιότητα της παροχής, τώρα παρατηρώντας τα Σχήματα 4.17 και 4.18 λαμβάνει τιμές 2,5 έως 4,5%. Παρατηρείται μείωση των τιμών σε αύξηση της πτώσης πίεσης και της διαμέτρου. Η αβεβαιότητα του συντελεστή είναι σε γενικές γραμμές μικρή αν εξαιρεθεί η το Σχήμα 4.18, όπου φαίνεται πως για μικρές τιμές της διαμέτρου η αβεβαιότητα του συντελεστή τριβής είναι κοντά στο 4,2%.

Η εξαγωγή της συμπεριφοράς των αβεβαιοτήτων πτώσης πίεσης και παροχής για μεγαλύτερες τιμές αβεβαιότητας εισόδου στη διάμετρο του αγωγού κρίνεται αναγκαία. Για αυτό, πραγματοποιήθηκε ανάλυση για αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο ίση με 1%, 5%, 10% και 20%



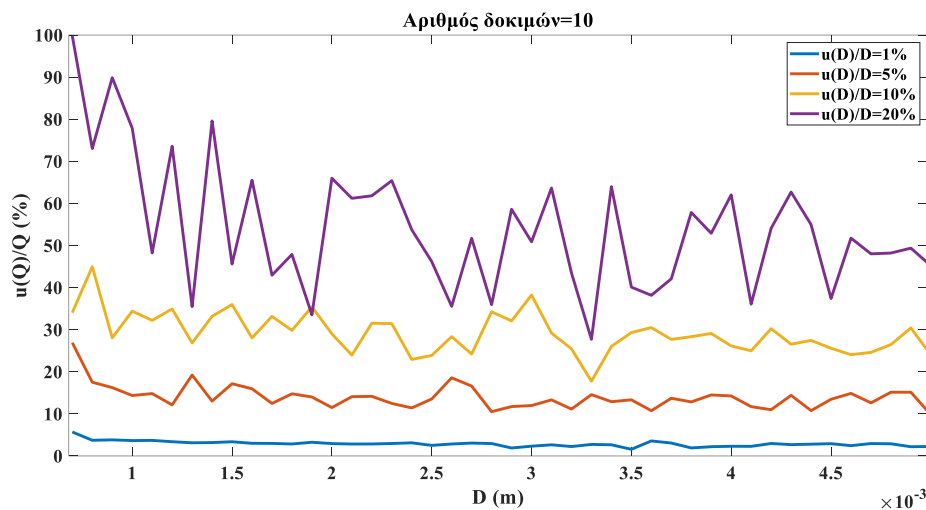
Σχήμα 4.19. Αβεβαιότητα πτώσης πίεσης με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) σε τυρβώδη ροή με αύξηση της διαμέτρου και αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο 1%,5%,10% και 20%.



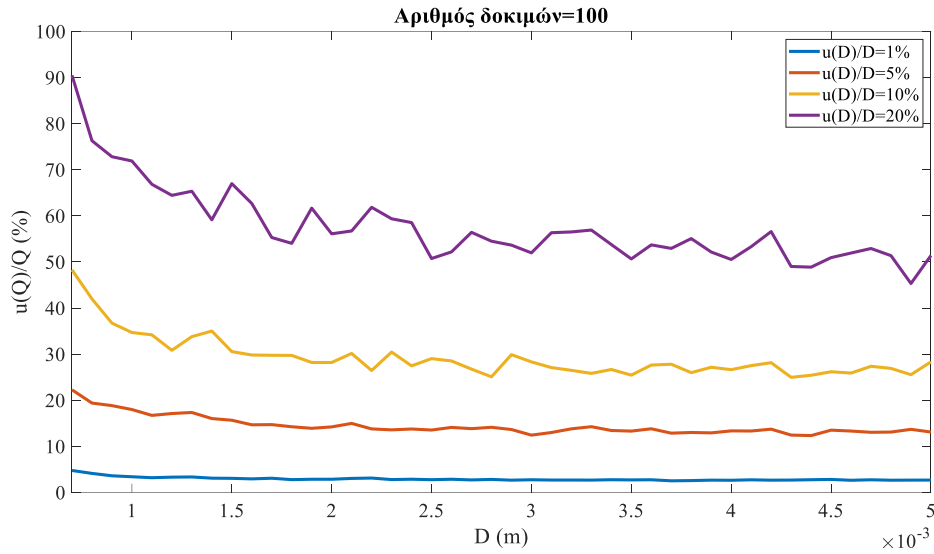
Σχήμα 4.20. Αβεβαιότητα παροχής με τη μέθοδο MC (10 000 δοκιμές) σε τυρβώδη ροή με αύξηση της διαμέτρου και αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο 1%,5%,10% και 20%.

Από τα Σχήματα 4.19 και 4.20, διαφαίνεται πως με αύξηση της αβεβαιότητας εισόδου στη διάμετρο αυξάνονται οι τιμές των αβεβαιοτήτων πτώσης πίεσης και παροχής. Ειδικότερα, παρατηρείται πως όσο αυξάνει η αβεβαιότητα εισόδου τόσο αυξάνει και αβεβαιότητα στην έξοδο με τη σχέση μεταξύ τους να είναι γραμμική.

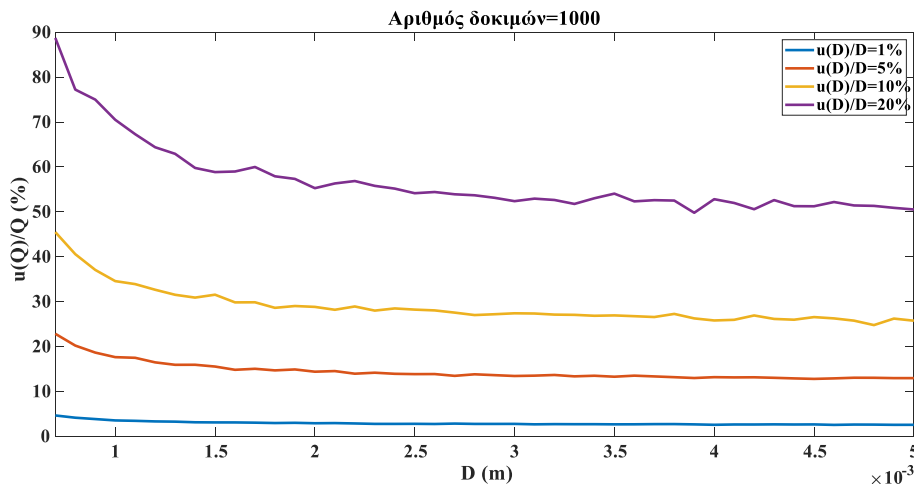
Η μέθοδος MC είναι στοχαστική μέθοδος η οποία βασίζεται σε μεγάλο αριθμό δοκιμών. Η ακρίβειά της έγκειται στον αριθμό των δοκιμών αυτών, δηλαδή όσο μεγαλύτερος είναι, τόσο πιο ακριβή θα είναι τα αποτελέσματα των αβεβαιοτήτων εξόδου με μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος. Στα Σχήματα 4.21, 4.22, 2.23 και 4.24 φαίνεται η εξομάλυνση των τιμών των αβεβαιοτήτων εξόδου και τη χρήση της μεθόδου MC με τιμές δοκιμών 10, 100, 1 000 και 10 000 αντίστοιχα. Το γεγονός ότι επιλέχθηκε η αβεβαιότητα παροχής είναι αυθαίρετο.



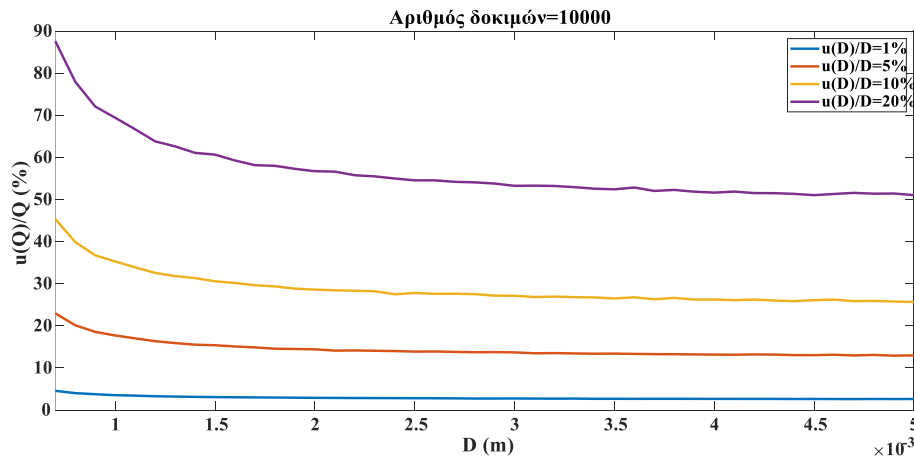
Σχήμα 4.21. Αβεβαιότητα παροχής σε τυρβώδη ροή για αυξανόμενη ονομαστική τιμή και αβεβαιότητα της διαμέτρου με τη μέθοδο MC σε 10 δοκιμές.



Σχήμα 4.22. Αβεβαιότητα παροχής σε τυρβώδη ροή για αυξανόμενη ονομαστική τιμή και αβεβαιότητα της διαμέτρου με τη μέθοδο MC σε 100 δοκιμές.



Σχήμα 4.23. Αβεβαιότητα παροχής σε τυρβώδη ροή για αυξανόμενη ονομαστική τιμή και αβεβαιότητα της διαμέτρου με τη μέθοδο MC σε 1 000 δοκιμές.



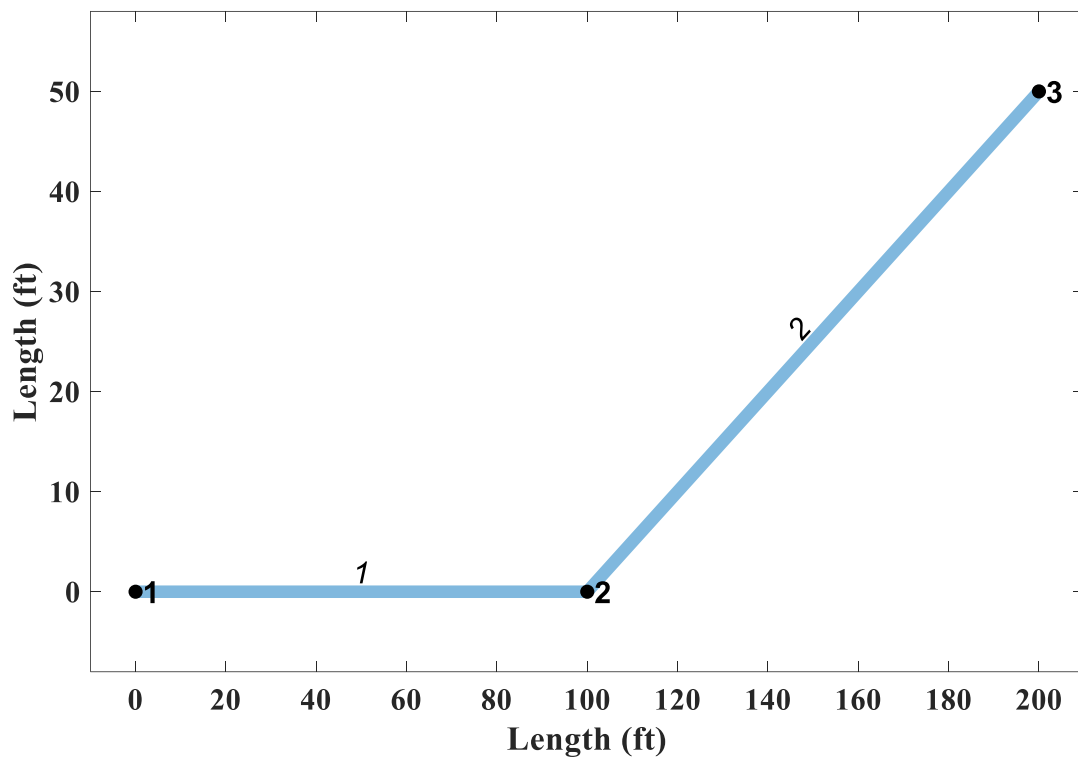
Σχήμα 4.24. . Αβεβαιότητα παροχής σε τυρβώδη ροή για αυξανόμενη ονομαστική τιμή και αβεβαιότητα της διαμέτρου με τη μέθοδο MC σε 10 000 δοκιμές.

4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης αβεβαιότητας σε δίκτυα σωληνώσεων

Όπως έχει προαναφερθεί, υπάρχον κώδικας PNcompdes, υπολογίζει παροχή σε κάθε αγωγό και πίεση σε κάθε κόμβο. Έτσι δημιουργήθηκε ένα ξεχωριστό κομμάτι κώδικα το οποίο υπολογίζει τις σχετικές αβεβαιότητες των ποσοτήτων αυτών, εισάγοντας αβεβαιότητα στη διάμετρο, στο μήκος, στην τραχύτητα και στους συντελεστές δευτερευουσών απωλειών των αγωγών, καθώς και στις πιέσεις των δεξαμενών. Οι αβεβαιότητες υπολογίζονται με τη μέθοδο Monte Carlo, μία μέθοδος που απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό δοκιμών. Στα προβλήματα που θα παρουσιαστούν παρακάτω ο αριθμός των δοκιμών (trials) είναι 1 000. Επιλέχθηκε ο αριθμός αυτός διότι σε μεγαλύτερες τιμές αυξάνεται κατά πολύ το υπολογιστικό φορτίο. Αναφορικά με τις τέσσερις εφαρμογές που θα ακολουθήσουν, επιλέχθηκε σταδιακή αύξηση της πολυπλοκότητας των δικτύων από εφαρμογή σε εφαρμογή, ώστε να παρατηρηθεί η συμπεριφορά των αβεβαιοτήτων, όσο το δίκτυο γίνεται πολυπλοκότερο.

4.3.1 Εφαρμογή 1

Για αρχή επιλέχθηκε ένα δίκτυο 3 κόμβων και 2 αγωγών με δεξαμενές στους κόμβους 1 και 3 και πιέσεις 50 000 και 25 000 [Pa] αντίστοιχα. Εσωτερικά κινείται αέρας ως ιδανικό αέριο σε 100°C. Η ζήτηση στους κόμβους του δικτύου είναι μηδενική και το δίκτυο δεν έχει αντλία ή συμπιεστή. Στους Πίνακες 4.3 και 4.4 δίνονται τα δεδομένα αλλά και οι ονομαστικές τιμές που προκύπτουν από την επίλυση του προβλήματος για κάθε αγωγό και κόμβο αντίστοιχα. Από τον Πίνακα 4.3 παρατηρούμε πως η παροχή στους δύο αγωγούς είναι ίση, πως η ροή είναι τυρβώδης σε όλο το μήκος του δικτύου και πως από τον αγωγό 1 προς τον αγωγό 2 η ροή γίνεται από συμπιεστή σε ασυμπιεστή. Στο Σχήμα 4.25 δίνεται η γεωμετρία του δικτύου.



Σχήμα 4.25. Γεωμετρία δικτύου Εφαρμογής 1.

Πίνακας 4.3. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε αγωγό για την Εφαρμογή 1.

Pipe	1	2
Length [m]	2.420	0.302
Diameter [m]	0.244	0.031
Flowrate [kg/sec]	3.00E-04	3.00E-04
Velocity [m/sec]	1.980	168.900
Densityabs [kg/m³]	0.467	0.350
Q [m³/sec]	0.001	0.001
Loss [Pa]	17.030	24940.000
f	0.115	0.406
Re	3.33E+05	2.67E+06
M	0.006	0.491

Πίνακας 4.4. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε κόμβο για την Εφαρμογή 1.

Node	1	2	3
Demand [kg/sec]	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Pressure [Pa]	5.00E+04	5.00E+04	2.50E+04
Density [kg/m³]	4.67E-01	4.67E-01	2.34E-01

Στους Πίνακες 4.5 και 4.6 δίνονται οι αβεβαιότητες παροχής σε κάθε αγωγό και πίεσης σε κάθε κόμβο για 1% αβεβαιότητα εισόδου σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα.

Πίνακας 4.5. Τιμές αβεβαιότητας παροχής σε κάθε αγωγό για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 1.

Pipe	1	2
u(D)/D	2.473	2.473
u(tank_Pr)/tank_Pr	1.113	1.113
u(ML)/ML	0.531	0.531
u(L)/L	0	0
u(e)/e	0	0

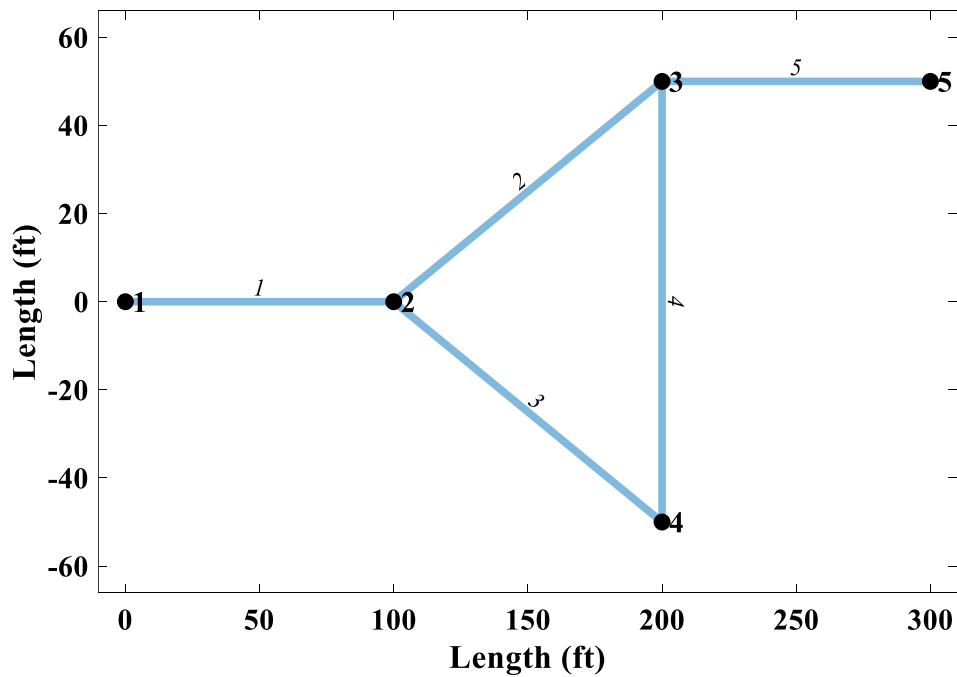
Πίνακας 4.6. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης σε κάθε κόμβο για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 1.

Node	u(D)/D	u(tank_Pr)/tank_Pr	u(ML)/ML	u(L)/L	u(e)/e
1	0	1	0	0	0
2	0.00048	1.154	0.00027	0.00029	0.0001
3	0	1	0	0	0

Από τον Πίνακα 4.6 παρατηρείται πως μεγαλύτερη επίδραση επιφέρει η διάμετρος των αγωγών και η πιέσεις στις δεξαμενές. Η επίδραση των συντελεστών δευτερευουσών απωλειών είναι περίπου ίση με τη μισή της αβεβαιότητας εισόδου, ενώ το μήκος και η τραχύτητα δε φαίνεται να επιδρούν στην αβεβαιότητα της παροχής. Στον Πίνακα 4.7, φαίνεται πως οι αβεβαιότητες στους κόμβους των δυο δεξαμενών (κόμβοι 1 και 3) είναι μηδενική και πως η επίδραση όλων των μεταβλητών εισόδου είναι πολύ μικρή στις πιέσεις. Μόνο όταν επιβάλλεται αβεβαιότητα στις πιέσεις των δεξαμενών παρατηρείται αβεβαιότητα εξόδου περίπου ίση με αυτή της εισόδου.

4.3.2 Εφαρμογή 2

Για την εφαρμογή αυτή επιλέχθηκε ένα δίκτυο 5 κόμβων και 5 αγωγών με δεξαμενές στους κόμβους 1 και 5 και πιέσεις 50 000 και 25 000 [Pa] αντίστοιχα. Εσωτερικά κινείται αέρας ως ιδανικό αέριο σε 100°C. Η ζήτηση στους κόμβους του δικτύου είναι μηδενική και το δίκτυο δεν έχει αντλία ή συμπιεστή. Στους Πίνακες 4.7 και 4.8 δίνονται τα δεδομένα αλλά και οι ονομαστικές τιμές που προκύπτουν από την επίλυση του προβλήματος για κάθε αγωγό και κόμβο αντίστοιχα. Από τον Πίνακα 4.7 παρατηρούμε πως η ροή είναι τυρβώδης σε όλο το μήκος του δικτύου και πως η ροή είναι συμπιεστή μόνο στον αγωγό 2. Στο Σχήμα 4.26 δίνεται η γεωμετρία του δικτύου.



Σχήμα 4.26. Γεωμετρία δικτύου Εφαρμογής 2.

Πίνακας 4.7. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε αγωγό για την Εφαρμογή 2.

Pipe	1	2	3	4	5
Length [m]	2.450	0.368	2.450	0.368	2.450
Diameter [m]	0.244	0.037	0.244	0.037	0.244
Flowrate [kg/sec]	5.70E-04	4.30E-04	1.39E-04	-1.39E-04	5.70E-04
Velocity[m/sec]	3.766	168.300	0.922	-54.480	7.500
Densityabs[kg/m³]	0.466	0.350	0.466	0.350	0.234
Loss [P]	57.540	24790.000	4.340	24790.000	107.900
f	0.103	0.335	0.140	0.343	0.094
Re	6.34E+05	3.19E+06	1.55E+05	1.03E+06	6.34E+05
M	0.011	0.489	0.003	0.158	0.022
Q[m³/sec]	1.22E-03	1.23E-03	2.99E-04	-3.98E-04	2.43E-03

Πίνακας 4.8. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε κόμβο για την Εφαρμογή 2.

Node	1	2	3	4	5
Demand[kg/sec]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pressure[Pa]	49987	49930	25136	49925	25028
Density[kg/m³]	0.467	0.466	0.235	0.466	0.234

Στους Πίνακες 4.9 και 4.10 δίνονται οι αβεβαιότητες παροχής σε κάθε αγωγό και πίεσης σε κάθε κόμβο για 1% αβεβαιότητα εισόδου σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα.

Πίνακας 4.9. Τιμές αβεβαιότητας παροχής σε κάθε αγωγό για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 2.

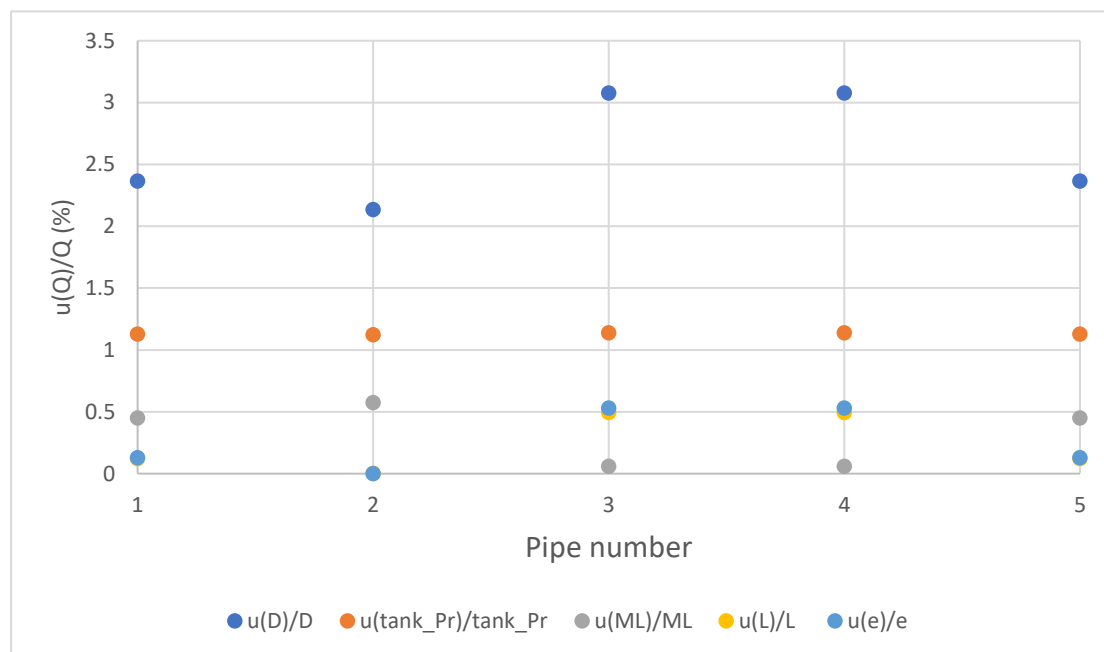
Pipe	u(D)/D	u(tank_Pr)/tank_Pr	u(ML)/ML	u(L)/L	u(e)/e
1	2.366	1.128	0.449	0.122	0.13
2	2.135	1.124	0.575	0.002	0
3	3.078	1.139	0.06	0.493	0.531
4	3.078	1.139	0.06	0.493	0.531
5	2.366	1.128	0.449	0.122	0.13

Πίνακας 4.10. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης σε κάθε κόμβο για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 2.

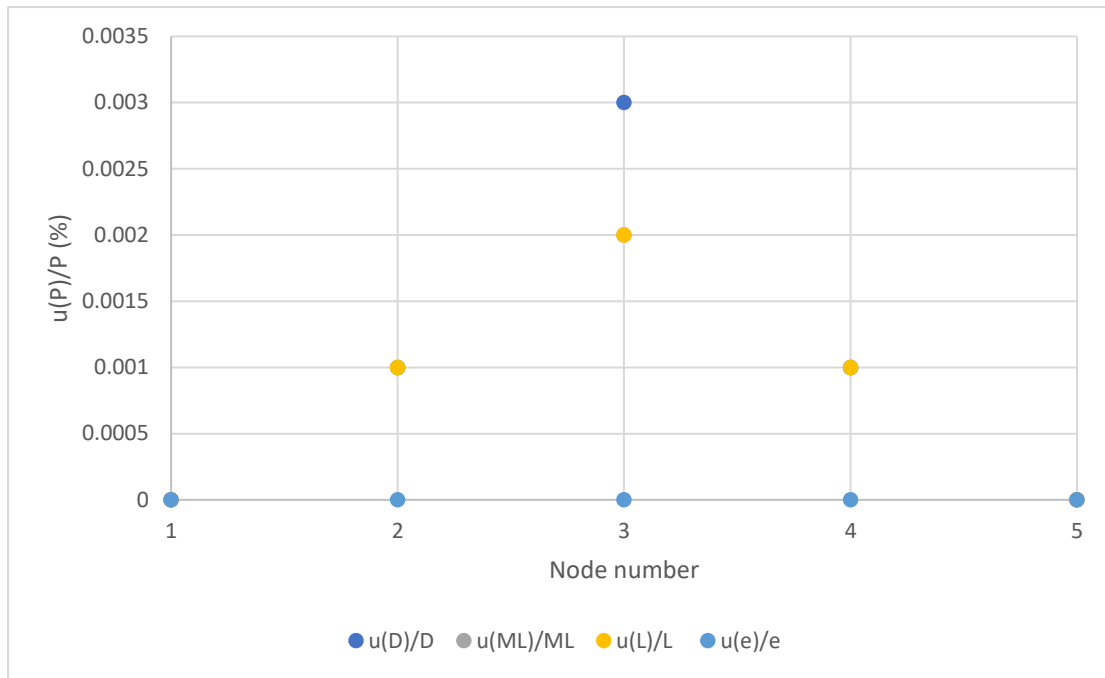
Node	u(D)/D	u(tank_Pr)/tank_Pr	u(ML)/ML	u(L)/L	u(e)/e
1	0	1	0	0	0
2	0.001	1.124	0.001	0.001	0
3	0.003	1.123	0.002	0.002	0
4	0.001	1.124	0.001	0.001	0
5	0	1	0	0	0

Από τον Πίνακα 4.9 παρατηρείται πως μεγαλύτερη επίδραση επιφέρει η διάμετρος των αγωγών και η πιέσεις στις δεξαμενές. Η επίδραση των συντελεστών δευτερευουσών απωλειών είναι περίπου ίση με τη μισή της αβεβαιότητας εισόδου, ενώ το μήκος και η τραχύτητα φαίνεται να επιδρούν λιγότερο στην αβεβαιότητα της παροχής. Στον Πίνακα 4.10, φαίνεται πως οι αβεβαιότητες στους κόμβους των δυο δεξαμενών (κόμβοι 1 και 3) είναι μηδενική και πως η επίδραση όλων των μεταβλητών εισόδου είναι πολύ μικρή στις πιέσεις. Μόνο όταν επιβάλλεται αβεβαιότητα στις πιέσεις των δεξαμενών παρατηρείται αβεβαιότητα εξόδου περίπου ίση με αυτή της εισόδου.

Οι τιμές των Πινάκων 4.9 και 4.10 απεικονίζονται και σχηματικά στα Σχήματα 4.27 και 4.28.



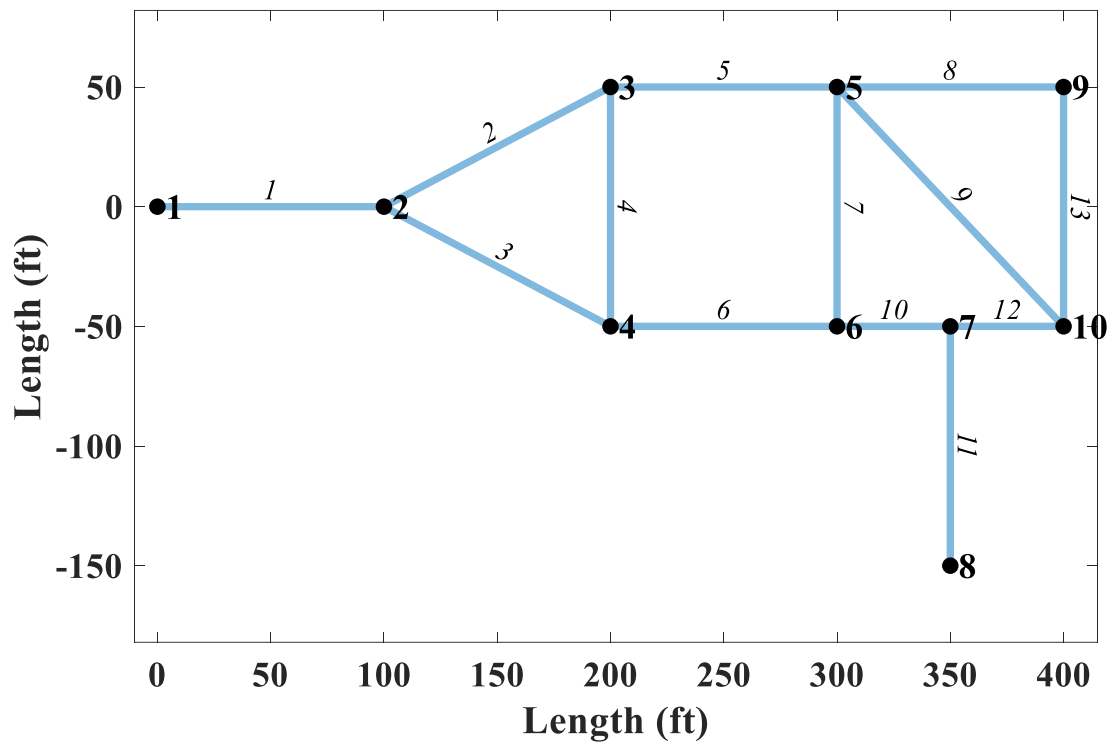
Σχήμα 4.27. Τιμές αβεβαιότητας παροχής σε κάθε αγωγό για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 2.



Σχήμα 4.28. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης σε κάθε κόμβο για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 2.

4.3.3 Εφαρμογή 3

Το δίκτυο της εφαρμογής αυτής αποτελείται από 10 κόμβους και 13 αγωγούς με δεξαμενές στους κόμβους 1 και 8 και πιέσεις 50 000 και 25 000 [Pa] αντίστοιχα. Εσωτερικά κινείται αέρας ως ιδανικό αέριο σε 100°C. Η ζήτηση στους κόμβους του δικτύου είναι μηδενική και το δίκτυο δεν έχει αντλία ή συμπιεστή. Στους Πίνακες 4.11.1, 4.11.2 και 4.12 δίνονται τα δεδομένα αλλά και οι ονομαστικές τιμές που προκύπτουν από την επίλυση του προβλήματος για κάθε αγωγό και κόμβο αντίστοιχα. Από τον Πίνακα 4.11.2 παρατηρούμε πως η ροή είναι τυρβώδης και ασυμπίεστη σε όλο το μήκος του δικτύου. Στο Σχήμα 4.29 δίνεται η γεωμετρία του δικτύου.



Σχήμα 4.29. Γεωμετρία δικτύου Εφαρμογής 3.

Πίνακας 4.11.1. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε αγωγό για την Εφαρμογή 3.

Pipe	L [m]	D [m]	m [kg/sec]	u [m/sec]	ρ [kg/m ³]
1	2.440	0.243	2.59E-04	1.718	0.467
2	0.366	0.037	1.58E-04	47.720	0.455
3	2.440	0.243	1.01E-04	0.672	0.467
4	0.366	0.037	-5.07E-05	-15.320	0.455
5	2.440	0.243	2.08E-04	1.457	0.442
6	0.366	0.037	5.08E-05	15.360	0.454
7	2.440	0.243	7.89E-05	0.551	0.442
8	2.440	0.243	5.09E-05	0.356	0.442
9	2.440	0.243	7.87E-05	0.550	0.442
10	0.366	0.037	1.30E-04	52.690	0.338
11	2.440	0.243	2.59E-04	3.429	0.234
12	0.366	0.037	-1.30E-04	-52.690	0.338
13	2.440	0.243	5.09E-05	0.356	0.442

Πίνακας 4.11.2. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε αγωγό για την Εφαρμογή 3.

Pipe	Loss(Pa)	f	Re	M	Q [m ³ /sec]
1	13.230	0.118	2.89E+05	0.005	5.56E-04
2	2586.000	0.342	1.17E+06	0.139	3.47E-04
3	2.521	0.157	1.13E+05	0.002	2.17E-04
4	2583.000	0.361	3.77E+05	0.045	-1.11E-04
5	9.385	0.125	2.32E+05	0.004	4.71E-04
6	2594.000	0.361	3.77E+05	0.045	1.12E-04
7	1.747	0.175	8.79E+04	0.002	1.78E-04
8	0.871	0.218	5.67E+04	0.001	1.15E-04
9	1.743	0.175	8.78E+04	0.002	1.78E-04
10	22320.000	0.344	9.63E+05	0.153	3.83E-04
11	26.400	0.118	2.89E+05	0.010	1.11E-03
12	22320.000	0.344	9.63E+05	0.153	-3.83E-04
13	0.871	0.218	5.67E+04	0.001	1.15E-04

Πίνακας 4.12. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε κόμβο για την Εφαρμογή 2.

Node	Demand[kg/sec]	Pressure[Pa]	Density[kg/m ³]
1	0	49987	0.467
2	0	49974	0.467
3	0	47388	0.442
4	0	49971	0.467
5	0	47379	0.442
6	0	47377	0.442
7	0	25054	0.234
8	0	25028	0.234
9	0	47378	0.442
10	0	47377	0.442

Στους Πίνακες 4.13 και 4.14 δίνονται οι αβεβαιότητες παροχής σε κάθε αγωγό και πίεσης σε κάθε κόμβο για 1% αβεβαιότητα εισόδου σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα.

Πίνακας 4.13. Τιμές αβεβαιότητας παροχής σε κάθε αγωγό για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 3.

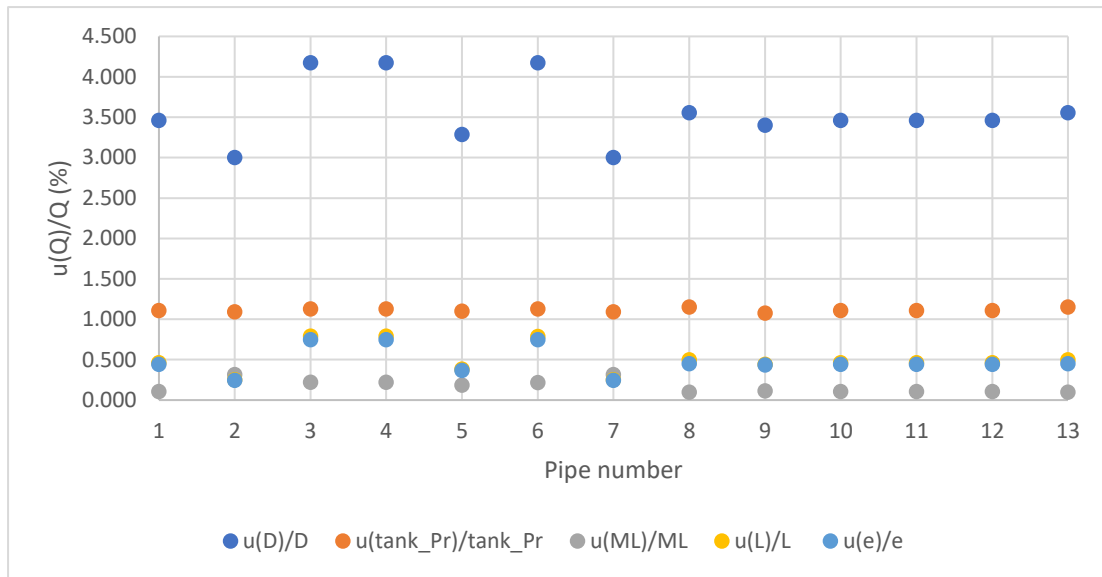
Pipe	$u(D)/D$	$u(\text{tank_Pr})/\text{tank_Pr}$	$u(ML)/ML$	$u(L)/L$	$u(e)/e$
1	3.460	1.106	0.106	0.463	0.441
2	3.001	1.091	0.315	0.254	0.245
3	4.174	1.129	0.219	0.789	0.746
4	4.175	1.129	0.220	0.790	0.746
5	3.287	1.101	0.185	0.384	0.367
6	4.172	1.129	0.218	0.788	0.746
7	3.001	1.092	0.315	0.254	0.245
8	3.554	1.151	0.096	0.496	0.449
9	3.400	1.077	0.112	0.442	0.436
10	3.460	1.106	0.106	0.463	0.441
11	3.460	1.106	0.106	0.463	0.441
12	3.460	1.106	0.106	0.463	0.441
13	3.554	1.151	0.096	0.496	0.449

Πίνακας 4.14. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης σε κάθε κόμβο για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 3.

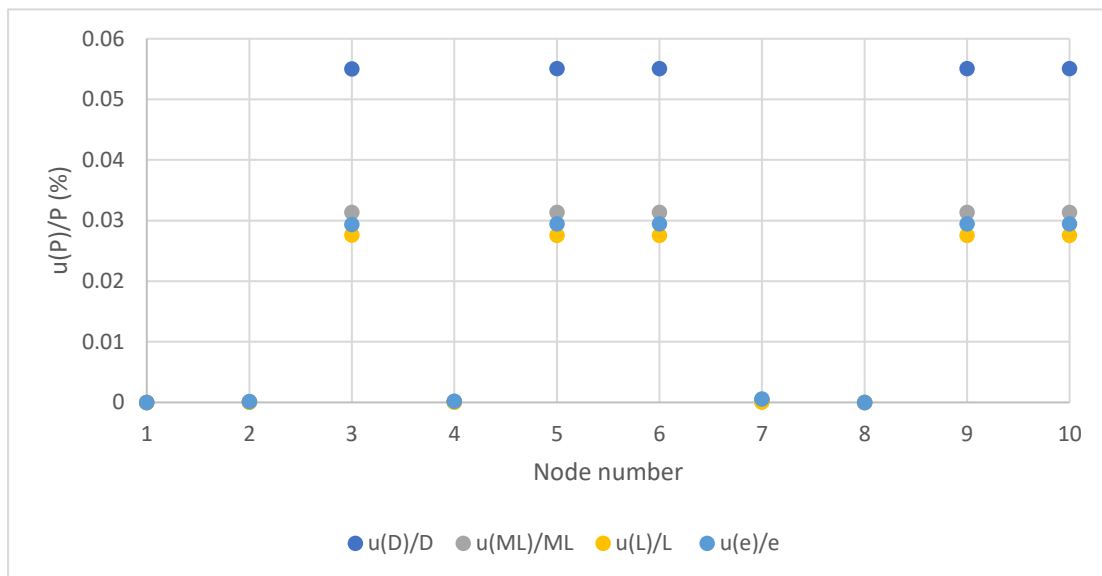
Node	$u(D)/D$	$u(\text{tank_Pr})/\text{tank_Pr}$	$u(ML)/ML$	$u(L)/L$	$u(e)/e$
1	0	1	0	0	0
2	0.0001	1.1859	0.0000	0.0000	0.0002
3	0.0550	1.1858	0.0313	0.0276	0.0293
4	0.0002	1.1859	0.0001	0.0000	0.0002
5	0.0551	1.1858	0.0314	0.0276	0.0294
6	0.0551	1.1858	0.0313	0.0275	0.0294
7	0.0004	1.1857	0.0001	0.0000	0.0006
8	0	1	0	0	0
9	0.0551	1.1858	0.0314	0.0276	0.0294
10	0.0551	1.1858	0.0314	0.0276	0.0295

Από τον Πίνακα 4.13 παρατηρείται πως μεγαλύτερη επίδραση επιφέρει η διάμετρος των αγωγών και η πιέσεις στις δεξαμενές. Η επίδραση των συντελεστών δευτερευουσών απωλειών είναι μικρότερη από ότι στα προηγούμενα δίκτυα, ενώ το μήκος και η τραχύτητα φαίνεται να επιδρούν περισσότερο σε αυτό το δίκτυο. Στον Πίνακα 4.14, φαίνεται πως οι αβεβαιότητες στους κόμβους των δυο δεξαμενών (κόμβοι 1 και 8) είναι μηδενική και πως η επίδραση όλων των μεταβλητών εισόδου είναι πολύ μικρή στις πιέσεις. Μόνο όταν επιβάλλεται αβεβαιότητα στις πιέσεις των δεξαμενών παρατηρείται αβεβαιότητα εξόδου περίπου ίση με αυτή της εισόδου.

Οι τιμές των Πινάκων 4.13 και 4.14 απεικονίζονται και σχηματικά στα Σχήματα 4.30 και 4.31.



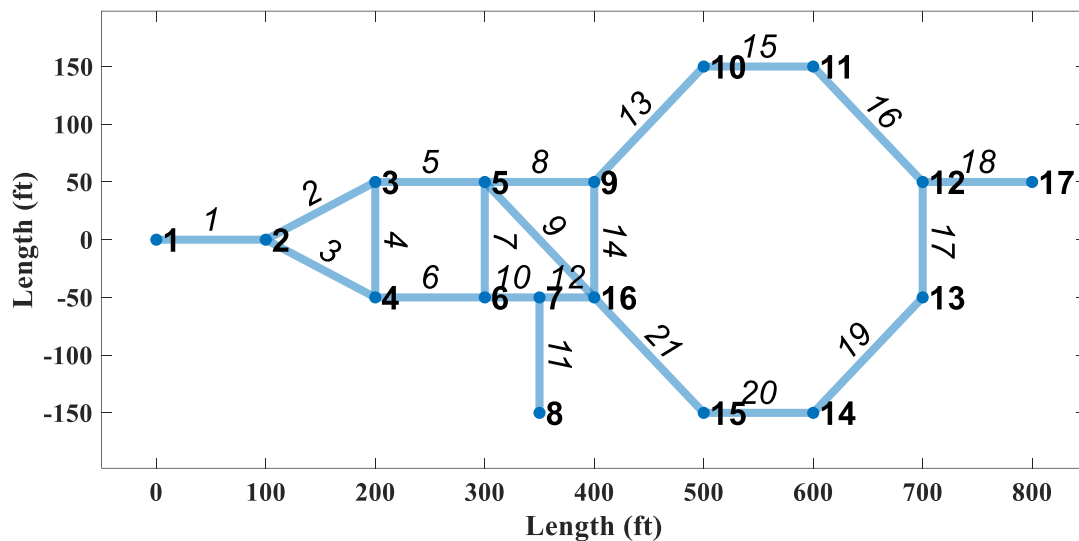
Σχήμα 4.30. Τιμές αβεβαιότητας παροχής σε κάθε αγωγό για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 3.



Σχήμα 4.31. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης σε κάθε κόμβο για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 3.

4.3.4 Εφαρμογή 4

Το δίκτυο της τελευταίας εφαρμογής αποτελείται από 17 κόμβους και 21 αγωγούς με δεξαμενές στους κόμβους 1, 8 και 17 και πιέσεις 50 000, 25 000 και 37 500 [Pa] αντίστοιχα. Εσωτερικά κινείται αέρας ως ιδανικό αέριο σε 100°C. Η ζήτηση στους κόμβους του δικτύου είναι μηδενική και το δίκτυο δεν έχει αντλία ή συμπιεστή. Στους Πίνακες 4.15.1, 4.15.2 και 4.16 δίνονται τα δεδομένα αλλά και οι ονομαστικές τιμές που προκύπτουν από την επίλυση του προβλήματος για κάθε αγωγό και κόμβο αντίστοιχα. Από τον Πίνακα 4.15.2 παρατηρούμε πως η ροή είναι τυρβώδης και ασυμπίεστη σε όλο το μήκος του δικτύου. Στο Σχήμα 4.32 δίνεται η γεωμετρία του δικτύου.



Σχήμα 4.32. Γεωμετρία δικτύου Εφαρμογής 3.

Πίνακας 4.15.1. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε αγωγό για την Εφαρμογή 4.

Pipe	L [m]	D [m]	m [kg/sec]	u [m/sec]	ρ [kg/m ³]
1	2.440	0.243	4.03E-04	2.618	0.479
2	0.366	0.036	2.44E-04	71.890	0.469
3	2.440	0.243	1.59E-04	0.998	0.495
4	0.366	0.036	-7.93E-05	-23.160	0.474
5	2.440	0.243	3.23E-04	2.207	0.456
6	0.366	0.036	7.95E-05	23.190	0.474
7	2.440	0.243	4.17E-05	0.285	0.456
8	0.366	0.036	3.79E-05	11.190	0.469
9	2.440	0.243	2.43E-04	1.619	0.468
10	0.366	0.036	1.21E-04	47.090	0.356
11	2.440	0.243	2.44E-04	3.056	0.249
12	0.366	0.036	-1.23E-04	-46.270	0.368
13	2.440	0.243	7.58E-05	0.480	0.492
14	0.366	0.036	-3.79E-05	-11.100	0.473
15	2.440	0.243	7.58E-05	0.446	0.529
16	0.366	0.036	7.58E-05	19.320	0.543
17	2.440	0.243	-8.24E-05	-0.490	0.523
18	0.366	0.036	1.58E-04	49.120	0.446
19	2.440	0.243	-8.24E-05	-0.519	0.494
20	0.366	0.036	-8.24E-05	-23.150	0.492
21	2.440	0.243	-8.24E-05	-0.525	0.489

Πίνακας 4.15.2. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε αγωγό για την Εφαρμογή 4.

Pipe	Loss [Pa]	f	R	M	Q [m ³ /sec]
1	29.800	0.109	4.50E+05	0.008	8.41E-04
2	6055.000	0.339	1.82E+06	0.209	5.20E-04
3	5.246	0.135	1.78E+05	0.003	3.21E-04
4	6049.000	0.352	5.91E+05	0.067	-1.67E-04
5	20.720	0.113	3.61E+05	0.006	7.09E-04
6	6071.000	0.352	5.93E+05	0.067	1.68E-04
7	0.637	0.244	4.67E+04	0.001	9.15E-05
8	1457.000	0.371	2.83E+05	0.033	8.09E-05
9	11.960	0.120	2.72E+05	0.005	5.20E-04
10	18830.000	0.346	9.04E+05	0.137	3.40E-04
11	22.890	0.120	2.73E+05	0.009	9.82E-04
12	18820.000	0.345	9.18E+05	0.134	-3.34E-04
13	1.504	0.178	8.48E+04	0.001	1.54E-04
14	1445.000	0.371	2.83E+05	0.032	-8.02E-05
15	1.398	0.178	8.48E+04	0.001	1.43E-04
16	4813.000	0.353	5.65E+05	0.056	1.40E-04
17	1.618	0.171	9.21E+04	0.001	-1.57E-04
18	25340.000	0.343	1.18E+06	0.143	3.55E-04
19	1.716	0.171	9.21E+04	0.002	-1.67E-04
20	6256.000	0.351	6.14E+05	0.067	-1.67E-04
21	1.734	0.171	9.21E+04	0.002	-1.69E-04

Πίνακας 4.16. Δεδομένα και ονομαστικές τιμές για κάθε κόμβο για την Εφαρμογή 3.

Node	Demand[kg/sec]	Pressure[Pa]	Density[kg/m ³]
1	0	49987	0.467
2	0	52529.6	0.490
3	0	47930	0.448
4	0	53552.7	0.500
5	0	49676.8	0.464
6	0	48028	0.448
7	0	28271.9	0.264
8	0	25028	0.234
9	0	50687.2	0.473
10	0	54659	0.510
11	0	58630.8	0.547
12	0	57644.5	0.538
13	0	54468.7	0.509
14	0	51292.9	0.479
15	0	54153.5	0.506
16	0	50573.5	0.472
17	0	37783.3	0.353

Στους Πίνακες 4.17 και 4.18 δίνονται οι αβεβαιότητες παροχής σε κάθε αγωγό και πίεσης σε κάθε κόμβο για 1% αβεβαιότητα εισόδου σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα.

Πίνακας 4.17. Τιμές αβεβαιότητας παροχής σε κάθε αγωγό για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 4.

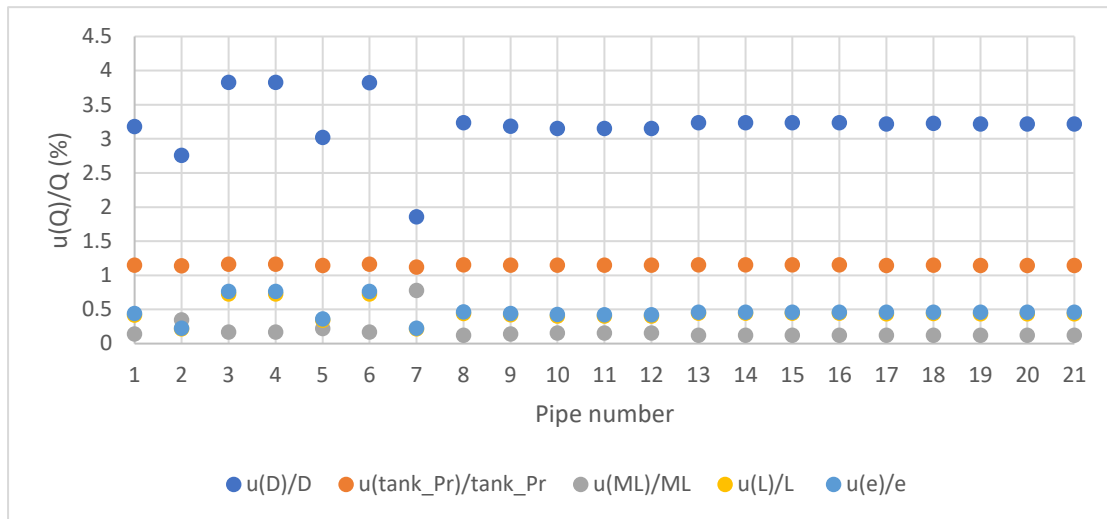
Pipe	$u(D)/D$	$u(\text{tank_Pr})/\text{tank_Pr}$	$u(\text{ML})/\text{ML}$	$u(L)/L$	$u(e)/e$
1	3.181	1.149	0.143	0.419	0.439
2	2.758	1.139	0.347	0.216	0.226
3	3.826	1.165	0.168	0.729	0.763
4	3.827	1.165	0.169	0.729	0.763
5	3.022	1.145	0.22	0.342	0.359
6	3.825	1.164	0.168	0.728	0.763
7	1.857	1.121	0.778	0.216	0.224
8	3.236	1.153	0.123	0.443	0.464
9	3.187	1.149	0.14	0.422	0.442
10	3.152	1.15	0.156	0.405	0.425
11	3.151	1.149	0.156	0.404	0.424
12	3.15	1.149	0.155	0.404	0.423
13	3.235	1.153	0.123	0.444	0.462
14	3.235	1.153	0.123	0.444	0.461
15	3.235	1.153	0.123	0.444	0.462
16	3.235	1.153	0.123	0.444	0.462
17	3.22	1.146	0.124	0.438	0.461
18	3.227	1.149	0.124	0.441	0.462
19	3.22	1.146	0.124	0.438	0.461
20	3.22	1.146	0.124	0.438	0.461
21	3.22	1.146	0.124	0.438	0.461

Πίνακας 4.18. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης σε κάθε κόμβο για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 3.

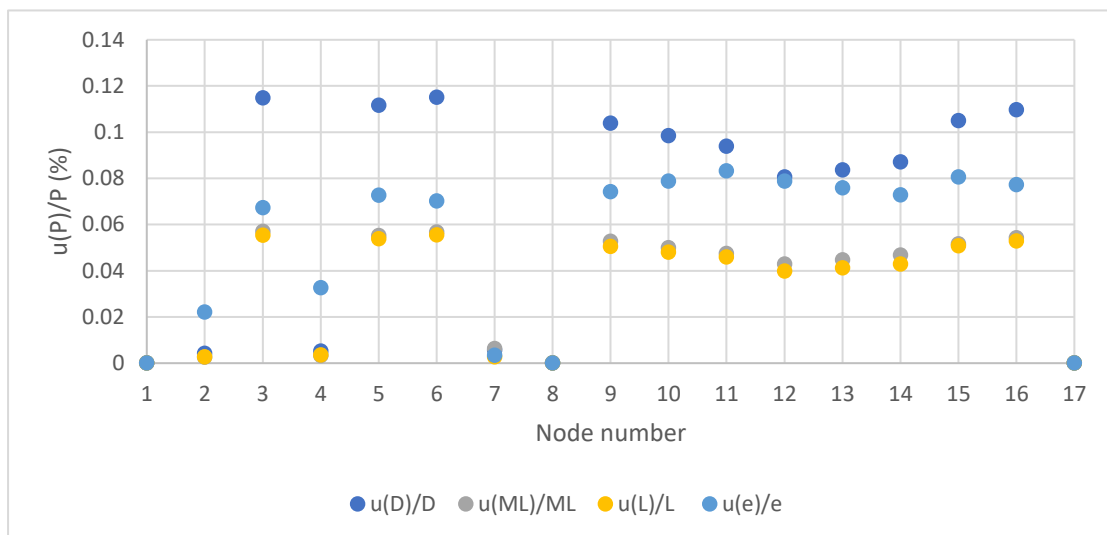
Nodes	$u(D)/D$	$u(\text{tank_Pr})/\text{tank_Pr}$	$u(ML)/ML$	$u(L)/L$	$u(e)/e$
1	0	1	0	0	0
2	0.0042	1.13279	0.0026	0.00268	0.02215
3	0.11479	1.13129	0.05702	0.05534	0.06721
4	0.00521	1.13178	0.0033	0.00356	0.03255
5	0.11165	1.13021	0.05519	0.05385	0.07265
6	0.11507	1.13087	0.05676	0.05546	0.07016
7	0.00563	1.13482	0.00626	0.00263	0.00337
8	0	1	0	0	0
9	0.10384	1.13135	0.05274	0.0505	0.07421
10	0.09848	1.13051	0.04989	0.04802	0.07871
11	0.09385	1.12982	0.04743	0.0459	0.08322
12	0.08051	1.13114	0.04294	0.03978	0.07883
13	0.08363	1.13156	0.04471	0.04121	0.07589
14	0.08714	1.13205	0.04671	0.04283	0.07285
15	0.10493	1.12887	0.05162	0.05072	0.08053
16	0.10965	1.12952	0.05419	0.05291	0.07728
17	0	1	0	0	0

Από τον Πίνακα 4.17 παρατηρείται πως μεγαλύτερη επίδραση επιφέρει η διάμετρος των αγωγών και οι πιέσεις στις δεξαμενές. Η επίδραση των συντελεστών δευτερευουσών απωλειών είναι παρόμοια με την Εφαρμογή 3, ενώ το μήκος και η τραχύτητα φαίνεται δίνουν αβεβαιότητα παροχής ίση με 0,46% στους περισσότερους αγωγούς. Στον Πίνακα 4.18, φαίνεται πως οι αβεβαιότητες στους κόμβους των δυο δεξαμενών (κόμβοι 1, 8 και 17) είναι μηδενική και πως η επίδραση όλων των μεταβλητών εισόδου είναι πολύ μικρή στις πιέσεις. Μόνο όταν επιβάλλεται αβεβαιότητα στις πιέσεις των δεξαμενών παρατηρείται αβεβαιότητα εξόδου περίπου ίση με αυτή της εισόδου.

Οι τιμές των Πινάκων 4.13 και 4.14 απεικονίζονται και σχηματικά στα Σχήματα 4.33 και 4.34.



Σχήμα 4.33. Τιμές αβεβαιότητας παροχής σε κάθε αγωγό για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 4.



Σχήμα 4.34. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης σε κάθε κόμβο για αβεβαιότητα εισόδου 1% σε διάμετρο, πιέσεις στις δεξαμενές, συντελεστή δευτερευουσών απωλειών, μήκος και τραχύτητα για την Εφαρμογή 4.

4.4 Μελέτη συμπεριφοράς αβεβαιοτήτων στο δίκτυο της Εφαρμογής 3

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μελέτη της συμπεριφοράς των αβεβαιοτήτων παροχής στους αγωγούς και πίεσης στους κόμβους του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, θα παρατηρηθεί η συμπεριφορά των αβεβαιοτήτων σε διαφορετικές τιμές για τις πιέσεις στις δεξαμενές, καθώς και για διαφορετικές τιμές στην αβεβαιότητα εισόδου της διαμέτρου. Το γεγονός ότι εξετάζεται μόνο η διάμετρος ως μεταβλητή εισόδου ανάγεται στο ότι ασκεί τη μεγαλύτερη επίδραση και στις δυο μεταβλητές εξόδου που εξετάζονται. Έγινε χρήση του δικτύου της Εφαρμογής 3, καθώς αποτελεί το ιδανικότερο από τα τέσσερα με βάση το μέγεθος αλλά και του υπολογιστικού φορτίου που απαιτείται για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων με τη μέθοδο MC.

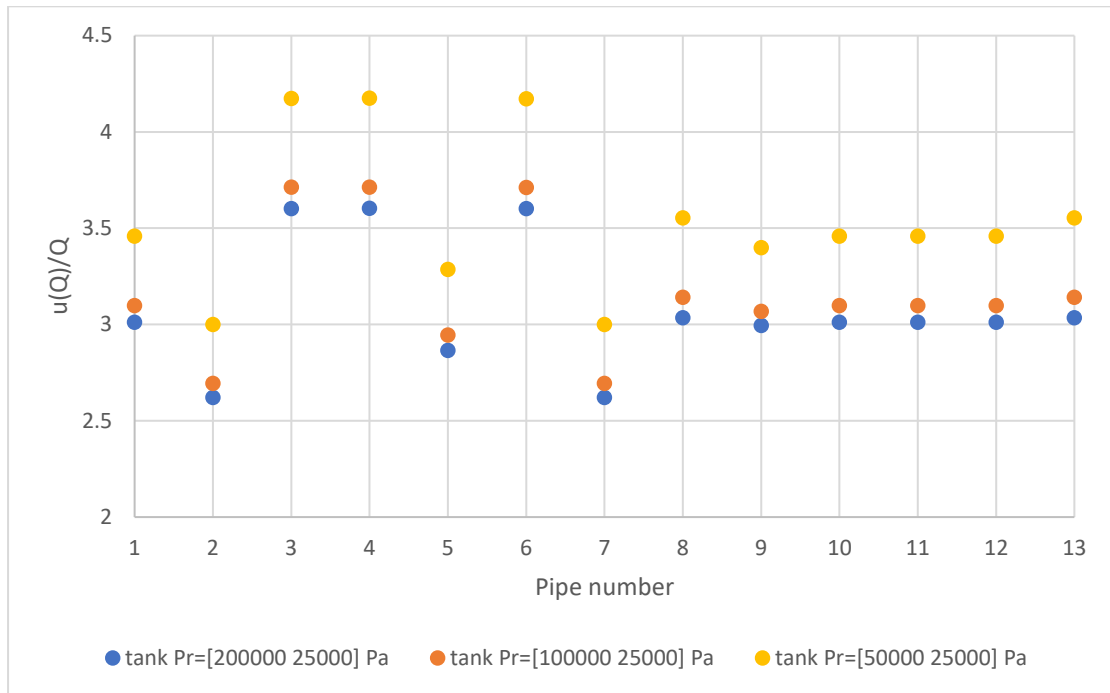
Στην Εφαρμογή 3 χρησιμοποιηθήκαν δυο δεξαμενές στους κόμβους 1 και 8. Οι δυο αυτές πιέσεις ουσιαστικά διαμορφώνουν τη συνολική πτώση πίεσης στο δίκτυο. Σκοπός είναι να μελετηθεί η συμπεριφορά των αβεβαιοτήτων παροχής και πίεσης όσο μεταβάλλεται η συνολική πτώση πίεσης αυτή. Έτσι, μετά την επίλυση του δικτύου και την εύρεση των αβεβαιοτήτων προκύπτουν οι Πίνακες 4.19 και 4.20 με τις τιμές αβεβαιότητας παροχής και πίεσης για διαφορετικές τιμές στις πιέσεις των δύο δεξαμενών. Στα Σχήματα 4.35 και 4.36 απεικονίζονται και σχηματικά οι Πίνακες 4.19 και 4.20.

Πίνακας 4.19. Τιμές αβεβαιότητας παροχής για 1% αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο και ζεύγη πιέσεων στις δεξαμενές [200 000, 25 000], [100 000, 25 000] και [50 000, 25 000] Pa.

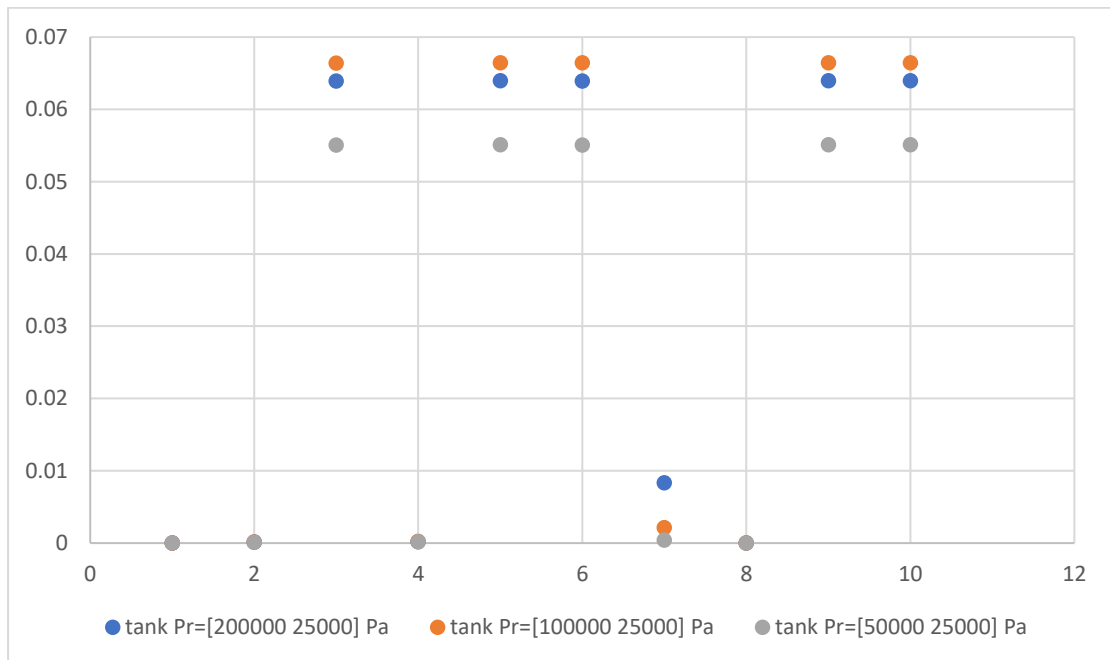
Pipe	tank Pr= [200000 25000] Pa	tank Pr= [100000 25000] Pa	tank Pr= [50000 25000] Pa
1	3.012	3.098	3.46
2	2.621	2.694	3.001
3	3.602	3.713	4.174
4	3.603	3.714	4.175
5	2.865	2.946	3.287
6	3.602	3.712	4.172
7	2.621	2.694	3.001
8	3.036	3.141	3.554
9	2.995	3.069	3.4
10	3.012	3.098	3.46
11	3.012	3.098	3.46
12	3.012	3.098	3.46
13	3.036	3.141	3.554

Πίνακας 4.20. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης για 1% αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο και ζεύγη πιέσεων στις δεξαμενές [200 000, 25 000], [100 000, 25 000] και [50 000, 25 000] Pa.

Node	tank Pr= [200000 25000] Pa	tank Pr= [100000 25000] Pa	tank Pr= [50000 25000] Pa
1	0	0	0
2	0.00012	0.00013	0.0001
3	0.06388	0.06636	0.05504
4	0.00018	0.00021	0.00016
5	0.06394	0.06642	0.05507
6	0.06392	0.06641	0.05505
7	0.00831	0.0021	0.00039
8	0	0	0
9	0.06394	0.06643	0.05507
10	0.06394	0.06643	0.05507



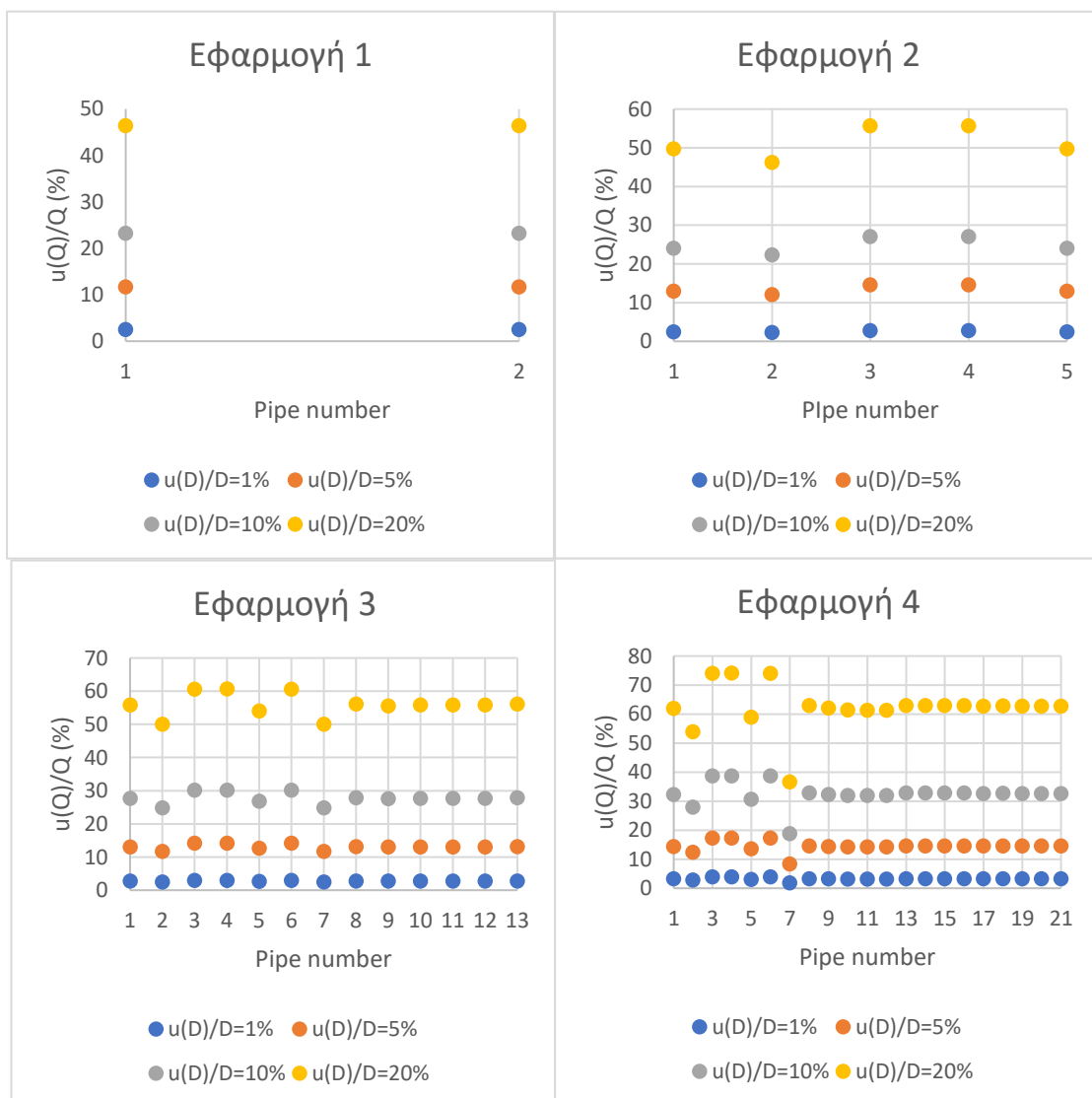
Σχήμα 4.35. Τιμές αβεβαιότητας παροχής για 1% αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο και ζεύγη πιέσεων στις δεξαμενές [200 000, 25 000], [100 000, 25 000] και [50 000, 25 000] Pa.



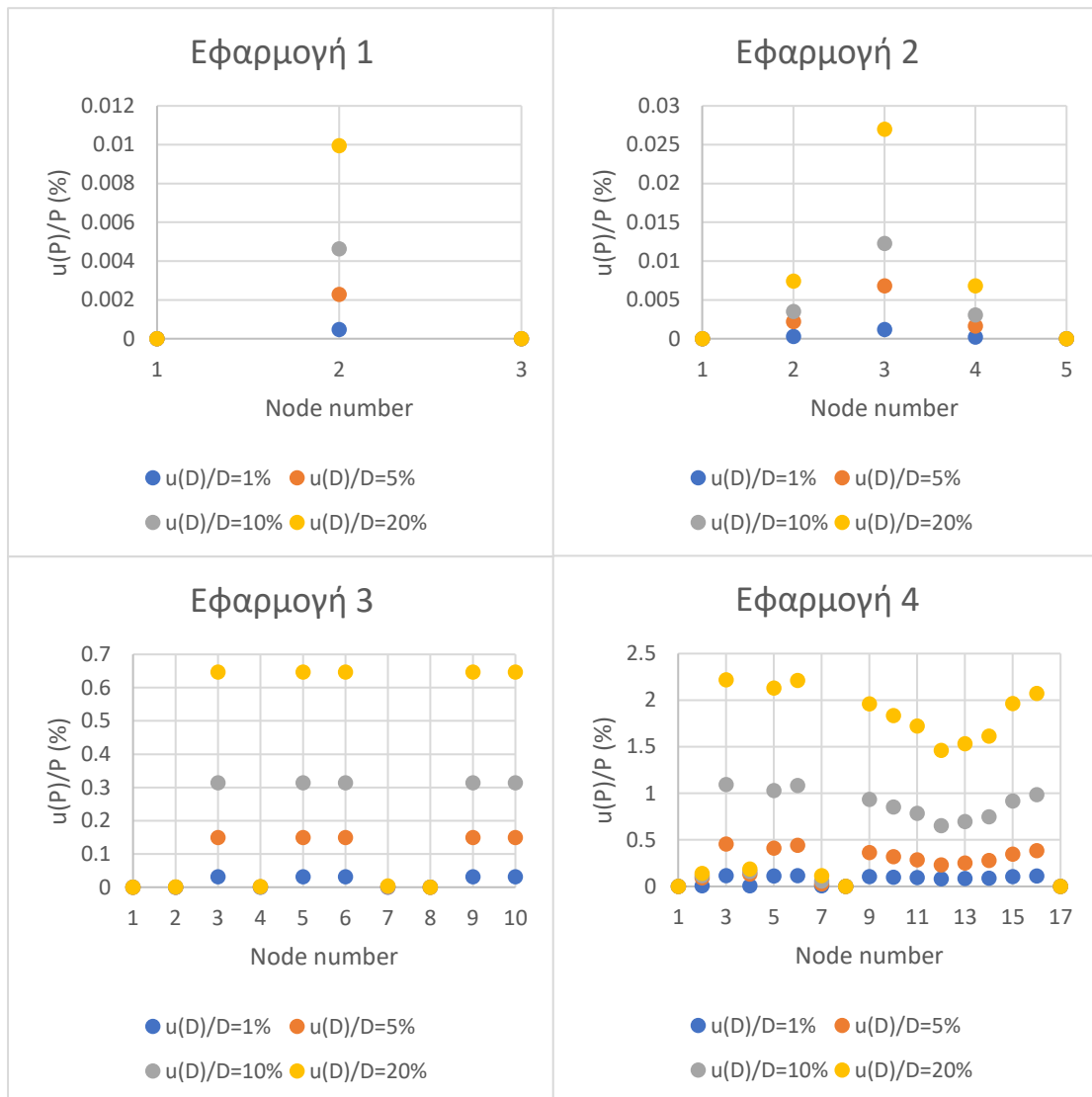
Σχήμα 4.36. Τιμές αβεβαιότητας πίεσης για 1% αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο και ζεύγη πιέσεων στις δεξαμενές [200 000, 25 000], [100 000, 25 000] και [50 000, 25 000] Pa.

Από την παραπάνω ανάλυση παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η διαφορά πίεσης μεταξύ των δεξαμενών, άρα και η κινούσα δύναμη της ροής, τόσο μειώνεται και αβεβαιότητα παροχής σε κάθε αγωγό, ενώ το ίδιο φαινόμενο δεν παρατηρείται στην αβεβαιότητα πίεσης όπου οι τιμές είναι και σχετικά μικρές.

Ακόμη, για να παρατηρηθεί και να πραγματοποιηθεί σύγκριση με το σύστημα ενός αγωγού, μελετήθηκαν οι αβεβαιότητες παροχής και πίεσης και για μεγαλύτερες τιμές της αβεβαιότητας εισόδου στη διάμετρο των αγωγών του δικτύου. Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 4.37 και 4.38.



Σχήμα 4.37. Αβεβαιότητα παροχής σε κάθε αγωγό και για τις τέσσερις εφαρμογές για αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο ίση με 1%, 5%, 10% και 20%.



Σχήμα 4.38. Αβεβαιότητα πίεσης σε κάθε κόμβο και για τις τέσσερις εφαρμογές για αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο ίση με 1%, 5%, 10% και 20%.

Από τα Σχήματα 4.37 και 4.38 παρατηρείται αύξηση των αβεβαιοτήτων εξόδου όσο αυξάνεται η αβεβαιότητα εισόδου στη διάμετρο των αγωγών και πως η εξάρτηση μεταξύ τους είναι γραμμική. Να τονιστεί πως στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε και η ανάλυση αβεβαιοτήτων στο σύστημα ενός αγωγού στην Παράγραφο 4.2.

4.5 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το προκείμενο κεφάλαιο παρατίθενται παρακάτω.

- ❖ Για το σύστημα ενός αγωγού
 - Οι αβεβαιότητες εξόδου λαμβάνουν μεγαλύτερη τιμή σε συνθήκες τυρβώδους ροής.
 - Η συμπεριφορά των αβεβαιοτήτων όταν μεταβάλλονται οι ονομαστικές τιμές της διαμέτρου, της παροχής και της πτώσης πίεσης είναι η ίδια σε στρωτή και τυρβώδη ροή.
- ❖ Για δίκτυα σωληνώσεων
 - Μεγαλύτερη επίδραση επιφέρει η διάμετρος των αγωγών ανεξαρτήτως μεγέθους του δικτύου.
 - Αβεβαιότητα εισόδου στις πιέσεις των δεξαμενών πάντα οδηγούν σε ίσες αβεβαιότητες εξόδου με αυτές της εισόδου, αν συμπεριληφθεί και το γεγονός ότι η MC τείνει να υπερεκτιμά ελάχιστα τις αβεβαιότητες εξόδου.
 - Σχετικά μικρή είναι η επίδραση του μήκους, της τραχύτητας και των συντελεστών δευτερευουσών απωλειών στην παροχή των αγωγών και στις πιέσεις των κόμβων.
 - Όσο αυξάνεται το δίκτυο παρατηρείται εξομάλυνση των τιμών των αβεβαιοτήτων και για την παροχή αλλά και για την πίεση.
 - Οι τιμές των αβεβαιοτήτων σε παροχή και πίεση τείνουν να παραμένουν σταθερές όσο το δίκτυο μεγαλώνει σε μέγεθος.
- ❖ Γενικά για τις αβεβαιότητες
 - Όσο αυξάνει η αβεβαιότητα εισόδου τόσο αυξάνει και αβεβαιότητα στην έξοδο με την εξάρτηση ανάμεσα τους να είναι γραμμική.
 - Με την αύξηση των δοκιμών (trials) της MC οι τιμές των αβεβαιοτήτων τείνουν να εξομαλύνονται.

Κεφάλαιο 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Συμπεράσματα και Προτάσεις

Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως στόχο την ανάλυση των αβεβαιοτήτων που διέπουν τα δίκτυα σωληνώσεων. Έτσι, πρώτα έγινε κατανοητή η φύση του προβλήματος σε σύστημα ενός αγωγού όπου εισήχθη αβεβαιότητα στη διάμετρο. Εκεί παρατηρήθηκε η αβεβαιότητα εξόδου στην παροχή του αγωγού και στην πτώση πίεσης του καθώς και η μεταβολή των αβεβαιοτήτων εξόδου σε αλλαγή των ονομαστικών τιμών της διαμέτρου της παροχής και της πτώσης πίεσης. Αξίζει να σημειωθεί πως η μέθοδος Monte Carlo και η μέθοδος Sensitivity Derivatives δίνουν περίπου τις ίδιες τιμές αβεβαιοτήτων. Η πρώτη αποτελεί μία στοχαστική μέθοδο και επαληθεύεται ουσιαστικά από τη δεύτερη η οποία αποτελεί μία αναλυτική μέθοδο ανάλυσης αβεβαιοτήτων. Μετά την κατανόηση του συστήματος ενός αγωγού έγινε επέκταση του προβλήματος σε δίκτυα σωληνώσεων και πιο συγκεκριμένα έγινε σταδιακή επέκταση με αύξηση της πολυπλοκότητας των δικτύων. Στην περίπτωση των δικτύων, λοιπόν, εξετάστηκαν οι αβεβαιότητες της παροχής των αγωγών και πιέσεων των κόμβων. Ως μεταβλητές εισόδου εξετάστηκαν η διάμετρος των αγωγών, οι πιέσεις στους κόμβους όπου βρίσκονται οι δεξαμενές, οι συντελεστές δευτερευουσών απωλειών, το μήκος και η τραχύτητα των αγωγών. Αυτό που παρατηρείται είναι πως σε όλα τα δίκτυα ανεξαρτήτως μεγέθους η διάμετρος των αγωγών είναι αυτή που επιδρά εντονότερα στην παροχή και στην πίεση. Με εισαγωγή αβεβαιοτήτων στις πιέσεις των δεξαμενών παρατηρείται ίση αβεβαιότητα εξόδου με αυτή της εισόδου σε όλο το μήκος του δικτύου. Η επίδραση των συντελεστών δευτερευουσών απωλειών του μήκους και της τραχύτητας είναι αμελητέα. Αυξάνοντας την πολυπλοκότητα του δικτύου δεν παρατηρείται μεταβολή στις τιμές των αβεβαιοτήτων εξόδου παρά μόνο μία εξομάλυνση των τιμών των αβεβαιοτήτων. Ακόμη, με αύξηση της αβεβαιότητας εισόδου παρατηρείται γραμμική αύξηση στην αβεβαιότητα εξόδου. Τέλος, αυτό που παρατηρείται στα δίκτυα σωληνώσεων είναι

πως με την αύξηση της κινούσας δύναμης της ροής, όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι η διαφορά πίεσης από δεξαμενή σε δεξαμενή, προκύπτει μείωση στις τιμές των αβεβαιοτήτων εξόδου.

Η προκειμένη εργασία αποτελεί μια εισαγωγική μελέτη του θέματος που πραγματεύεται. Για αυτό το λόγο, αναφέρονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω εμβάθυνση στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Στο σύστημα ενός αγωγού μπορεί να γίνει μία εκτενέστερη μελέτη αναφορικά με τις μεταβλητές εισόδου. Πιο συγκεκριμένα, αξίζει να αναλυθεί η συμπεριφορά των αβεβαιοτήτων παροχής και πτώσης πίεσης με μεταβλητές εισόδου το μήκος, τη θερμοκρασία, την τραχύτητα και άλλες παραμέτρους του προβλήματος. Στην περίπτωση της τυρβώδους ροής μπορεί να γίνει αριθμητική παραγωγή για την εύρεση της αβεβαιότητας εξόδου που προκύπτει για το συντελεστή τριβής κατά Swamme-Jain. Αναφορικά με τα δίκτυα σωληνώσεων και τις αβεβαιότητες οι οποίες τα διέπουν, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί ανάλυση σε περισσότερα δίκτυα και ακόμη μεγαλύτερου μεγέθους, ώστε να γίνει καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των αβεβαιοτήτων. Τέλος, καλό είναι να παρατηρηθεί η συμπεριφορά των αβεβαιοτήτων όταν στα δίκτυα συμπεριληφθούν ζητήσεις σε συγκεκριμένους κόμβους και εισαχθούν και αντλίες οι οποίες τείνουν να επηρεάζουν το καθεστώς ροής.

Κεφάλαιο 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Potter, M. C., Wiggert, C. D., & Ramadan, H. B. (2010). *Mechanics of Fluid*. 639–644.
- [2]. Larock, B. E., Jeppson, R. W., & Watters, G. Z. (1999). Hydraulics of Pipeline Systems. In *Hydraulics of Pipeline Systems*. <https://doi.org/10.1201/9780367802431>
- [3]. Επικ, Ε., & Βαλουγεώργης, Κ. Δ. (2001). *ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Μπερσίμης Χρ . Διονύσιος*.
- [4]. *MATLAB Documentation*. (n.d.). Retrieved May 29, 2022, from <https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>
- [5]. C. David Cooper, & F. C. Alley. (2004). *ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΙΑΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ* (Γ. Καλαμπούκας & Η. Λάτσιος (eds.); 3rd ed.). Δρ. Μαρία Αγγ. Γούλα.
- [6]. *Air Psychrometrics*. (n.d.). Retrieved May 30, 2022, from https://www.engineeringtoolbox.com/air-psychrometrics-properties-t_8.html
- [7]. Adams, J E, & Ames, W. F. (n.d.). *References On contracting interval iteration for nonlinear problems in R NN*. Retrieved May 30, 2022, from <https://epubs.siam.org/terms-privacy>
- [8]. Alefeld, G., & Mayer, G. (2000). Interval analysis: Theory and applications. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 121(1), 421–464. [https://doi.org/10.1016/S0377-0427\(00\)00342-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0427(00)00342-3)
- [9]. Putko, M. M., Newman, P. A., & Taylor, A. C. (2004). {E}mploying {S}ensitivity {D}erivatives for {R}obust {O}ptimization under {U}ncertainty in

{C}FD. *9th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, September.*

[10]. Huyse, L. (2001). Solving problems of optimization under uncertainty as statistical decision problems. *19th AIAA Applied Aerodynamics Conference.* <https://doi.org/10.2514/6.2001-1519>

[11]. *Method of moments (statistics) - Wikipedia.* (n.d.). Retrieved May 30, 2022, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Method_of_moments_\(statistics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Method_of_moments_(statistics))

[12]. Knio, O. M., & Le Maître, O. P. (2006). Uncertainty propagation in CFD using polynomial chaos decomposition. *Fluid Dynamics Research*, 38(9), 616–640. <https://doi.org/10.1016/J.FLUIDDYN.2005.12.003>

[13]. *Hammersley, J. M., D. C. Handscomb: Monte Carlo Methods. Methuen & Co., London, and John Wiley & Sons, New York, 1964. VII + 178 S., Preis: 25 s.* (n.d.). Retrieved May 30, 2022, from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/bimj.19660080314>

[14]. Basdanis, T., Tatsios, G., & Valougeorgis, D. (2021). Human thermophysiological models: Quantification of uncertainty in the output quantities of the passive system due to uncertainties in the control equations of the active system via the Monte Carlo method. *Journal of Thermal Biology*, 100(July). <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.103045>

[15]. Tatsios, G., & Valougeorgis, D. (2020). Uncertainty analysis of computed flow rates and pressure differences in rarefied pressure and temperature driven gas flows through long capillaries. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 79, 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2019.09.009>

[16]. GUM-2008. (2008). Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. *International Organization for Standardization Geneva* ISBN, 50(September), 134. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>

Παράρτημα Α. Υπορουτίνα υπολογισμού βρόχων και ψευδοβρόχων

```
function [nloops, pipeloopsmatrix, pipepseudomatrix, matpipenum] = findloop(data)

%FINDLOOP Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
% Το s παίρνει τους κόμβους έναρξης του κάθε σωλήνα και το t παίρνει τους
% κόμβους τέλους του κάθε σωλήνα.
% x,y είναι οι συντεταγμένες των σημείων.
% Η εντολή edgecycles=cyclebasis(G)/allcycles(G) βρίσκει τα loops που χρειάζονται
% με την αντίστοιχη σύνταξη των εντολών.
% Και η εντολή shortestpath βρίσκει την συντομότερη διαδρομή ανάμεσα σε δύο
% κόμβους.

s = data.pipe.locationgiven(1:data.npipes);
t = data.pipe.locationgiven(data.npipes+1:2*data.npipes);
G=graph(s,t);
x = [data.node.location(1:data.nnodes)];
y = [data.node.location(data.nnodes+1:2*data.nnodes)];
p=plot(G, 'XData',x, 'YData',y, 'EdgeLabel',1:numedges(G));
matpipenum=table2array(G.Edges);

nloops=data.npipes-data.nnodes+1

if not (nloops==0)

[nodeloops, pipeloops] = cyclebasis(G);

k=cellfun('size', pipeloops, 2);
z=max(k);
a=pipeloops(1);
b=cell2mat(a);
b(end+1:z)=0;
pipeloopsmatrix=b;
for i=2:nloops
    a=pipeloops(i);
    b=cell2mat(a);
    b(end+1:z)=0;
    pipeloopsmatrix=[pipeloopsmatrix;b];
end
else pipeloopsmatrix=0
end
pipeloopsmatrix
```

```

if not (data.npseudoloops==0)

dold=0;
d=0;
pathlength=0;
for i=1:data.npseudoloops
    dold=d ;
    [nodepseudo,d,pipepseudo] = shortestpath(G,data.tank.location(i:i),data.tank.location(i+1:i+1));
    if d>dold
        pathlength=d;
    end
end

pathlength;

[nodepseudo,d,pipepseudo] = shortestpath(G,data.tank.location(1:1),data.tank.location(2:2));
pipepseudo(end+1:pathlength)=0;
pipepseudomatrix=pipepseudo;
for i=2:data.npseudoloops
    [nodepseudo,d,pipepseudo] = shortestpath(G,data.tank.location(i:i),data.tank.location(i+1:i+1));
    pipepseudo(end+1:pathlength)=0;
    pipepseudomatrix=[pipepseudomatrix;pipepseudo];
end
else pipepseudomatrix=0
end
pipepseudomatrix
end

```

Σχήμα Α. Υπορουτίνα υπολογισμού βρόχων και ψευδοβρόχων.

Παράρτημα Β. Πίνακες μετατροπής μονάδων ανάμεσα στα συστήματα SI και EU.

Πίνακας Β 1. Μετατροπή μονάδων για τη μάζα.

ΜΑΖΑ		
	lb	kg
lb	1	0.4536
kg	2.205	1

Πίνακας Β 2. Μετατροπή μονάδων για το μήκος.

ΜΗΚΟΣ			
	m	ft	in
m	1	3.281	39.37
ft	0.3048	1	12
in	0.0254	0.0833	1

Πίνακας Β 3. Μετατροπή μονάδων για τον όγκο.

ΟΓΚΟΣ			
	ft ³	m ³	L
ft ³	1	0.02832	28.32
m ³	35.31	1	1000
L	0.03531	0.001	1

Πίνακας Β 4. Μετατροπή μονάδων για την πίεση.

ΠΙΕΣΗ			
	atm	psi	Pa
atm	1	14.7	101300
psi	0.068	1	6891
Pa	$9.87 \cdot 10^{-6}$	$1.45 \cdot 10^{-4}$	1

Πίνακας Β 5. Συντελεστές μετατροπής μονάδων για την ταχύτητα.

ΤΑΧΥΤΗΤΑ		
	ft/sec	m/sec
ft/sec	1	0.3048
m/sec	3.281	1

Πίνακας Β 6. Συντελεστές μετατροπής μονάδων για το ιξώδες.

ΙΞΩΔΕΣ				
	cp	g/cm-s	lb/ft-hr	kg/m-hr
cp	1	0.01	2.42	3.61
g/cm-s	100	1	242	361
lb/ft-hr	0.413	0.00413	1	1.492
kg/m-hr	0.277	0.00277	0.67	1