

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική εργασία

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ
ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ**

Πουλάκης Ζαννής

Επιβλέπων: Επικ. Καθηγητής, Δ. Βαλουγεώργης

Βόλος, Ιούνιος 2000



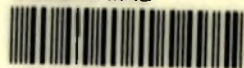
αρ εισ. 215 / π. 4.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**



Αριθ. Εισ.: 2206/1
Ημερ. Εισ.: 13-09-2000
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜΒ
2000
ΠΟΥ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000062119

Θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- Τους καθηγητές κ. Δ. Βαλουγεώργη, κ. Κ. Παπαδημητρίου και κ. Ν. Βλάχο για την συμπαράσταση κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- Όλους τους καθηγητές του τμήματος για τις γνώσεις και τον τρόπο σκέψης που μου δίδαξαν.
- Τους συμφοιτητές μου
- Τους γονείς μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	3
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	7
3. Αρχές σχεδιασμού δικτύων σωληνώσεων	9
3.1 Εισαγωγή	9
3.2 Μεταβολή πίεσης σε αγωγό	9
3.3 Σύστημα εξισώσεων για το δίκτυο	15
4. Σχεδιασμός με τη χρήση του PIPE2000	19
4.1 Εισαγωγή	19
4.2 Σχεδιασμός και επίλυση	19
4.3 Έλεγχος ακρίβειας μοντέλου	21
4.4 Προσομοίωση	22
4.5 Αποτελέσματα	23
4.6 Συμπεράσματα	32
5. Μοντέλο σε MATLAB	34
5.1 Εισαγωγή	34
5.2 Δομή του αλγορίθμου	34
5.3 Αποτελέσματα	36
5.4 Συμπεράσματα	37
6. Βελτιστοποίηση σχεδιασμού δικτύων σωληνώσεων	39
6.1 Εισαγωγή	39
6.2 Εξισώσεις του δικτύου σωληνώσεων	40
6.3 Ορισμός της συνάρτησης κόστους	40
6.4 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης	42
6.5 Αποτελέσματα	43
7. Διάγνωση βλαβών σε δίκτυα σωληνώσεων	47
7.1 Εισαγωγή	47
7.2 Αλγόριθμος PNgel	47
7.3 Αποτελέσματα	49
7.4 Συμπεράσματα	57
8: Επίλογος	59

8.1 Συμπεράσματα	59
8.2 Μελλοντικές επεκτάσεις	60
9. Βιβλιογραφία	61
10. Συνημμένα	62
10.1 Τραχύτητες αγωγών	62
10.2 Συντελεστές πτώσης πίεσης εξαρτημάτων	63
10.3 Δίκτυο διαβροχής ταινιοδρόμων ΑΗΣ Πτολεμαΐδας	64

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα δίκτυα σωληνώσεων αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης βιομηχανοποιημένης κοινωνίας, λύνοντας την ανάγκη για μεταφορά υγρών και αερίων από τα σημεία αποθήκευσης, στα σημεία κατανάλωσης τους. Η κλίμακα τους ποικίλλει ανάλογα με την εφαρμογή. Διακρίνονται σε μικρού μεσαίου και μεγάλου μεγέθους. Μικρά συστήματα περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού, νερού και φυσικού αερίου σε οικιακό και εμπορικό επίπεδο και καλύπτουν ανάγκες σε συγκροτήματα κατοικιών, πολυκατοικιών εμπορικών κέντρων δημοσίων κτιρίων κτλ. Τα μεσαία δίκτυα εκτείνονται μέσα σε βιοτεχνίες και βιομηχανίες και περιλαμβάνουν δίκτυα πυρόσβεσης, αζώτου και άλλων αδρανών αερίων, αέρα οργάνων ατμού υδρογονανθράκων κτλ. Τα μεγάλα δίκτυα σωληνώσεων συναντώνται στην υδροδότηση πόλεων, στην τηλεθέρμανση στη μεταφορά πετρελαίου από τα σημεία άντλησης του στα λιμάνια και τα διυλιστήρια και εκτείνονται από μερικές δεκάδες σε χιλιάδες χιλιόμετρα. Βέβαια δεν πρέπει να ξεχνάμε πως ο καθένας διαθέτει μέσα στον οργανισμό του ίσως το πιο εξελιγμένο «δίκτυο σωληνώσεων» για τη μεταφορά του αίματος και όλων των υπολοίπων ζωτικών υγρών του οργανισμού. Η ύπαρξη λοιπόν αξιόπιστων υπολογιστικών εργαλείων για την επίλυση οποιουδήποτε μικρού, μεσαίου ή μεγάλου δικτύου σωληνώσεων έχει ουσιαστική σημασία.

Κάθε δίκτυο σωληνώσεων αποτελείται από τους κόμβους και από τους κλάδους του δικτύου, τους αγωγούς μέσω των οποίων μεταφέρεται το ρευστό. Στα σημεία τομής δύο ή περισσότερων σωλήνων εμφανίζονται οι καταναλώσεις του δικτύου. Αρχικά αποφασίζεται η γεωμετρία του δικτύου, ο δρόμος δηλαδή που θα ακολουθούν οι αγωγοί για να καλύψουν τις ζητήσεις. Έχοντας ολοκληρώσει την κατασκευή του σκελετού του δικτύου αποφασίζεται ο τύπος των αγωγών που θα χρησιμοποιηθούν με βάση τις συγκεκριμένες απαιτήσεις για το υγρό και την αντοχή τους. Πέραν αυτών οι δεξαμενές και οι αντλίες αλλά και εξαρτήματα σωληνώσεων όπως βαλβίδες ή συνδέσεις τοποθετούνται και ρυθμίζουν την πίεση στο δίκτυο στα επιθυμητά επίπεδα.

Επίλυση δικτύου σωληνώσεων σημαίνει, τον υπολογισμό των παροχών σε κάθε κλάδο του δικτύου και των πιέσεων σε κάθε κόμβο του δικτύου με βάση τις δεδομένες ζητήσεις στους κόμβους. Η τριβή του υγρού με τα τοιχώματα του αγωγού προκαλεί πτώση πίεσης. Πτώση πίεσης προκαλείται και από τα εξαρτήματα (συνδέσεις, βαλβίδες κ.α.) που μπορεί να υπάρχουν στον αγωγό. Τα σημεία αποθήκευσης (συνήθως δεξαμενές) και οι τυχόν αντλίες δίνουν στο ρευστό την απαραίτητη ενέργεια για να φτάνει στον προορισμό του, δηλαδή το σημείο κατανάλωσης του όπως αρχικά έχει απαιτηθεί και σχεδιαστεί. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των κλάδων και των κόμβων στο δίκτυο τόσο πιο πολύπλοκη γίνεται η διαδικασία επίλυσης του. Η επίλυση είναι δύσκολη, αν σκεφτεί κανείς το πλήθος των πειραματικών εκφράσεων που υπάρχουν και χρησιμοποιούνται σε συνάρτηση με τα χαρακτηριστικά του δικτύου και του ρευστού που κυκλοφορεί σε αυτό. Η εφαρμογή λανθασμένης έκφρασης οδηγεί σε εντελώς εσφαλμένα αποτελέσματα και απαιτείται προσοχή στην επιλογή των πλέον καταλλήλων εξισώσεων σε κάθε περίπτωση.

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η χρήση υπαρχόντων κωδίκων και η ανάπτυξη πηγαίων κωδίκων σε γλώσσες προγραμματισμού FORTRAN ή MATLAB που θα επιτρέψουν την επίλυση δικτύων τυχαίας γεωμετρίας και πολυπλοκότητας. Επίσης επέκταση αυτών των κωδίκων έτσι ώστε να περιλαμβάνουν τεχνικές βελτιστοποίησης του σχεδιασμού και διάγνωσης βλαβών. Το πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας έχει σαν στόχο, την κατανόηση της σχετικής θεωρίας και τη χρήση του λογισμικού PIPE2000 που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Kentucky. Μετά την αντιμετώπιση αρκετών δυσκολιών κυρίως λόγω νεότητας του λογισμικού έγινε δυνατή η ικανοποιητική επίλυση εικονικών και πραγματικών δικτύων σωληνώσεων. Στα εικονικά δίκτυα περιλαμβάνονται δίκτυα απλής γεωμετρίας και μικρού αριθμού αγωγών και μας έδωσαν τη δυνατότητα να διερευνήσουμε σε βάθος τις δυνατότητες και τις αδυναμίες του PIPE2000. Τα πραγματικά δίκτυα που επιλύθηκαν περιλαμβάνουν το δίκτυο υδροδότησης της Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης και Αποχέτευσης Σερρών στη συνοικία Μετόχι Σερρών και το δίκτυο διαβροχής ταινιόδρομων μεταφοράς λιγνίτη στις εγκαταστάσεις της ΔΕΗ στην Πτολεμαΐδα όπου εξετάσθηκε η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του κώδικα PIPE2000, συγκρίνοντας τα με τις πραγματικές

μετρήσεις. Το επόμενο βήμα ήταν η δημιουργία του κώδικα PNdes σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB για την επίλυση οποιουδήποτε δικτύου σωληνώσεων και ο έλεγχος των αποτελεσμάτων. Το PIPE2000 χρησιμοποιήθηκε και σε αυτήν την περίπτωση για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Στο τρίτο στάδιο ο πηγαίος κώδικας επεκτάθηκε, πέρα από την επίλυση του δικτύου, έτσι ώστε να περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του δικτύου με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης και των λειτουργικών εξόδων σε συνάρτηση με το χρόνο λειτουργίας της εγκατάστασης. Αυτό επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας υπορουτίνες βελτιστοποίησης και θεωρώντας σαν μεταβλητές τις διαμέτρους των σωλήνων και τις ισχύς των αντλιών για κάθε δίκτυο γνωστής αλλά πολύπλοκης γεωμετρίας, μια διαδικασία που χωρίς υπολογιστή γίνεται εμπειρικά και χωρίς μεγάλη ακρίβεια. Τέλος ο πηγαίος κώδικας επεκτάθηκε στη διάγνωση και αξιολόγηση βλαβών στο δίκτυο με βάση μετρήσεις πιέσεων και παροχών. Και σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές βελτιστοποίησης και επιτεύχθηκε η κατασκευή ενός αλγόριθμου που μπορεί με τις σωστές μετρήσεις να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας, στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας με τα δίκτυα σωληνώσεων. Ακολουθούν τα μαθηματικά μοντέλα υπολογισμού των παροχών και πτώσεων πίεσης σε δίκτυα σωληνώσεων που αναφέρονται στο κεφάλαιο 3, ενώ στο κεφάλαιο 4 γίνεται μια σύντομη αναφορά στο PIPE2000 και παρουσιάζονται ορισμένα αντιπροσωπευτικά παραδείγματα. Το κεφάλαιο 5 αναφέρεται στον πηγαίο κώδικα PNdes που δημιουργήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, ενώ στα κεφάλαια 6 και 7 περιγράφονται τα μοντέλα βελτιστοποίησης και διάγνωσης και αξιολόγησης βλαβών σε δίκτυα σωληνώσεων καθώς και οι επεκτάσεις του κώδικα PNopt και PNrel αντίστοιχα και εμφανίζονται αποτελέσματα. Τέλος στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και οι πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται αποκλειστικά με μόνιμη ροή ασυμπίεστου ρευστού. Είναι δυνατό ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία να

επεκταθεί σε μη μόνιμες ροές, και σε συμπιεστές ροές, ιδιαίτερα αν αναλογιστεί κανείς την εξάπλωση της χρήσης του φυσικού αερίου. Συνηθίζεται ο αρχικός σχεδιασμός του δικτύου να βασίζεται στην μόνιμη κατάσταση ενώ οι μη μόνιμες ροές παρατηρούνται στη φάση λειτουργίας.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στα τυπικά βιβλία μηχανικής ρευστών που διδάσκονται στα πλαίσια του μαθήματος στα τμήματα μηχανολόγων, χημικών και πολιτικών μηχανικών αναπτύσσεται η θεωρία ροής εντός αγωγών. Σε αυτό το θεωρητικό υπόβαθρο στηρίζεται η θεωρία σχεδιασμού και επίλυσης δικτύων σωληνώσεων. Στα περισσότερα όμως βιβλία όπως του Παπαϊωάννου [1] η ανάπτυξη του θέματος είναι εισαγωγική, περιορίζεται σε έναν αγωγό και δεν περιλαμβάνει την επίλυση ολόκληρων δικτύων. Αντίθετα στο σύγγραμμα των Potter M. C. και Wiggert D. C. [2], δίνεται λεπτομερής περιγραφή μεθοδολογίας επίλυσης όλου του δικτύου ανάλογα με τη γεωμετρία. Στο βιβλίο του Mohinder L. N. [3], δίνονται κατασκευαστικές λεπτομέρειες σχετικά με το σχεδιασμό και την εγκατάσταση δικτύων. Ο αναγνώστης επομένως μπορεί να αναφερθεί στα βιβλία [2] και [3] ώστε να έχει μια πλήρη εικόνα του θέματος. Στα παραπάνω συγγράμματα στηριχθήκαμε για την ανάπτυξη του πηγαίου κώδικα PNdes.

Απαραίτητο βοήθημα αποτέλεσε και το εγχειρίδιο χρήσης του PIPE2000 [4] το οποίο εμβαθύνει ακόμα περισσότερο σε τεχνικά στοιχεία και λεπτομέρειες χωρίς τα οποία δεν θα ήταν δυνατή η λύση του προβλήματος. Παρατηρείται δηλαδή ότι πέρα από τη θεωρητική γνώση που δίνουν ακόμα και εξειδικευμένα έγκριτα εγχειρίδια, η επίλυση του πραγματικού προβλήματος απαιτεί περισσότερη εμβάθυνση και επίλυση ειδικών προβλημάτων. Το εγχειρίδιο του PIPE2000 δίνει πληροφορίες τόσο για το χρησιμοποιούμενο στα δίκτυα εξοπλισμό όσο και για τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους μοντελοποίησης αυτών. Επίσης γίνεται αναφορά στους αλγορίθμους επίλυσης του συστήματος εξισώσεων που ορίζουν το δίκτυο. Τα αρχικά παραδείγματα που επιλύθηκαν για να διαπιστωθεί η ακρίβεια των κωδίκων PIPE2000 και PNdes βρίσκονται μέσα στις σελίδες των παραπάνω βιβλίων.

Ο σχεδιασμός δικτύων σωληνώσεων έχει απασχολήσει τους μηχανικούς εδώ και αρκετό καιρό, με αποτέλεσμα να υπάρχουν βοηθήματα και εξειδικευμένη γνώση, ενώ αντίθετα στην περίπτωση της βελτιστοποίησης οι σχετικές

αναφορές είναι λίγες και πολύ πρόσφατες. Δύο σχετικές αναφορές βρίσκονται στις δημοσιεύσεις [5] και [6]. Πρόκειται για δύο γνωστά διεθνή περιοδικά που διαβάζονται κυρίως από τον κόσμο της βιομηχανίας, αφού η βελτιστοποίηση έχει άμεση εφαρμογή στις βιομηχανικές μονάδες. Ο ακαδημαϊκός κόσμος μόνο πρόσφατα έχει αρχίσει να ασχολείται με τη βελτιστοποίηση δικτύων σωληνώσεων ώστε να δοθεί και το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο. Εδώ θα πρέπει να περιληφθεί και η πρόσφατη δουλειά [7] της ομάδας του πανεπιστήμιου του Kentucky που είναι γεγονός ότι πρωτοστατούν στην εφαρμοσμένη έρευνα σε αυτό το γνωστικό αντικείμενο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια μέσω εξελιγμένων αλγορίθμων να τεκμηριωθεί η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Οι παραπάνω δημοσιεύσεις χρησιμοποιούνται στην υπορουτίνα εκτίμησης κόστους του πηγαίου κώδικα PNopt που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Τα αποτελέσματα της διπλωματικής σε σχέση με τη βελτιστοποίηση θα παρουσιαστούν σε συνέδριο που θα γίνει στη Θάσο [8].

Η θεωρία διάγνωσης βλαβών αν και καινούργια συνεχώς αναπτύσσεται και εξελίσσεται [9]. Στην παρούσα διπλωματική γίνεται μια πρώτη προσπάθεια διάγνωσης βλαβών σε δίκτυα σωληνώσεων που θα συνεχισθεί στο μέλλον. Χρησιμοποιείται η αντίστοιχη θεωρία διάγνωσης βλαβών σε κατασκευές για την ανάπτυξη του πηγαίου κώδικα PNrel. Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν σε συνέδριο το 2001 στο San Diego [10].

3. ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Ένα δίκτυο σωληνώσεων αποτελείται από μικρό ή μεγάλο αριθμό αγωγών, εξαρτημάτων, αντλιών, δεξαμενών κτλ. Συνδέοντας τα σημεία από τα οποία ξεκινάει η ροή (π.χ. δεξαμενές) με τα σημεία στα οποία καταλήγει (κόμβοι απαιτήσεων του δικτύου) δημιουργείται σταδιακά ο σκελετός, του δικτύου έτσι ώστε να εξυπηρετείται με τον καλύτερο δυνατό η ζήτηση η οποία θεωρείται γνωστή. Ακολουθεί ο ορισμός των βασικών παραμέτρων του δικτύου, δηλαδή του τύπου των αγωγών (διάμετρος, υλικό, τραχύτητα), των εξαρτημάτων στο δίκτυο, όπως βαλβίδες και συνδέσεις και των χαρακτηριστικών των τυχόν αντλιών (ισχύς, συντελεστής απόδοσης). Έχοντας πλέον τη γεωμετρία του δικτύου, ξεκινάει η επίλυση του.

3.2 Μεταβολή πίεσης σε αγωγό

Η επίλυση ενός δικτύου σωληνώσεων στηρίζεται στις ίδιες σχέσεις που ορίζουν την πτώση πίεσης και παροχή για έναν αγωγό. Πιο συγκεκριμένα για κάθε αγωγό ξεχωριστά ισχύει μια σχέση της μορφής

$$\Delta P_l = R \cdot Q^x \quad (1)$$

όπου ΔP_l η πτώση πίεσης λόγω τριβής του ρευστού με τα τοιχώματα του σωλήνα, Q η παροχή στο σωλήνα, R η αντίσταση τριβών στην κίνηση του ρευστού και x ο συντελεστής που δίνεται από τις παρακάτω εκφράσεις

Επίσης η πτώση πίεσης λόγω των εξαρτημάτων του αγωγού δίνεται από μια σχέση της μορφής

$$\Delta P_f = K_m \cdot Q^2 \quad (2)$$

όπου ΔPf η πτώση πίεσης λόγω των εξαρτημάτων του σωλήνα, Q η παροχή στο σωλήνα και K_m ο συντελεστής απωλειών λόγω των εξαρτημάτων του σωλήνα

Το άθροισμα των παραπάνω όρων δίνει τη συνολική πτώση πίεσης σε κάθε αγωγό του δικτύου.

3.2.1 Πτώση πίεσης λόγω τριβών

Όσον αφορά τη σχέση πτώσης πίεσης λόγω τριβών (1), υπάρχουν αρκετές εκφράσεις για τους συντελεστές R και x . Οι δημοφιλέστερες που χρησιμοποιούνται και από το PIPE2000 είναι οι εξής:

i) Hazen-Williams

$$x = 1.85$$

$$R = \frac{K_1 \cdot L}{C^x \cdot D^m}, \quad (3)$$

όπου L το μήκος σωλήνα, D η διάμετρος σωλήνα, C η τραχύτητα κατά Hazen-Williams και οι συντελεστές $m = 4,87$; $K_1 = 10,59$ [SI] ή $4,72$ [EU];

ii) Darcy-Weisbach

$$x = 2$$

$$R = \frac{F \cdot L}{2 \cdot g \cdot D \cdot A^2} = \frac{8 \cdot F \cdot L}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5}, \quad (4)$$

όπου L το μήκος σωλήνα, D η διάμετρος σωλήνα, A η διατομή σωλήνα και F ο συντελεστής τριβής σωλήνα

Συνήθως για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής F για έναν αγωγό στη σχέση 4 χρησιμοποιείται το διάγραμμα Moody που αποτελεί μια

εύχρηστη και σχετικά ακριβή προσεγγιστική μέθοδο. Πέραν αυτού, υπάρχουν αρκετές αναλυτικές εκφράσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συγκεκριμένες περιοχές του αριθμού Reynolds (Re) της ροής. Η πιο ακριβής από αυτές είναι η έκφραση του Colebrook που έχει την ακόλουθη μορφή

$$\frac{1}{\sqrt{F}} = -2 \cdot \log\left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \cdot \sqrt{F}}\right), \quad (5)$$

οπού ε η τραχύτητα αγωγού και D η διάμετρος αγωγού

Η παραπάνω σχέση είναι ακριβής για $\text{Re} > 4000$

Η έκφραση Colebrook απαιτεί μια επαναληπτική διαδικασία τύπου Newton που είναι ακριβής αλλά χρονοβόρα. Για αυτό το λόγο τόσο από το PIPE2000 όσο και από τον πηγαίο κώδικα PNdes χρησιμοποιείται η έκφραση των Swamee-Jain που ουσιαστικά δίνει σχεδόν ίδια αποτελέσματα με την προηγούμενη όντας πολύ πιο απλή προγραμματιστικά και ταχύτερη υπολογιστικά, αφού δεν απαιτείται επαναληπτική μέθοδος για την εύρεση του συντελεστή F . Η εξίσωση των Swamee-Jain είναι:

$$F = \frac{1.325}{[\ln(0.27 \cdot \frac{\varepsilon}{D} + 5.74 \cdot \frac{1}{\text{Re}^{0.9}})]^2}, \quad (6)$$

οπού ε η τραχύτητα αγωγού και D η διάμετρος αγωγού

η οποία είναι ακριβής για $5000 < \text{Re} < 10^8$ και $10^{-8} < \varepsilon/D < 0,01$:

Άλλες εκφράσεις είναι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του F σε σχέση με τον αριθμό Re δίδονται στον πίνακα 1

$F = \frac{64}{\text{Re}}$	$\text{Re} \leq 2000$	(7)
$F = \frac{0.3164}{\text{Re}^{1/4}}$	$4000 < \text{Re} < 10^5$	(8)
$F = 2 \cdot \log(\text{Re} \cdot \sqrt{F}) - 0.8$	$\text{Re} > 10^5$	(9)
$F = 2 \cdot \log\left(\frac{D}{\varepsilon}\right) + 1.14$	$\frac{D}{\varepsilon} > 0.005$	(10)

Πίνακας 1 : Εκφράσεις υπολογισμού του συντελεστή τριβής F

Υπενθυμίζεται ότι η βασική παράμετρος η οποία χαρακτηρίζει το είδος της ροής (στρωτή ή τυρβώδης) είναι ο αριθμός Reynolds (Re) που ορίζεται από την εξίσωση:

$$\text{Re} = \frac{U \cdot D}{\nu}, \quad (11)$$

όπου U η ταχύτητα του ρευστού στο σωλήνα, D η διάμετρος του σωλήνα και ν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού.

Η μετατροπή της ροής από στρωτή σε τυρβώδη γίνεται όταν ο αριθμός Reynolds ξεπεράσει την τιμή 2000. Σε προβλήματα δικτύων σωληνώσεων η ροή θεωρείται τυρβώδης λόγω των συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα το μήκος των σωληνώσεων είναι μεγάλο ενώ και οι ταχύτητες είναι σχετικά μεγάλες. Το κινηματικό ιξώδες για το νερό στους 20°C που αποτελεί το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο ρευστό είναι $\nu=10^{-6}$.

iii) Chezy-Manning:

$$x = 2$$

$$R = \frac{10.29 \cdot n^2 \cdot L}{K_2 \cdot D^{5.33}}, \quad (12)$$

όπου L το μήκος σωλήνα, D η διάμετρος σωλήνα και n η τραχύτητα κατά Manning και οι συντελεστές $K_2 = 1$ [SI] ή $K_2 = 2,22$ [En]

Στο συνημμένο πίνακα 12 δίνονται οι τραχύτητες αγωγών για τις τρεις παραπάνω εκφράσεις.

3.2.2 Πτώση πίεσης λόγω εξαρτημάτων

Η πτώση πίεσης λόγω εξαρτημάτων σε ένα σωλήνα δίνονται από τη σχέση (2) που μπορεί να μετασχηματιστεί στις εξής

$$\Delta Pf = 0.8265 \cdot \frac{\sum M_i}{D^4} \cdot Q^2 \text{ [SI]}, \quad (13)$$

και

$$\Delta Pf = 0.2517 \cdot \frac{\sum M_i}{D^4} \cdot Q^2 \text{ [EU]}, \quad (14)$$

όπου Q η παροχή υγρού στον αγωγό, D η διάμετρος σωλήνα και i ο συντελεστής για κάθε εξάρτημα του αγωγού. Στις εκφράσεις (13) και (14) τα αποτελέσματα είναι σε SI και EU μονάδες αντίστοιχα.

Ο συντελεστής M_i ορίζεται για κάθε διαφορετικό εξάρτημα που βρίσκεται εντός του αγωγού. Ορισμένες ενδεικτικές τιμές του εμφανίζονται στο συνημμένο πίνακα 13 για ενδεικτικά εξαρτήματα.

3.2.3 Αύξηση πίεσης λόγω αντλιών

Ένα από τα πλέον απαραίτητα εξάρτημα που εμφανίζεται στα δίκτυα σωληνώσεων είναι οι αντλίες. Σε μεγάλα δίκτυα όπου τα μεγάλα μήκη σωληνώσεων και οι μεγάλες ζητήσεις στους κόμβους προκαλούν μεγάλες πτώσεις πίεσης η παρουσία τους είναι σχεδόν επιβεβλημένη έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η παροχή υγρού έως το άκρο του δικτύου. Για τη

μοντελοποίηση τους χρησιμοποιήθηκαν δυο ειδών μοντέλα που περιγράφονται παρακάτω

3.2.3.1 Αντλίες που ορίζονται από 3 σημεία λειτουργίας

Οι αντλίες αυτές δουλεύουν για μια περιοχή παροχών- μανομετρικών υψών όπου δίνονται 3 ή σπανιότερα περισσότερα σημεία της καμπύλης. Από αυτά τα σημεία, υπολογίζεται η αύξηση της πίεσης, με μια σχέση της μορφής

$$\Delta Pp = H_1 - c \cdot Q^m, \quad (15)$$

όπου H_1 είναι το ελάχιστο μανομετρικό ύψος της αντλίας (ένα από τα 3 σημεία), Q είναι η παροχή που περνά μέσα από την αντλία και c, m συντελεστές που υπολογίζονται με παρεμβολή στα 3 γνωστά σημεία λειτουργίας.

3.2.3.2 Αντλίες σταθερής ισχύος

Πρόκειται για αντλίες που δουλεύουν σε συγκεκριμένη τιμή ισχύος. Η αύξηση της πίεσης λόγω της αντλίας δίνεται από μια σχέση της μορφής

$$\Delta Pp = \frac{Pu \cdot C}{Q \cdot \gamma}, \quad (16)$$

όπου Pu η ονομαστική ισχύς της αντλίας, γ ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας, Q η παροχή που περνά μέσα από την αντλία και ο συντελεστής C παίρνει τις τιμές $C=1$ και $C=550$ για μονάδες SI και EU αντίστοιχα.

Η διαφορά μεταξύ των δύο τύπων μοντελοποίησης αντλιών είναι πως οι μεν αντλίες σταθερής ισχύος λειτουργούν για ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας ενώ οι αντλίες με χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργούν για μια περιοχή. Στην πραγματικότητα ο κατασκευαστής κάθε αντλίας του εμπορίου δίνει τη χαρακτηριστική της καμπύλη. Όμως η αντλίες σταθερής ισχύος

αποτελούν μια καλή προσέγγιση κατά το σχεδιασμό και πριν την επιλογή των πραγματικών αντλιών.

3.3 Σύστημα εξισώσεων για το δίκτυο

Το πρώτο μέρος του συστήματος προκύπτει από τις πτώσεις πιέσεων για κάθε κλάδο του δικτύου δίνοντας μας p εξισώσεις, όσες ο αριθμός των σωλήνων. Ενδεικτικά θεωρώντας σαν χρησιμοποιούμενη έκφραση αυτήν των Darcy – Weisbach (4) και θεωρώντας τις αντλίες σταθερής ισχύος (16) το πρώτο μέρος του συστήματος που προκύπτει για τον i σωλήνα έχει τη μορφή:

$$P_{i,j1} - P_{i,j2} = \frac{8 \cdot F_i \cdot L_i}{g \cdot \pi^2 \cdot D_i^5} \cdot Q_i^2 + 0.8265 \cdot \frac{\sum M_i}{D_i^4} \cdot Q_i^2 - \frac{P u_i \cdot C}{Q_i \cdot \gamma_i}, \quad (17)$$

οπού οι συντελεστές $j1$ και $j2$ ο κόμβος αρχής και ο κόμβος τέλους του σωλήνα i

Το δεύτερο μέρος του συστήματος προκύπτει από την εξίσωση συνέχειας σε κάθε κόμβο του δικτύου δίνοντας j εξισώσεις όσες και ο αριθμός των κόμβων. Η εξίσωση συνέχειας για τον j κόμβο έχει τη μορφή:

$$\sum_i (\pm) Q_i - D_j = 0, \quad (18)$$

οπού D_j ζήτηση στον κόμβο j και Q_i η ροή του σωλήνα i που φτάνει ή φεύγει από τον κόμβο j ενώ το πρόσημο \pm χρησιμοποιείται ανάλογα με το αν η ροή έχει φορά προς ή από τον κόμβο

Έχοντας πλέον το σύστημα των εξισώσεων για την πτώση πίεσης σε κάθε κλάδο και τις εξισώσεις διατήρησης μάζας σε κάθε κόμβο μπορούμε να επιλύσουμε το δίκτυο καθώς ο αριθμός των εξισώσεων ($p + j$) είναι ίσος με τον αριθμό των αγνώστων (j πιέσεις στους κόμβους και p παροχές στους αγωγούς). Ο αλγόριθμος PNdes το επιλύει το σύστημα σε αυτή τη μορφή

χρησιμοποιώντας έτοιμες υπορουτίνες για επίλυση μη γραμμικών συστημάτων του MATLAB.

Κατά την επίλυση ένας σημαντικός παράγοντας είναι ο υπολογιστικός χρόνος. Για να κάνουμε λοιπόν τον αλγόριθμο πιο αποδοτικό χρησιμοποιούμε την εξής μέθοδο: Χωρίζουμε το δίκτυο σε βρόχους και ψευδοβρόχους. Βρόχος είναι μια κλειστή διαδρομή σωλήνων, δηλαδή μια διαδρομή με κοινή αρχή και τέλος ενώ ψευδοβρόχος είναι μια διαδρομή μεταξύ δυο κόμβων σταθερής πίεσης, δηλαδή όπου η πίεση είναι δεδομένη, όπως για παράδειγμα δεξαμενές. Σε κάθε βρόχο εφαρμόζουμε το ισοζύγιο ενέργειας:

$$\sum_i (\pm)(\Delta P l_i + \Delta P f_i + \Delta P p_i) = 0. \quad (19)$$

Με αντικατάσταση των όρων μεταβολής πίεσης $\Delta P l$, $\Delta P f$ και $\Delta P p$ από τις σχέσεις (4), (13) και (16) προκύπτει

$$\sum_i \left(\frac{8 \cdot F_i \cdot L_i}{g \cdot \pi^2 \cdot D_i^5} \cdot Q_i^2 + 0.8265 \cdot \frac{\sum M_i}{D_i^4} \cdot Q_i^2 - \frac{P u_i \cdot C}{Q_i \cdot \gamma_i} \right) = 0, \quad (20)$$

οπότε ο δείκτης i αναφέρεται στους σωλήνες που αποτελούν το βρόχο ενώ το πρόσημο \pm χρησιμοποιείται ανάλογα με το αν η φορά του σωλήνα είναι ωρολογιακή ή αντίστροφη αντίστοιχα. Ως φορά του σωλήνα ορίζουμε τη φορά του διανύσματος με αρχή τον κόμβο που έχει οριστεί σαν αρχή του σωλήνα και τέλος τον κόμβο που έχει οριστεί σαν τέλος του σωλήνα

Επίσης σε κάθε ψευδοβρόχο εφαρμόζεται το αντίστοιχο ισοζύγιο ενέργειας

$$\sum_i (\pm)(\Delta P l_i + \Delta P f_i + \Delta P p_i) + \Delta P t = 0, \quad (21)$$

με αντικατάσταση των όρων μεταβολής πίεσης $\Delta P l$, $\Delta P f$ και $\Delta P p$ από τις σχέσεις (4), (13) και (16) προκύπτει

$$\sum_i \left(\frac{8 \cdot F_i \cdot L_i}{g \cdot \pi^2 \cdot D_i^5} \cdot Q_i^2 + 0.8265 \cdot \frac{\sum M_i}{D_i^4} \cdot Q_i^2 - \frac{P u_i \cdot C}{Q_i \cdot \gamma_i} \right) + \Delta P t = 0, \quad (22)$$

όπου όπως και παραπάνω ο δείκτης i αναφέρεται στους σωλήνες που αποτελούν τον ψευδοβρόχο και το πρόσημο \pm χρησιμοποιείται ανάλογα με το αν η φορά του σωλήνα είναι ωρολογιακή ή αντίστροφη αντίστοιχα. Το $\Delta P t$ αναφέρεται στη διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο σταθερής πίεσης κόμβων, δηλαδή του κόμβου αρχής και του κόμβου τέλους του ψευδοβρόχου

Το σύστημα έχει p εξισώσεις με p άγνωστες παροχές, και ισχύει η σχέση:

$$p = j + l + f, \quad (23)$$

όπου p ο αριθμός των σωλήνων, j ο αριθμός των κόμβων, l ο αριθμός των βρόχων και f ο αριθμός των ψευδοβρόχων

Λύνοντας επομένως το σύστημα βρίσκονται οι άγνωστες παροχές στους p κλάδους του δικτύου. Πλέον πολύ εύκολα υπολογίζονται οι πιέσεις στους κόμβους λύνοντας το σύστημα των αρχικών εξισώσεων (17) το οποίο είναι γραμμικό ως προς τις πιέσεις. Τόσο το PIPE2000 όσο και ο πηγαίος κώδικας PNdes μπορούν να φέρουν το σύστημα στην παραπάνω μορφή (χρήση βρόχων και ψευδοβρόχων) επιτυγχάνοντας σαφώς βελτιωμένους υπολογιστικούς χρόνους καθώς περιορίζεται το μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων που απαιτεί τον περισσότερο υπολογιστικό χρόνο σε p εξισώσεις από $p+j$ που είναι στο αρχικό σύστημα.

Πλέον έχοντας επιλύσει το δίκτυο είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε αν βρίσκεται εντός των απαιτήσεων μας και το πως θα συμπεριφερθεί. Επίσης η ίδια διαδικασία μπορεί και συνήθως πρέπει να επαναληφθεί αλλάζοντας τις μεταβλητές απόφασης όπως ο τύπος των αγωγών και των αντλιών ή τα χρησιμοποιούμενα εξαρτήματα. Μάλιστα είμαστε σε θέση ορίζοντας επιθυμητές πιέσεις ή παροχές σε δεδομένες περιοχές του δικτύου το σύστημα να επιλύεται με μεταβλητές όπως τύποι αγωγών και αντλιών που πρέπει να

χρησιμοποιηθούν στο δίκτυο, μειώνοντας ακόμα περισσότερο τον απαιτούμενο χρόνο κατά το σχεδιασμό του δικτύου.

4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ PIPE2000

4.1 Εισαγωγή

Το PIPE2000 αποτελεί ένα ισχυρό υπολογιστικό εργαλείο για το σχεδιασμό και την προσομοίωση δικτύων σωληνώσεων σε μόνιμη ροή ασυμπίεστου ρευστού. Οι δυνατότητες του σε αυτήν την περιοχή είναι πολύ μεγάλες, όντας ταυτόχρονα εύκολο στη χρήση καθώς σε αυτήν του την έκδοση όλα γίνονται σε παραθυρικό περιβάλλον. Έτσι ο μηχανικός είναι σε θέση να σχεδιάσει ένα δίκτυο, να πάρει ακριβή αποτελέσματα και να δει τη συμπεριφορά του δικτύου στη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου.

4.2 Σχεδιασμός και επίλυση δικτύου

Η δημιουργία της γεωμετρίας του δικτύου σωληνώσεων στο PIPE2000 είναι απλή. Αφού οριστεί η κλίμακα και οι χρησιμοποιούμενες μονάδες ο χρήστης τοποθετεί τους κόμβους στο χάρτη και τους συνδέει με αγωγούς. Από εκεί και πέρα επιλέγει από μια ευρεία γκάμα τύπων σωλήνων και εξαρτημάτων που υπάρχουν στις βιβλιοθήκες του προγράμματος.

Για τους σωλήνες η βιβλιοθήκη περιλαμβάνει σωλήνες διαφόρων υλικών όπως πλαστικούς και σιδερένιους με τις τυποποιημένες διαμέτρους τους και την τιμή για την τραχύτητα τους. Τα εξαρτήματα των σωλήνων ορίζονται από τη σχέση (13) και η βιβλιοθήκη του προγράμματος περιλαμβάνει τιμές του συντελεστή K_m για τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα εξαρτήματα όπως συστολικά, συνδέσεις αγωγών τύπου ταυ, τύπου γωνίας και βαλβίδες.

Το σημαντικότερο ίσως στοιχείο είναι η ύπαρξη έτοιμων εξαρτημάτων που μπορούν να προστεθούν στο δίκτυο ρυθμίζοντας την πίεση και την παροχή στους κλάδους του. Ξεκινώντας από τις αντλίες υπάρχουν δύο τύποι αντλιών. Αντλίες σταθερής ισχύος στις οποίες γνωρίζοντας την ισχύ, από τη σχέση (16) προκύπτει η μεταβολή της πίεσης στο ρευστό και αντλίες ορισμού διαγράμματος λειτουργίας στις οποίες ορίζοντας τρία ή περισσότερα σημεία

του διαγράμματος μανομετρικού υψομέτρου- παροχής. Ο αλγόριθμός του PIPE2000 δημιουργεί στην περίπτωση αυτή το διάγραμμα λειτουργίας της αντλίας με χρήση μεθόδων παρεμβολής και από τη σχέση (15) προκύπτει η μεταβολή της πίεσης του ρευστού.

Πολύ σημαντική είναι η ύπαρξη διαφόρων τύπων βαλβίδων που μπορούν να προστεθούν στο δίκτυο ρυθμίζοντας είτε τη ροή είτε την πίεση σε συγκεκριμένα σημεία του. Στο δίκτυο μπορούν να τοποθετηθούν βαλβίδες αντεπιστροφής που επιτρέπουν την ύπαρξη ροής μόνο κατά τη μία φορά του σωλήνα. Σημαντικότερο όμως στοιχείο είναι η δυνατότητα τοποθέτησης ρυθμιστικών βαλβίδων που ελέγχουν είτε την πίεση είτε τη ροή στα ελεγχόμενα σημεία. Πιο συγκεκριμένα υποστηρίζονται τρία είδη ρυθμιστικών βαλβίδων: i) Βαλβίδα ρύθμισης της ροής σε έναν αγωγό η οποία θέτοντας την επιθυμητή τιμή ροής στον αγωγό ρυθμίζει το πόσο ανοικτή θα είναι για να επιτευχθεί. ii) Βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης στην έξοδο της η οποία θέτοντας την επιθυμητή τιμή πίεσης στην έξοδο της βαλβίδας ρυθμίζει το άνοιγμα για να επιτευχθεί αυτή η τιμή. iii) Βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης στην είσοδο της η οποία θέτοντας την επιθυμητή τιμή πίεσης στην είσοδο της βαλβίδας ρυθμίζει το άνοιγμα για να επιτευχθεί αυτή η τιμή. Στα αποτελέσματα του PIPE2000 εμφανίζεται το αν η βαλβίδα ελέγχου πρέπει να είναι πλήρως κλειστή, πλήρως ανοικτή ή σε μια ενδιάμεση θέση για να επιτευχθεί αυτή η τιμή ενώ αν η επιθυμητή τιμή είναι εκτός δυνατοτήτων ελέγχου της βαλβίδας εμφανίζεται ένα μήνυμα προειδοποίησης.

Όσο αφορά τα υπόλοιπα εξαρτήματα το PIPE2000 έχει μια σειρά ειδικών εξαρτημάτων δευτερεύουσας σημασίας όπως ψεκασθήρες ή πυροσβεστικοί κρουνοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο δίκτυο. Επίσης ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει εξαρτήματα πέραν των έτοιμων, ανάλογα με τις ανάγκες του.

Για τις δεξαμενές του δικτύου υπάρχει η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε δεξαμενή σταθερού και μεταβλητού ύψους στάθμης. Στην περίπτωση της προσομοίωσης του δικτύου η δεξαμενή μεταβλητού ύψους στάθμης αδειάζει

μεταβάλλοντας και το μανομετρικό ύψος στον πάτο της. Επίσης η δεξαμενή μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή η οποία δίνεται από το χρήστη.

Για την επίλυση του δικτύου υποστηρίζονται οι εκφράσεις των Hazen-Williams Darcy-Weisbach και Manning (3), (4) και (12) ενώ για το συντελεστή τριβής F χρησιμοποιείται η έκφραση των Swamee-Jain (5). Ο χρήστης ορίζει το κριτήριο σύγκλισης και το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων καθώς και τις το σύστημα μονάδων. Ο αλγόριθμος επίλυσης στηρίζεται στη θεωρία των βρόχων και ψευδοβρόχων δηλαδή στις σχέσεις (18), (20) και (22). Θεωρώντας σαν αρχική συνθήκη μια ταχύτητα ρευστού ανάμεσα σε 4ft/s και 10ft/sec ξεκινάει η επαναληπτική διαδικασία. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται είτε με τη μορφή κειμένου και πινάκων είτε γραφικά πάνω στο χάρτη του δικτύου σωληνώσεων κάνοντας τον έλεγχο τους πολύ πιο απλό.

Κατά την επίλυση του δικτύου ο χρήστης μπορεί να ορίσει μια σειρά από σενάρια όπως το να είναι μια σωλήνα κλειστή ή ανοικτή ή διαφορετικές τιμές για τις καταναλώσεις στους κόμβους. Τα σενάρια επιλύονται ταυτόχρονα και ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να συγκρίνει τα αποτελέσματα. Επίσης η επίλυση μπορεί να γίνει αντίστροφα κάτι που σημαίνει πως ο χρήστης μπορεί να ορίσει σαν μεταβλητές χαρακτηριστικά του δικτύου όπως τύπο σωλήνα, ισχύ αντλίας, έτσι ώστε να εμφανίζεται μια επιθυμητή πίεση σε έναν κόμβο ή μια επιθυμητή παροχή σε έναν κλάδο του δικτύου.

Σε γενικές γραμμές η προσαρμοστικότητα του PIPE2000 είναι ικανοποιητική καθώς όλες οι βιβλιοθήκες εξαρτημάτων και σωληνών είναι άμεσα προσπελάσιμες και διαμορφώσιμες στις απαιτήσεις του χρήστη. Επίσης ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει το δίκτυο, να ορίσει τα χαρακτηριστικά του, να το επιλύσει, και να πάρει τα αποτελέσματα καθώς επίσης να τροποποιήσει όσα στοιχεία απαιτούνται με ιδιαίτερη ευκολία.

4.3 Έλεγχος ακρίβειας μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι εξισώσεις που ορίζουν ένα δίκτυο σωληνώσεων σε σχέση με την πτώση πίεσης είναι εμπειρικές και

προσεγγιστικές, ενώ μεταβλητές όπως η τραχύτητα των αγωγών και ο συντελεστής απωλειών των εξαρτημάτων έχουν αρκετές ανοχές ώστε να κάνουν το μοντέλο ανακριβές. Επομένως πέρα από το μοντέλο απαιτείται κάποια μέθοδος που να δίνει τα όρια ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Αυτήν ακριβώς τη δυνατότητα δίνει το PIPE2000 στο μηχανικό μέσω της διαδικασίας προσαρμογής (Calibration) του δικτύου. Η διαδικασία προσαρμογής είναι απαραίτητη σε υπάρχοντα δίκτυα. Μέσα από πίνακες, ο χρήστης εισάγει δεδομένα για την τραχύτητα των αγωγών και το συντελεστή απωλειών των εξαρτημάτων, ορίζοντας τις ανοχές των τιμών τους. Επίσης σε πίνακες μπορούν να εισαχθούν μετρήσεις από το πραγματικό δίκτυο για τις πιέσεις στους κόμβους και τις παροχές στους κλάδους. Το μοντέλο επίλυσης του PIPE2000 λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω δεδομένα δίνει την περιοχή λειτουργίας του δικτύου σωληνώσεων. Πολύ σημαντικό στην παραπάνω διαδικασία είναι και το μοντέλο γήρανσης των αγωγών: Η τραχύτητα ενός αγωγού μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου και ο χρήστης μπορεί να επιλύσει το δίκτυο για μελλοντικό χρόνο λαμβάνοντας υπ' όψη αυτή τη μεταβολή. Στην πραγματικότητα η διαδικασία του ελέγχου των ανοχών του μοντέλου είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία καθώς ο μηχανικός πρέπει να ελέγξει το πραγματικό δίκτυο με λεπτομέρεια. Το μοντέλο αδυνατεί να προβλέψει πιθανές βλάβες του που επηρεάζουν τις μετρήσεις. Με βάση αυτή τη σκέψη δημιουργήθηκε ο αλγόριθμος διάγνωσης βλαβών σε δίκτυα σωληνώσεων που εξετάζεται παρακάτω.

4.4 Προσομοίωση

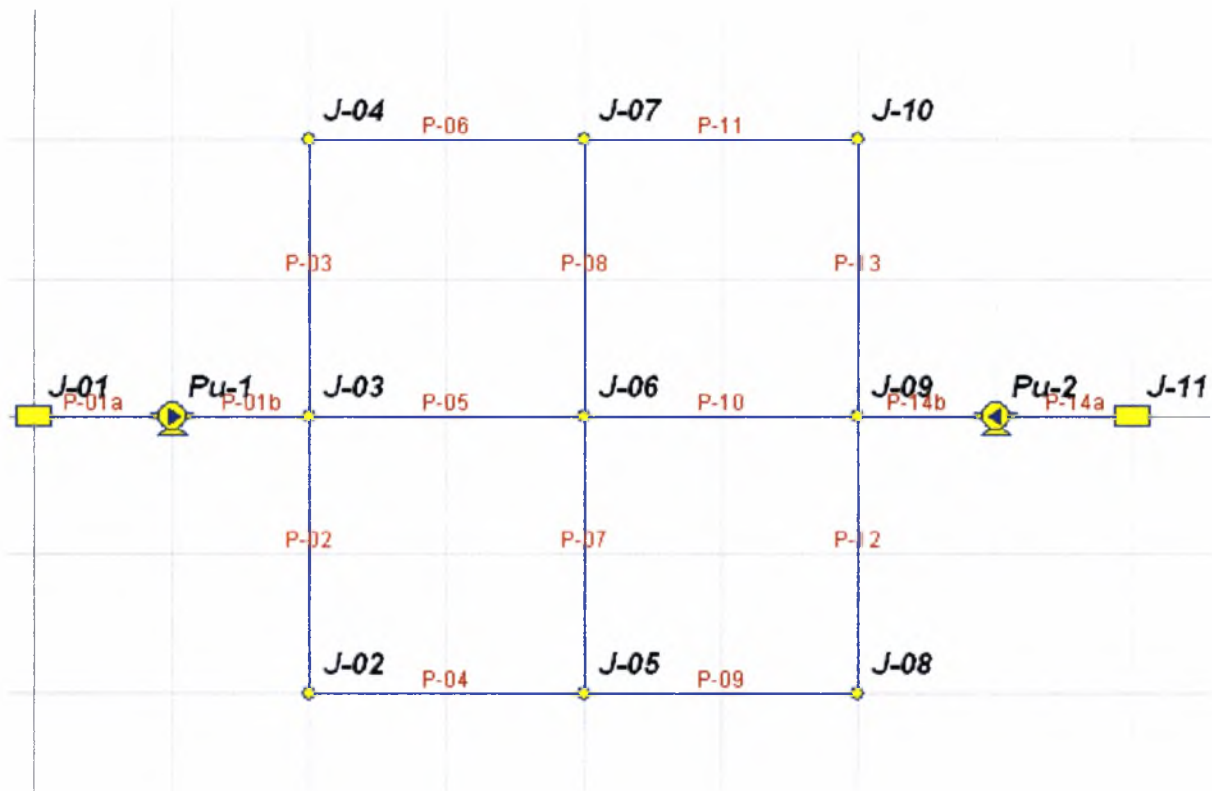
Το PIPE2000 υποστηρίζει τη δυνατότητα προσομοίωσης δικτύων σωληνώσεων για ορισμένη, από το χρήστη, χρονική περίοδο. Η προσομοίωση γίνεται με τη σύνδεση των επιμέρους λύσεων σε διακριτούς χρόνους. Ο χρήστης ορίζει το εύρος της χρονικής περιόδου και το χρονικό βήμα της προσομοίωσης του δικτύου. Σε κάθε χρονικό βήμα ο χρήστης μέσα από πίνακες ορίζει τις μεταβολές που συμβαίνουν στις παραμέτρους του δικτύου και δίνει τη συνάρτηση που ορίζει την κατανάλωση στους κόμβους στους διακριτούς χρόνους. Άλλες μεταβολές όπως ρυθμίσεις αντλιών και βαλβίδων ή κλείσιμο κάποιων κλάδων του δικτύου μπορούν να εισαχθούν στο

μοντέλο. Η προσομοίωση στο μοντέλο των δεξαμενών γίνεται με χρήση της παραγωγού του όγκου ως προς το ύψος στάθμης και ορίζοντας το ύψος μέγιστης και ελάχιστης στάθμης καθώς και η εξωτερική ροή υγρού προς αυτή. Έτσι ανάλογα με την κατανάλωση στο δίκτυο η δεξαμενή αδειάζει ή γεμίζει μεταβάλλοντας την πίεση στον κόμβο και κατ' επέκταση σε όλο το δίκτυο. Αν η δεξαμενή δεν επαρκεί για τις ανάγκες του δικτύου εμφανίζεται σαν σφάλμα στα αποτελέσματα και η επίλυση σταματάει στη χρονική στιγμή που αδειάζει η δεξαμενή. Ο κώδικας που χρησιμοποιείται για να λύσει το δίκτυο για μια χρονική στιγμή και για την προσομοίωση είναι κοινός. Το δίκτυο επιλύεται για κάθε διακριτή χρονική στιγμή όπως έχει οριστεί από το χρήστη. Τα αποτελέσματα μπορούν να εμφανιστούν σε μορφή διαγραμμάτων που συνδέονται μεταξύ τους. Έτσι ο μηχανικός είναι σε θέση να εξετάσει το δίκτυο όχι μόνο σε μια δεδομένη χρονική στιγμή αλλά σε μια περίοδο χρόνου και να εξετάσει την επάρκεια του για τα χρησιμοποιούμενα εξαρτήματα.

4.5 Αποτελέσματα

4.5.1 Εικονικά δίκτυα σωληνώσεων

Στα πλαίσια της εκμάθησης και του ελέγχου του PIPE2000 δημιουργήθηκαν αρκετά εικονικά δίκτυα σωληνώσεων. Ένα από αυτά που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των αλγόριθμων PNdes και PNopt είναι αυτό που ακολουθεί. Αποτελείται από έντεκα κόμβους, εκ των οποίων δύο είναι δεξαμενές, ($j = 11 - 2 = 9$), δεκατέσσερις σωλήνες ($p = 14$) μήκους 200m και τραχύτητας 0.26 mm έκαστος και δύο αντλίες αμέσως μετά τις δεξαμενές. Το συγκεκριμένο δίκτυο επιλέχθηκε καθώς η γεωμετρία του επιτρέπει τον έλεγχο των βρόχων και ψευδοβρόχων. Υπάρχουν τέσσερις βρόχοι ($l = 4$) και ένας ψευδοβρόχος ($f = 1$), επαληθεύοντας έτσι την εξίσωση (23). Η γεωμετρία του δικτύου εμφανίζεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1: Εικονικό δίκτυο 14 αγωγών και 11 κόμβων.

Η επίλυση του δικτύου έγινε με τη χρήση της εξίσωσής Darcy – Weisbach (4) και με χρησιμοποιούμενο ρευστό στο δίκτυο νερό στους 20° C. Οι αγωγοί έχουν μήκος 200m και τραχύτητα 0.26mm. Η ονομαστική ισχύς των αντλιών είναι 100 KW με συντελεστή ισχύος 75% ενώ οι δεξαμενές στους κόμβους 1 και 11 έχουν ύψη στάθμης 55m και 70m αντίστοιχα. Τέλος καθένας από τους σωλήνες 1 και 14 θεωρείται να έχει εξαρτήματα με συντελεστή K_m ίσο με 10.

Στον πίνακα που ακολουθεί εμφανίζονται τα αποτελέσματα που έδωσε η επίλυση με το PIPE2000 για τους σωλήνες και τους κόμβους του δικτύου. Ο πίνακας περιλαμβάνει τις διαμέτρους των σωλήνων, την ταχύτητα και την παροχή του υγρού για κάθε κλάδο του δικτύου. Επίσης δίνονται η ζήτηση, το υπόμετρο, το υδραυλικό ύψος, το ύψος πίεσης και η πίεση για κάθε κλάδο του δικτύου.

Σωλήνας	Κόμβος1	Κόμβος2	Διάμετρος (mm)	Ταχύτητα υγρού (m/sec)	Ροή υγρού (lt/sec)
1	1	3	300	3,31	234,25
2	3	2	250	1,55	75,87
3	3	4	250	0,93	15,53
4	2	5	250	0,32	15,87
5	3	6	200	1,68	52,86
6	4	7	250	0,52	25,53
7	5	6	200	0,95	29,93
8	7	6	200	1.39	73,66
9	5	8	250	1,51	-74,06
10	9	6	200	2.34	73,55
11	10	7	250	0,78	38,14
12	9	8	250	1,92	94,06
13	9	10	250	2	98,14
14	11	9	300	4,04	285,75

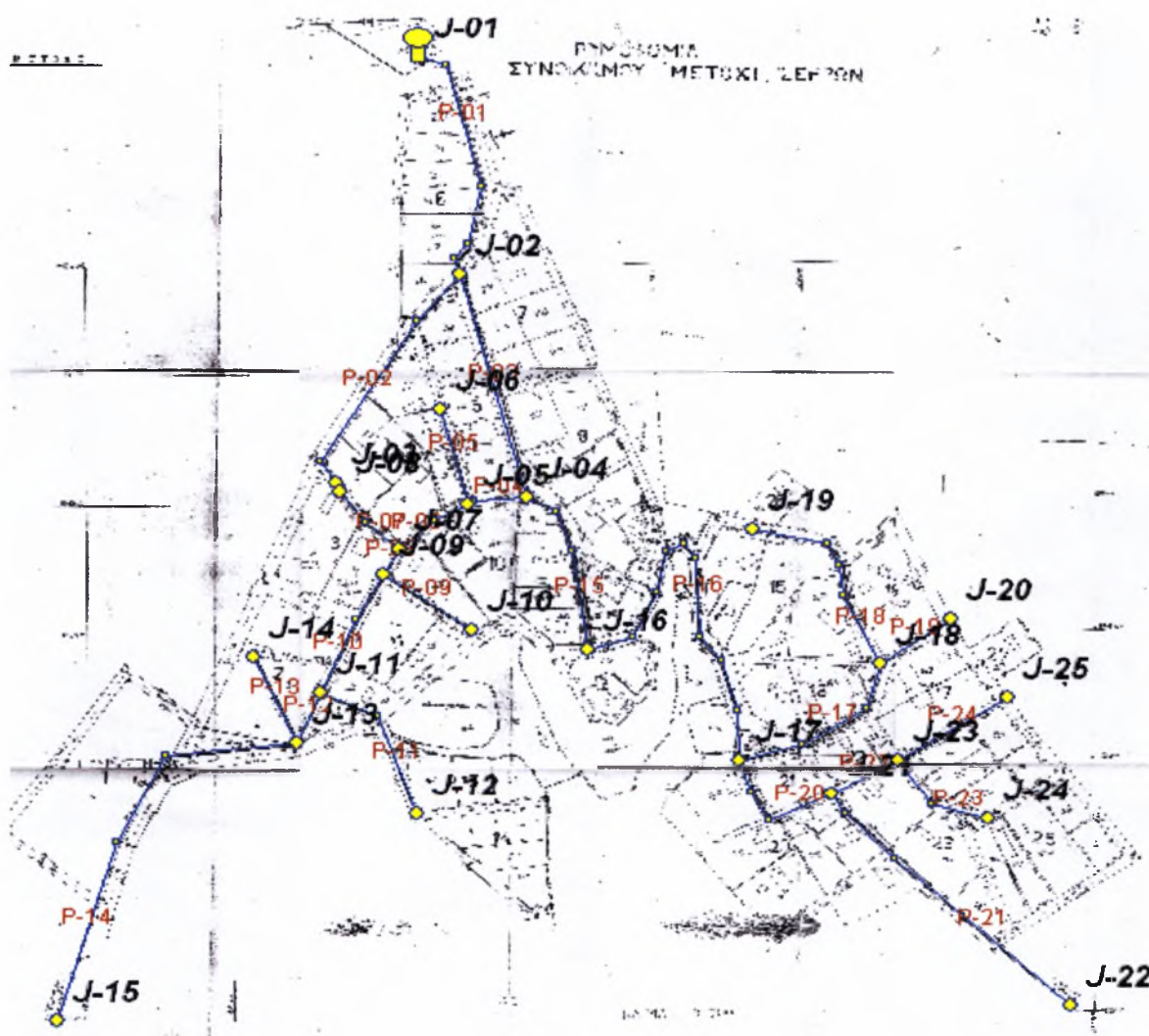
Κόμβος	Ζήτηση (lt/sec)	Υψόμετρο (m)	Υδραυλικό ύψος (m)	Ύψος πίεσης (m)	Πίεση (Kpa)
1	--	50	55	5	49,03
2	60	50	72,79	22,79	223,5
3	60	55	74,81	19,81	194,24
4	20	60	74,06	14,06	137,92
5	60	55	72,69	17,69	173,5
6	200	60	71,66	11,66	114,33
7	20	65	73,82	8,82	86,51
8	20	60	74,62	14,62	143,34
9	20	65	77,69	12,69	124,49
10	60	70	74,35	4,35	42,64
11	--	60	70	10	98.07

Πίνακας 2: Αποτελέσματα φανταστικού δικτύου σχήματος 1.

4.5.2 Πραγματικά δίκτυα σωληνώσεων

4.5.2.1 Δίκτυο υδροδότησης συνοικισμού Μετοχίου Σερρών

Το PIPE2000 αποτελεί ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό από υπηρεσίες ύδρευσης για τη μοντελοποίηση των υπό κατασκευή δικτύων σωληνώσεων. Σε αυτό το πλαίσιο είχαμε τη δυνατότητα να επιλύσουμε το δίκτυο υδροδότησης του συνοικισμού Μετόχι Σερρών όπως μας ζητήθηκε από τη δημοτική επιχείρηση ύδρευσης και αποχέτευσης Σερρών.



Σχήμα 2 : Δίκτυο υδροδότησης συνοικισμού Μετόχι Σερρών.

Ουσιαστικά πρόκειται για ένα απλό δίκτυο 24 σωλήνων και 25 κόμβων με μια δεξαμενή σε μεγάλο υψόμετρο και μια σειρά από οικιακές καταναλώσεις όπως εμφανίζεται και στο σχήμα 2.

Για την επίλυση του δικτύου επιλέχθηκε η έκφραση Hazen-Williams (3). Η δεξαμενή στον κόμβο 1 έχει ύψος στάθμης 302.5m και δίνει μια παροχή στο δίκτυο ίση με 0.73 l/sec.

Το σημαντικότερο στην παραπάνω διαδικασία ήταν ο σχεδιασμός του δικτύου σε χάρτη που μας επέτρεψε ορίζοντας μόνο την κλίμακα του να σχεδιάσουμε το δίκτυο και να οριστούν όλα τα μήκη αυτόματα. Είχαμε την ευκαιρία να επαληθεύσουμε τα αποτελέσματα με τα πραγματικά δεδομένα του δικτύου και φάνηκε η ακρίβεια που προσφέρει ο αλγόριθμος του PIPE2000. Επίσης αυξάνοντας τις καταναλώσεις στους κόμβους του δικτύου, όπως συμβαίνει τους καλοκαιρινούς μήνες, επαληθεύτηκε ο ισχυρισμός της ΔΕΥΑΣ, δηλαδή πως η πίεση του δικτύου δεν επαρκεί σε τέτοιες συνθήκες και απαιτούνται κάποιες τροποποιήσεις αν ο πλυθισμός του συνοικισμού αυξηθεί.

Στους πίνακες που ακολουθούν εμφανίζονται τα δεδομένα και τα αποτελέσματα της επίλυσης του δικτύου με το PIPE2000. Στον πίνακα 3 εμφανίζονται στοιχεία για τους σωλήνες δηλαδή διάμετρος, τραχύτητα, μήκος και οι κόμβοι αρχής και τέλους του καθενός καθώς και η υπολογιζόμενη παροχή. Στον πίνακα 4 εμφανίζονται το υψόμετρο και η ζήτηση για κάθε κόμβο και σαν αποτελέσματα, το υδραυλικό ύψος, το ύψος πίεσης και η πίεση σε κάθε κόμβο.

Σωλήνας	Κόμβος1	Κόμβος2	Διάμετρος (mm)	Μήκος (m)	Τραχύτητα	Ροή υγρού (lt/sec)
01	01	02	90	188.665	140	0,73
02	02	03	63	192.188	90	0,02
03	02	04	80	177.188	90	0,67
04	04	05	80	42.899	90	0,33
05	05	06	60	75.199	90	0,02
06	05	07	80	57.981	90	0,26
07	07	08	60	60.092	90	0,02
08	07	09	80	23.124	90	0,2
09	09	10	60	74.879	90	0,02
10	09	11	80	100.332	90	0,14
11	11	12	60	124.312	90	0,02
12	11	13	80	42.555	90	0,08
13	13	14	60	73.294	90	0,02
14	13	15	90	1300	140	0,02
15	04	16	80	131.275	90	0,29
16	16	17	80	291.807	90	0,26
17	17	18	80	132.7	90	0,08
18	18	19	60	152.968	90	0,02
19	18	20	60	61.099	90	0,02
20	17	21	60	99.102	90	0,14
21	21	22	63	235.415	140	0,02
22	21	23	60	53.288	90	0,08
23	23	24	60	82.92	90	0,02
24	23	25	60	90.581	90	0,02

Πίνακας 3: Δεδομένα και αποτελέσματα σωλήνων δικτύου υδροδότησης στο Μετόχι Σερρών

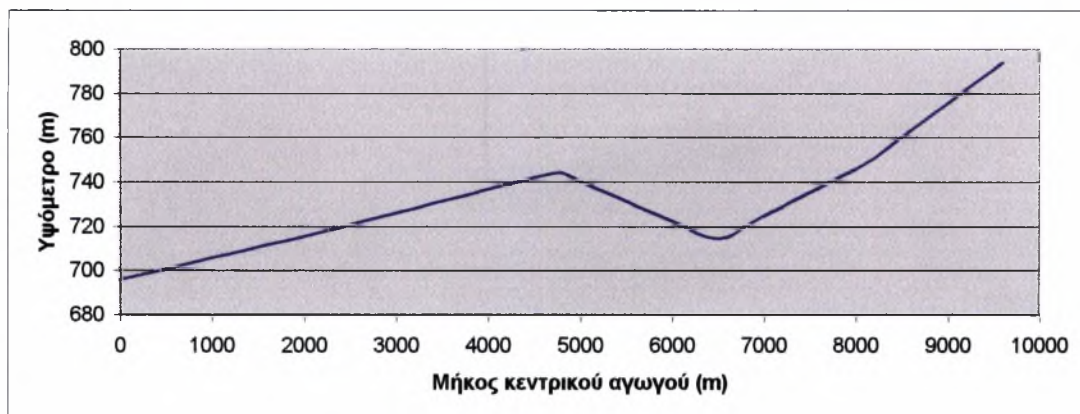
Κόμβος	Υψόμετρο (m)	Ζήτηση (l/sec)	Υδραυλικό ύψος (m)	Ύψος πίεσης (m)	Πίεση (Κρα)
01	300	--	302,50	2,5	24,52
02	280	0.05	302,46	22,46	220,25
03	275	0.02	302,46	27,46	269,28
04	270	0.05	302,33	32,33	317,03
05	270	0.05	302,32	32,32	316,95
06	275	0.02	302,32	27,32	267,91
07	270	0.05	302,31	32,31	316,87
08	275	0.02	302,31	27,31	267,84
09	270	0.05	302,31	32,31	316,85
10	268	0.02	302,31	34,31	336,47
11	268	0.05	302,31	34,31	336,43
12	260	0.02	302,31	42,31	414,88
13	268	0.05	302,31	34,31	336,42
14	270	0.02	302,31	32,31	316,81
15	260	0.02	302,31	42,31	414,87
16	255	0.03	302,31	47,31	463,92
17	253	0.05	302,27	49,27	483,15
18	270	0.05	302,27	32,27	316,42
19	270	0.02	302,27	32,27	316,42
20	280	0.02	302,27	22,27	218,35
21	260	0.05	302,25	42,25	414,35
22	260	0.02	302,25	42,25	414,34
23	270	0.05	302,25	32,25	316,25
24	270	0.02	302,25	32,25	316,25
25	280	0.02	302,25	22,25	218,18

Πίνακας 4: Δεδομένα και αποτελέσματα κόμβων δικτύου υδροδότησης στο Μετόχι Σερρών

4.5.2.2 Δίκτυο διαβροχής ταινιοδρόμων τέφρας και δρόμου κίνησης οχημάτων για το λιγνιτικό κέντρο Πτολεμαΐδας

Αντικείμενο του έργου ήταν η κατασκευή ενός δικτύου σωληνώσεων για τον ψεκασμό της τέφρας λιγνίτη με σκοπό την καταστολή της σκόνης που παράγεται κατά τη μεταφορά του σε αυτές τις περιοχές. Η μεταφορά του λιγνίτη γίνεται με τη χρήση ταινιοδρόμων συνολικού μήκους 9591 m, και από παράλληλο δρόμο με τη χρήση οχημάτων. Τόσο οι ταινιοδρόμοι όσο και ο δρόμος ψεκάζονται με νερό ενώ τα φορτηγά αμέσως μετά το γέμισμα τους επίσης ψεκάζονται με νερό. Επίσης για την περιστασιακή αποθήκευση του λιγνίτη χρησιμοποιείται μια τάφρος λιγνίτη που επίσης ψεκάζεται και από την οποία γεμίζονται τα φορτηγά. Το όλο σύστημα τροφοδοτείται από μια μεγάλη δεξαμενή στην αρχή του, όγκου 2000 m³, ενώ για την ασφάλεια του παρεμβάλλονται δύο ακόμα δεξαμενές κατά μήκος του.

Πρέπει να τονιστεί πως το δίκτυο περιλαμβάνει μια σειρά από εξαρτήματα: Κάθε δεξαμενή έχει ένα αντλιοστάσιο με δύο αντλίες, ρυθμιστικές βαλβίδες ελέγχουν την παροχή στους κλάδους του δικτύου έτσι ώστε η παροχή να είναι ίση με τη ζήτηση, ενώ πριν από κάθε ψεκαστήρα υπάρχει μια ρυθμιστική βαλβίδα για τη μείωση της πίεσης στην περιοχή λειτουργίας του ψεκαστήρα. Η δυσκολία μοντελοποίησης και επίλυσης του δικτύου πηγάζει από το πλήθος των εξαρτημάτων του δικτύου και την έλλειψη δεδομένων που έπρεπε να υπολογιστούν και όχι από την πολύπλοκη γεωμετρία του. Στο συνημμένο σχέδιο 3 εμφανίζεται μια κάτοψη του δικτύου όπως μοντελοποιήθηκε στο PIPE2000 ενώ στο σχέδιο που ακολουθεί εμφανίζεται η μηκοτομή του δικτύου.



Σχήμα 3: Μηκοτομή δικτύου ΑΗΣ Πτολεμαΐδας

Οι δεξαμενές 1,2,3 έχουν ύψος στάθμης 676 m, 707.2 m, 745 m. Η επιλογή του κεντρικού αγωγού έγινε με βάση την παραδοχή πως η ταχύτητα του υγρού είναι περίπου ίση με 1,5m/sec, έτσι ο αγωγός διαιρέθηκε σε τρία τμήματα, από τη δεξαμενή 1 έως τη δεξαμενή 2 με διάμετρο 300mm, από τη δεξαμενή 2 έως τη δεξαμενή 3 με διάμετρο 250mm και από τη δεξαμενή 3 έως το τέλος με διάμετρο 180mm. Οι σωλήνες που οδηγούν στους ψεκαστήρες των ταινιόδρομων έχουν διάμετρο 60mm, αυτοί που οδηγούν στους ψεκαστήρες της τάφρου έχουν διάμετρο 165mm, ενώ εκείνοι που οδηγούν στους ψεκαστήρες του δρόμου 85mm. Όλοι οι σωλήνες είναι πλαστικοί με τραχύτητα κατά Hazen-Williams ίση με 140. Στον πίνακα που ακολουθεί εμφανίζεται η ροή που ψεκάζεται στους τέσσερις τύπους ψεκαστήρων και η πίεση που απαιτείται και ρυθμίζεται μέσω των βαλβίδων.

Ψεκαστήρες	Ζήτηση (lt/sec)	Πίεση (kPa)
Ταινιόδρομων	4.167	200
Δρόμου	0.245	400
Τάφρου	33.33	800
Φορηγών	8.87	400

Πίνακας 5: Δεδομένα ψεκαστήρων δικτύου ΑΗΣ Πτολεμαΐδας

Οι ψεκαστήρες δεν λειτουργούν όλοι ταυτόχρονα αλλά υπάρχει πρόγραμμα λειτουργίας έτσι ώστε σε κάθε ώρα εργασίας του σταθμού να ψεκάζεται όλα τα σημεία. Έτσι προέκυψε ένα απλοποιημένο δίκτυο με παροχές σε συγκεκριμένους κόμβους.

Για την επιλογή αντλιών χρησιμοποιήθηκε ο αντίστροφος σχεδιασμός του PIPE2000. Θέτοντας σαν ελάχιστη πίεση για το δίκτυο 600 kPa το PIPE2000 υπολόγισε τις ισχύς των αντλιοστασίων 1, 2, 3 ίσες με 120kW, 150kW και 65kW αντίστοιχα. Για κάθε αντλιοστάσιο θεωρήθηκαν δύο αντλίες, η πρώτη να καλύπτει τις ανάγκες των ταινιόδρομων και η δεύτερη τις ανάγκες των υπολοίπων ζητήσεων. Στον επόμενο πίνακα εμφανίζονται οι ισχύς των αντλιών:

Αντλιοστάσιο	Ισχύς αντλίας 1 (kW)	Ισχύς αντλίας 2 (kW)	Ισχύς αντλιοστασίου (kW)
1	44	75	119
2	56	93	149
3	34	31	65

Πίνακας 6: Αποτελέσματα για τις χρησιμοποιούμενες αντλίες στο δίκτυο ΑΗΣ Πτολεμαΐδας

Αφού ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός με το PIPE2000 προχωρήσαμε στην επίλυση, που έδωσε τα αναμενόμενα αποτελέσματα δηλαδή το δίκτυο λειτουργεί στα πλαίσια των πιέσεων που ορίστηκαν και απαιτούνται. Μάλιστα τα αποτελέσματα επαληθεύτηκαν από τα δεδομένα του πραγματικού δικτύου.

4.6 Συμπεράσματα

Τα παραπάνω παραδείγματα και μια σειρά άλλων εικονικών δικτύων που επιλύθηκαν μας έδωσαν την ευκαιρία να διαπιστώσουμε την ευχρηστία και την ακρίβεια του PIPE2000. Καταρχάς η ακρίβεια των αποτελεσμάτων ελέγχθηκε με παραδείγματα μέσα από τη βιβλιογραφία [2]. Στα εικονικά δίκτυα



μπορέσαμε να ελέγξουμε τις περισσότερες δυνατότητες που προσφέρει το PIPE2000 όσο αφορά τα εξαρτήματα του δικτύου και την ακρίβεια των τριών εκφράσεων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων.

Με βάση την παραπάνω εμπειρία επιλύθηκε το δίκτυο υδροδότησης στο Μετόχι Σερρών. Τέλος με το δίκτυο διαβροχής ταινιόδρομων μεταφοράς λιγνίτη για τη ΔΕΗ προχωρήσαμε στο σχεδιασμό του δικτύου με βάση τις επιθυμητές συνθήκες όσο αφορά πιέσεις σε κόμβους και ταχύτητες σε αγωγούς. Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα με τα πραγματικά δεδομένα αποδείχθηκε η αξιοπιστία του αλγορίθμου του PIPE2000 σε πραγματικές συνθήκες χωρίς μάλιστα να χρησιμοποιηθούν όλες οι δυνατότητες του στο Calibration του δικτύου.

5. ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΕ MATLAB

5.1 Εισαγωγή

Έχοντας κατανοήσει το λογισμικό PIPE2000 προχωρήσαμε στην ανάπτυξη του πηγαίου κώδικα PNdes για την επίλυση δικτύων σωληνώσεων οποιασδήποτε γεωμετρίας. Το μοντέλο δημιουργήθηκε σε MATLAB καθώς προσφέρει μεγάλη ευελιξία στο χειρισμό των δεδομένων και των πινάκων που είναι απαραίτητοι για την οργάνωση του αλγορίθμου. Επίσης η ύπαρξη βιβλιοθηκών αλγορίθμων επιτάχυνε τη διαδικασία προγραμματισμού. Οι βάσεις δεδομένων είναι περιορισμένες αλλά υπάρχουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην πρόσβαση στον πηγαίο κώδικα.

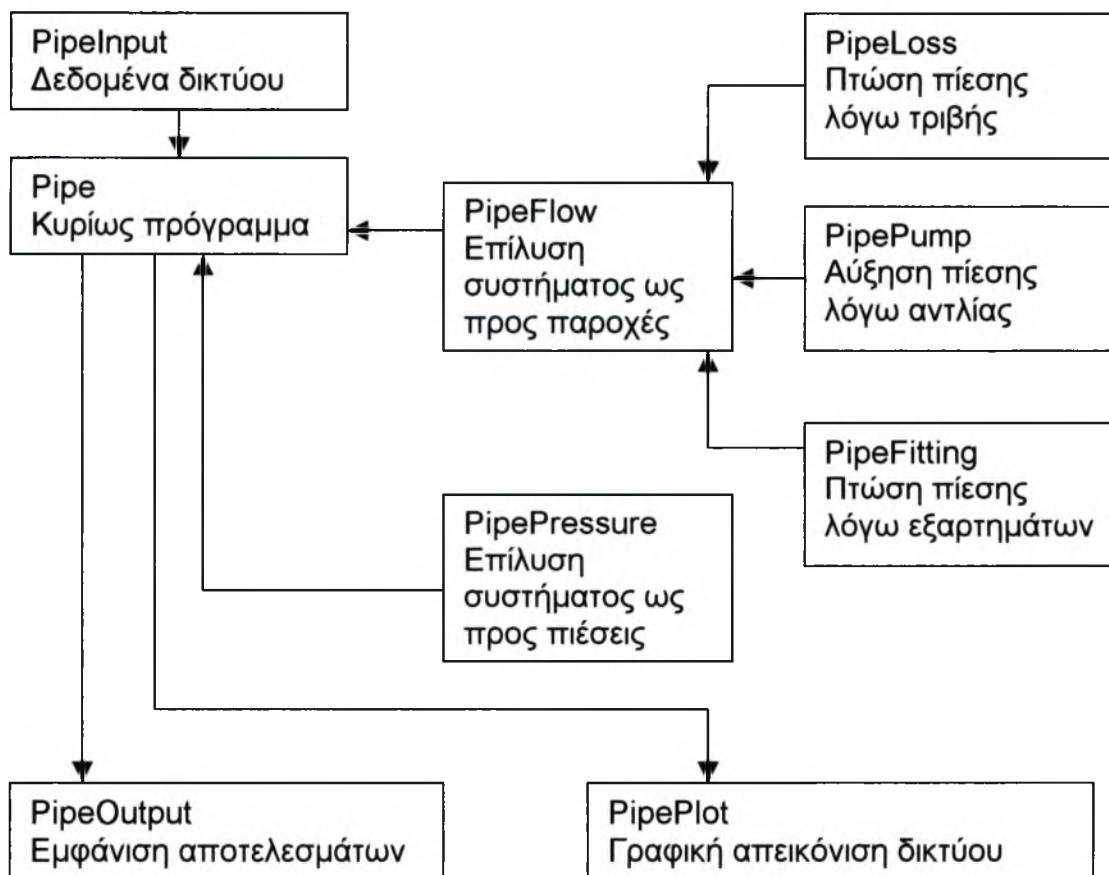
5.2 Δομή του αλγορίθμου

Η δομή του PNdes στηρίζεται σε μια σειρά από υπορουτίνες που δημιουργούν το σύστημα των εξισώσεων, το επιλύουν και παρουσιάζουν τα αποτελέσματα. Σε μια υπορουτίνα εισάγονται όλα τα δεδομένα για τη γεωμετρία και τις παραμέτρους του δικτύου με τη μορφή πινάκων. Ειδικότερα για κάθε κόμβο δίνονται οι συντεταγμένες χώρου και η ζήτηση. Για κάθε αγωγό δίνεται ο κόμβος αρχής και τέλους, η τιμή της τραχύτητας και ο συντελεστής απωλειών λόγω εξαρτημάτων. Σε ξεχωριστούς πίνακες εισάγονται τα δεδομένα για τις αντλίες, τις δεξαμενές και τους βρόχους και ψευδοβρόχους που τυχόν υπάρχουν στο δίκτυο. Για κάθε αντλία καθορίζεται ο αγωγός στον οποίο τοποθετείται και η ισχύς της. Όμοια για κάθε δεξαμενή προσδιορίζεται ο κόμβος στον οποίο βρίσκεται και η στάθμη της. Τέλος ορίζονται οι σωλήνες που αποτελούν κάθε βρόχο και ψευδοβρόχο του δικτύου.

Η μεταβολή της πίεσης, για κάθε κλάδο του δικτύου, υπολογίζεται με την εφαρμογή τριών υπορουτινών. Η πρώτη δίνει την πτώση πίεσης λόγω τριβών του ρευστού με τα τοιχώματα, βασιζόμενη στις έκφραση των Darcy-Weisbach (4) και των Swamee-Jain (6) για το συντελεστή τριβής F . Η δεύτερη

χρησιμοποιώντας την έκφραση (13) δίνει την πτώση πίεσης λόγω εξαρτημάτων, ενώ η τρίτη δίνει την αύξηση πίεσης στην περίπτωση που υπάρχει αντλία στον κλάδο. Η αντλία μοντελοποιείται ως “αντλία σταθερής ισχύος” μέσω της σχέσης (16). Μια επιπλέον υπορουτίνα δημιουργεί το προς επίλυση σύστημα μέσω των σχέσεων (18), (20) και (22). Το μη γραμμικό, ως προς τις παροχές, σύστημα που προκύπτει, επιλύεται με χρήση έτοιμων υπορουτινών από τη βιβλιοθήκη αλγορίθμων του MATLAB δίνοντας τις παροχές σε κάθε κλάδο του δικτύου. Έχοντας υπολογίσει τις παροχές και αντικαθιστώντας αυτές στις εξισώσεις (17) επιλύεται το γραμμικό, ως προς τις πιέσεις, σύστημα και έτσι ολοκληρώνεται η επίλυση του δικτύου. Τέλος δύο επιπλέον υπορουτίνες σχηματίζουν το σκαρίφημα του δικτύου, έτσι ώστε να είναι εύκολος ο έλεγχός του και εμφανίζουν τα αποτελέσματα, είτε στην οθόνη, είτε σε κάποιο αρχείο που επιλέγουμε.

Η δομή του αλγορίθμου συνοψίζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 4: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου PNdes.

5.3 Αποτελέσματα

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων του κώδικα PNdes προχωρήσαμε στη σύγκριση του με αποτελέσματα από το PIPE2000. Ένα από τα εικονικά δίκτυα που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτό του σχήματος 1 που επιλύθηκε με το PNdes για τα ίδια δεδομένα. Στους πίνακες 7 και 8 που ακολουθούν εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τους σωλήνες και τους κόμβους του δικτύου αντίστοιχα μετά την επίλυση του δικτύου με τον πηγαίο κώδικα PNdes.

Σωλήνας	Κόμβος 1	Κόμβος 2	Διαμετρος (mm)	Ροή (lt/sec)	Ταχύτητα (m/sec)
1	1	3	300	234.25	3.32
2	3	2	250	75.86	1.55
3	3	4	250	45.52	0.93
4	2	5	250	15.86	0.32
5	3	6	200	52.86	1.68
6	4	7	250	25.52	0.52
7	5	6	200	29.93	0.95
8	7	6	200	43.66	1.39
9	5	8	250	-74.07	-1.51
10	9	6	200	73.55	2.34
11	10	7	250	38.14	0.78
12	9	8	250	94.07	1.92
13	9	10	250	98.14	2.00
14	11	9	300	285.75	4.04

Πίνακας 7: Αποτελέσματα σωλήνων για το δίκτυο σωληνώσεων του σχήματος 1 με επίλυση σε PNdes.

Κόμβος	X (m)	Ψ (m)	Z (m)	Ζήτηση (lt/sec)	Πίεση (kPa)	Ύψος πίεσης (m)
1	0	0	50	--	49.05	5.00
2	200	-200	50	0.06	223.49	22.79
3	200	0	55	0.06	194.23	19.81
4	200	200	60	0.02	137.89	14.06
5	400	-200	55	0.06	173.48	17.69
6	400	0	60	0.20	114.28	11.65
7	400	200	65	0.02	86.46	8.82
8	600	-200	60	0.02	143.31	14.61
9	600	0	65	0.02	124.46	12.69
10	600	200	70	0.06	42.58	4.34
11	800	0	60	--	98.10	10.00

Πίνακας 8: Δεδομένα και αποτελέσματα κόμβων για το δίκτυο σωληνώσεων του σχήματος 1 με επίλυση σε PNdes.

5.4 Συμπεράσματα

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του PNdes με τον εμπορικό κώδικα PIPE2000 αποδεικνύει την ακρίβεια του πηγαίου κώδικα μας. Οι αποκλίσεις που προέκυψαν είναι πολύ μικρές και οφείλονται στην ακρίβεια των χρησιμοποιούμενων μεθόδων επίλυσης και στην ακρίβεια των δεδομένων η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι ελέγξιμη στο PIPE2000. Η σύγκριση αποτελεσμάτων επεκτάθηκε και σε άλλα εικονικά δίκτυα τόσο με τη χρήση του PIPE2000 όσο και από τη βιβλιογραφία έτσι ώστε να υπάρχει βεβαιότητα για την ακρίβεια του PNdes.

Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι η δυνατότητα επέκτασης του αλγορίθμου PNdes, μια δυνατότητα που δεν υπάρχει στους εμπορικούς κώδικες όπως το PIPE2000 στους οποίους ο χρήστης αγοράζει την εκτελέσιμη μορφή του κώδικα και δεν έχει περιθώρια τροποποίησης. Άλλωστε ο αλγόριθμος PNdes επεκτάθηκε πρώτα σε τεχνικές βελτιστοποίησης και έπειτα σε τεχνικές διάγνωσης βλαβών που αναπτύσσονται στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Το μειονέκτημα αλγορίθμων σαν τον PNdcs σε σχέση με τα εμπορικά πακέτα είναι η έλλειψη βάσεων δεδομένων και η μικρότερη ευχρηστία. Δεν πρέπει όμως να ξεχνάμε πως το PIPE2000 είναι ένα εμπορικό πακέτο που βελτιώνεται τα τελευταία 10 χρόνια από την εποχή δηλαδή που λανσαρίστηκε στην αγορά λογισμικού. Μάλιστα αυτή τη στιγμή βρίσκεται στην τέταρτη έκδοση του που αποτελεί ουσιαστικά την πρώτη που διαθέτει ένα πλήρες παραθυρικό περιβάλλον εργασίας.

6. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Το τρίτο μέρος της εργασίας επικεντρώνεται στην βελτιστοποίηση κατά τον σχεδιασμό του δικτύου. Το κριτήριο για τον βέλτιστο σχεδιασμό είναι το συνολικό κόστος του δικτύου που περιλαμβάνει τα κόστη εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης του δικτύου. Για ένα δίκτυο σωληνώσεων με προκαθορισμένη γεωμετρία ακολουθείται μια διαδικασία ελαχιστοποίησης του κόστους με μεταβλητές τις διαμέτρους των αγωγών και τις ισχύεις των αντλιών. Είναι προφανές ότι ένα δίκτυο με μεγάλες διαμέτρους σωλήνων συνεπάγεται υψηλό κόστος εγκατάστασης αλλά χαμηλό κόστος λειτουργίας λόγω μειωμένων τριβών και επομένως μικρότερης απαιτούμενης ισχύς αντλιών. Ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος καλύπτοντας βέβαια τις προδιαγραφές.

Τα περισσότερα εμπορικά πακέτα (συμπεριλαμβανομένου του PIPE2000) δεν έχουν τη δυνατότητα βελτιστοποίησης, αυτή τουλάχιστον τη στιγμή. Συνήθως οι μηχανικοί χρησιμοποιούν επαναληπτικές μεθόδους επιλύοντας το δίκτυο με βάση μια αρχική εκτίμηση για τις διαμέτρους των αγωγών και τις ισχύεις των αντλιών. Σε κάθε επανάληψη τροποποιείται ένα στοιχείο σχεδιασμού και το νέο αποτέλεσμα συγκρίνεται με το προηγούμενο. Η μέθοδος αυτή είναι χρονοβόρα και ανακριβής ειδικά για μεγάλα δίκτυα σωληνώσεων. Η ύπαρξη επομένως ενός εργαλείου που ορίζοντας του την γεωμετρία του δικτύου δίνει το βέλτιστο αποτέλεσμα “λύνει τα χέρια” του μηχανικού.

Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης μπορεί να χωριστεί σε τρία επιμέρους τμήματα. Το πρώτο μέρος αποτελείται από τις εξισώσεις που επιλύουν το δίκτυο και περιγράφηκαν εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια. Στο δεύτερο τμήμα ορίζεται η εξίσωση κόστους του δικτύου που αποτελεί και την προς βελτιστοποίηση συνάρτηση. Τέλος το τρίτο μέρος αναφέρεται στους χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους για την βελτιστοποίηση.

6.2 Εξισώσεις του δικτύου σωληνώσεων

Οι εξισώσεις που επιτρέπουν την επίλυση ενός δικτύου σωληνώσεων αναφέρθηκαν εκτενώς στο κεφάλαιο 3. Για τον αλγόριθμο στο MATLAB επιλέχθηκε με βάση την ακρίβεια των αποτελεσμάτων η έκφραση των Darcy – Weisbach (4). Επίσης επιλέχθηκε ο ορισμός των αντλιών ως “σταθερής ισχύος” (16) καθώς η ισχύς είναι μία από τις υπολογιζόμενες μεταβλητές.

6.3 Ορισμός της συνάρτησης κόστους

Όπως τονίστηκε και παραπάνω, το συνολικό κόστος ενός δικτύου είναι το άθροισμα του κόστους εγκατάστασης, των λειτουργικών εξόδων και των εξόδων συντήρησης. Τα κόστη αυτά εξετάζονται με λεπτομέρεια παρακάτω.

6.3.1 Κόστος εγκατάστασης

Το συνολικό κόστος εγκατάστασης ενός κλάδου του δικτύου είναι:

$$C_{c_i} = a \cdot (C_{x_i} + C_{p_i}) \quad (24)$$

όπου C_{x_i} το κόστος αγοράς των εξαρτημάτων, C_{p_i} το κόστος αγοράς των αγωγών και a ο συντελεστής προσαύξησης του κόστους αγοράς εξαρτημάτων και αγωγών που αποδίδει το συνολικό κόστος κατασκευής του δικτύου, όπως το κόστος σχεδιασμού και τα εργατικά έξοδα. Από την εμπειρία ο συντελεστής a βρίσκεται μεταξύ των τιμών 2 – 3. Στον αλγόριθμο θεωρήθηκε ότι $a=3$. Βέβαια αυτή η υπόθεση είναι αυθαίρετη και θα πρέπει να επανεξετάζεται ανάλογα με τις ειδικές ανάγκες.

Θεωρούμε ότι το κόστος αγοράς αγωγών C_{p_i} για κάθε κλάδο του δικτύου υπολογίζεται από μία σχέση της μορφής:

$$C_{p_i} = P_n(D_i) \cdot L_i \quad (25)$$

όπου L_i το μήκος αγωγού, D_i η διάμετρος αγωγού και $P_n(D_i)$ η συνάρτηση που δίνει το κόστος του αγωγού ως προς το μήκος του. Χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες τιμές σωληνώσεων εφαρμόζεται μια μέθοδος παρεμβολής και υπολογίζεται η συνάρτηση $P_n(D_i)$. Στον αλγόριθμο επιλέγεται ένα πολυώνυμο 4^{ου} βαθμού που δίνει ακριβή αποτελέσματα, περιορίζοντας παράλληλα την υπολογιστική προσπάθεια κατά την βελτιστοποίηση.

Επίσης για όλα τον υπόλοιπο εξοπλισμό σε έναν κλάδο του δικτύου θεωρούμε ένα σταθερό κόστος C_{x_i} . Η παραδοχή αυτή είναι αρκετά απλοϊκή. Σε πολλές περιπτώσεις η αλλαγή των διαμέτρων των σωληνώσεων συνεπάγεται και αλλαγή του εξοπλισμού.

6.3.2 Λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης

Το λειτουργικό κόστος ενός δικτύου προέρχεται από τις αντλίες και την ηλεκτρική ενέργεια που αυτές καταναλώνουν. Σε κάθε κλάδο του δικτύου θεωρούμε μια αντλία. Στους κλάδους όπου δεν υπάρχει αντλία, θεωρούμε μία με μηδενική ισχύ, οπότε το λειτουργικό κόστος στον i κλάδο του δικτύου είναι:

$$C_{op_i} = C_{kwh} \cdot h \cdot N \cdot Pu_i \quad (26)$$

όπου C_{kwh} το κόστος KWh, έχει θεωρηθεί 15 δρχ/KWh, h οι ώρες λειτουργίας του δικτύου ανά έτος, N τα έτη λειτουργίας του δικτύου και Pu_i : ισχύς της αντλίας του κλάδου

Το κόστος συντήρησης του δικτύου C_{ox} θεωρείται, στην παρούσα μελέτη, σταθερό. Η παραδοχή είναι λογική. Ανάλογα βέβαια με τις εκάστοτε συνθήκες είναι δυνατό το κόστος συντήρησης να δίνεται σαν συνάρτηση του χρόνου.

6.3.3 Συνολικό κόστος

Το συνολικό κόστος ενός κλάδου του δικτύου είναι το άθροισμα των παραπάνω επιμέρους εκφράσεων δηλαδή:

$$C_i = Cc_i + Cop_i + Cox_i = [a \cdot (Cx_i + Cp_i) + Cox_i + Cop_i] \quad (27)$$

Επομένως το συνολικό κόστος του δικτύου είναι:

$$C = \sum_i Cc_i + Cop_i + Cox_i = \sum_i [a \cdot (Cx_i + Cp_i) + Cox_i + Cop_i]. \quad (28)$$

6.4 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης

Ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Γενικά η αύξηση της διαμέτρου των χρησιμοποιούμενων αγωγών σε ένα δίκτυο σωληνώσεων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους εγκατάστασης. Ταυτόχρονα όμως απαιτούνται αντλίες χαμηλότερης ισχύος στο σύστημα για να διακινηθεί το υγρό, επομένως το κόστος λειτουργίας μειώνεται.

Η εξίσωση (28) αποτελεί επομένως την αντικειμενική συνάρτηση της βελτιστοποίησης. Ταυτόχρονα ισχύουν αρκετοί περιορισμοί. Καταρχάς πρέπει να ικανοποιούνται οι εξισώσεις επίλυσης του δικτύου (18), (20) και (22). Από την φυσική του προβλήματος προκύπτουν ανισότητες που επίσης πρέπει να ικανοποιούνται. Τέτοιοι περιορισμοί ισχύουν για τις διαμέτρους των αγωγών που πρέπει να βρίσκονται σε μια περιοχή διαμέτρων όπως των αγωγών του εμπορίου. Επίσης η ταχύτητα του υγρού εντός του αγωγού έχει μια ανώτατη τιμή, ανάλογα με την εφαρμογή. Τέλος, οι πιέσεις στο δίκτυο πρέπει να κυμαίνονται μέσα σε μια επιθυμητή περιοχή. Η εφαρμογή των περιορισμών αυτών βοηθά σημαντικά στην ταχύτερη εύρεση της βέλτιστης λύσης.

Το παραπάνω μοντέλο αποτελεί ένα πρόβλημα μη- γραμμικής πολυδιάστατης βελτιστοποίησης με περιορισμούς Είναι πολύ δύσκολο να λυθεί αριθμητικά αλλά η συμβολή του πακέτου βελτιστοποίησης του MATLAB βοηθάει

σημαντικά. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η μέθοδος quasi-Newton όπως μπορεί να βρεθεί σε πολλά βιβλία αριθμητικών μεθόδων βελτιστοποίησης, όπως το [11]. Βέβαια τα αποτελέσματα ελέγχονται με διάφορους τρόπους πολύ προσεκτικά πριν γίνουν αποδεκτά.

Θα πρέπει να τονιστεί πως, τόσο η διάμετρος των αγωγών, όσο και η ισχύς των αντλιών παίρνουν διακριτές τιμές (τιμές διαμέτρου των αγωγών και ισχύος των αντλιών που κυκλοφορούν στο εμπόριο). Παρόλα αυτά, ο αλγόριθμος τις χειρίζεται σαν συνεχείς, καθώς θα έπρεπε να προγραμματιστεί ταυτόχρονα ένας αλγόριθμος για ακέραιο μαθηματικό προγραμματισμό. Επίσης απαιτείται προσοχή καθώς ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος βρίσκει τοπικά ελάχιστα, οπότε μια εκτίμηση στην περιοχή της λύσης είναι επιθυμητή για την εύρεση του ολικού ελαχίστου.

6.5 Αποτελέσματα

Μια σειρά από εικονικά δίκτυα σωληνώσεων βελτιστοποιούνται με την χρήση του πηγαίου κώδικα PNOpt. Το εικονικό δίκτυο του σχήματος 1 είναι ένα από αυτά τα παραδείγματα που βελτιστοποιήθηκε για 2, 5, 10, 20, 50 και 100 χρόνια λειτουργίας. Οι περιορισμοί που τέθηκαν στο δίκτυο ήταν:

$$20 \text{ kPa} < P < 10000 \text{ kPa}$$

$$U < 3 \text{ m/sec}$$

$$40 \text{ mm} < D < 600 \text{ mm}$$

$$P_u < 200 \text{ kW}$$

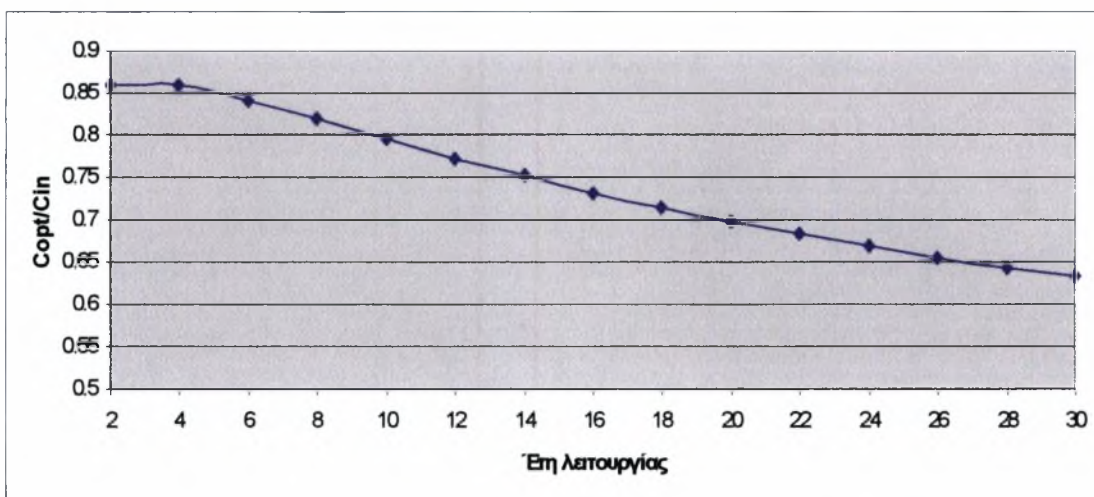
Θεωρείται επίσης πως οι αγωγοί χωρίζονται σε τρεις ομάδες με ίδια διάμετρο. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τους σωλήνες 1 και 14, η δεύτερη ομάδα σωλήνες τους 2, 3, 4, 6, 9, 11, 12 και 13 και η τρίτη ομάδα τους σωλήνες 5, 7, 8 και 10. Το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας θεωρήθηκε ίσο με 15 ¢/kWh ενώ το πολυώνυμο (25) που δίνει το κόστος αγωγού ανά μήκος είναι τετάρτου βαθμού με συντελεστές $a_1=0.0006$, $a_2=-0.1126$, $a_3=60.151$, $a_4=-1624.9$. Τέλος το δίκτυο θεωρείται ότι δουλεύει 5500 hr/έτος

	Αρχικό δίκτυο	2 έτη	5 έτη	10 έτη	20 έτη	50 έτη	100 έτη
Σωλήνας	Διάμετρος (mm)	Διάμετρος (mm)	Διάμετρος (mm)	Διάμετρος (mm)	Διάμετρος (mm)	Διάμετρος (mm)	Διάμετρος (mm)
1	300.00	343.54	357.76	393.38	434.29	497.21	590.48
2	250.00	193.16	211.49	229.53	251.44	288.10	309.81
3	250.00	193.16	211.49	229.53	251.44	288.10	309.81
4	250.00	193.16	211.49	229.53	251.44	288.10	309.81
5	200.00	175.46	169.96	166.46	161.11	157.16	330.74
6	250.00	193.16	211.49	229.53	251.44	288.10	309.81
7	200.00	175.46	169.96	166.46	161.11	157.16	330.74
8	200.00	175.46	169.96	166.46	161.11	157.16	330.74
9	250.00	193.16	211.49	229.53	251.44	288.10	309.81
10	200.00	175.46	169.96	166.46	161.11	157.16	330.74
11	250.00	193.16	211.49	229.53	251.44	288.10	309.81
12	250.00	193.16	211.49	229.53	251.44	288.10	309.81
13	250.00	193.16	211.49	229.53	251.44	288.10	309.81
14	300.00	343.54	357.76	393.38	434.29	497.21	590.48
Αντλίες	Ισχύς (kW)	Ισχύς (kW)	Ισχύς (kW)	Ισχύς (kW)	Ισχύς (kW)	Ισχύς (kW)	Ισχύς (kW)
1	100.00	123.56	91.73	67.27	53.38	43.55	20.88
2	100.00	54.25	52.74	46.69	39.88	30.79	31.72

Πίνακας 9: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης δικτύου για τις διαμέτρους των αγωγών και τις ισχύεις των αντλιών του σχήματος 1 με χρήση του πηγαίου κώδικα PNoptim.

	2 έτη	5 έτη	10 έτη	20 έτη	50 έτη	100 έτη
Συνολικό Κόστος με βελτιστοποίηση (10 ³ δρχ)	162.219	202.716,6	254.839	338.889,6	540.152,5	784.949,9
Συνολικό κόστος χωρίς βελτιστοποίηση (10 ³ δρχ)	188.615,4	238.115,4	320.615,4	485.615,4	980.615,4	1.805.615,4
Κέρδος λόγω Βελτιστοποίησης (10 ³ δρχ)	26.397,4	35.398,8	65.776,4	146.725,8	440.462,9	1.020.665,5
Κόστος/έτος με βελτιστοποίηση (10 ³ δρχ)	81.109	40.543,3	25.483,9	16.944,5	10.803,1	7.849,5
Συνολικό κόστος/έτος χωρίς βελτιστοποίηση (10 ³ δρχ)	94.307,7	47.623	32.061,5	24.280,8	19.612,3	18.056,2
Κέρδος/έτος λόγω βελτιστοποίησης (10 ³ δρχ)	13.198,7	7.079,8	6.577,6	7.336,3	8.809,3	10.206,7

Πίνακας 10: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το κόστος του δικτύου του σχήματος 1 με χρήση του πηγαίου κώδικα PNopt.



Σχήμα 5: Λόγος κόστους μετά την βελτιστοποίηση προς κόστος αρχικού σχεδιασμού για περίοδο 2- 30 ετών λειτουργίας.

Αυτό που μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε από τόσο από το παραπάνω γράφημα είναι το κέρδος από την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του δικτύου σωληνώσεων. Για μεγάλο αριθμό ετών μάλιστα το κόστος πριν την βελτιστοποίηση είναι διπλάσιο από εκείνο μετά την βελτιστοποίηση. Ένα άλλο χαρακτηριστικό σημείο είναι το γεγονός πως η αύξηση της περιόδου λειτουργίας του δικτύου οδηγεί την βελτιστοποίηση σε μείωση της ισχύς των αντλιών και αύξηση της διάμετρου των αγωγών. Αυτό είναι κάτι αναμενόμενο καθώς το κόστος εγκατάστασης που είναι συνάρτηση των χρησιμοποιούμενων διαμέτρων αγωγών είναι ανεξάρτητο των ετών λειτουργίας του δικτύου ενώ το λειτουργικό κόστος που είναι συνάρτηση των ισχύων των αντλιών είναι ανάλογο της περιόδου λειτουργίας του δικτύου.

7. ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ

7.1 Εισαγωγή

Το τέταρτο και τελευταίο μέρος της παρούσας εργασίας επικεντρώνεται στη διάγνωση βλαβών σε δίκτυα σωληνώσεων. Όπως εξηγήσαμε νωρίτερα η παρούσα προσπάθεια είναι εισαγωγική. Σε μεγάλα δίκτυα σωληνώσεων που αποτελούνται από πολλούς αγωγούς, μία μικρή διαρροή συχνά δεν μπορεί να γίνει καν αισθητή, με αποτέλεσμα να αντιμετωπίζεται όταν η ζημία είναι τόσο μεγάλη που το δίκτυο ουσιαστικά βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Όλοι έχουμε στο μυαλό μας τέτοιου είδους παραδείγματα από δίκτυα υδροδότησης πόλεων, όπου, λόγω παλαιότητας των αγωγών, παρουσιάζονται συχνά διαρροές. Αν η διαρροή δεν γίνει τόσο μεγάλη που το νερό να φτάσει στην επιφάνεια συχνά κανείς δεν την αντιλαμβάνεται. Όμως ακόμα και αν μια σειρά από αισθητήρες μας δείχνουν πως το δίκτυο έχει ξεφύγει από την περιοχή λειτουργίας του και πιθανόν να έχει συμβεί κάποια βλάβη, ο εντοπισμός του σημείου όπου έχει συμβεί είναι δύσκολη υπόθεση. Η σημασία ενός εργαλείου επομένως που θα βρίσκει το σημείο της βλάβης και τη σοβαρότητά της, το μέγεθος δηλαδή της διαρροής, έχει ουσιαστική αξία για τον μηχανικό που ελέγχει την καλή λειτουργία του δικτύου. Με αυτήν τη σκέψη δημιουργήθηκε ο πηγαίος κώδικας PNrel σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB.

7.2 Αλγόριθμος PNrel

Ο αλγόριθμος PNrel στηρίχθηκε στον πηγαίο κώδικα PNdes και χρησιμοποιεί τις ίδιες εξισώσεις για το μοντέλο υπολογισμού του δικτύου σωληνώσεων. Συγκεκριμένα για την πτώση πίεσης λόγω τριβών του ρευστού με τα τοιχώματα του αγωγού χρησιμοποιείται η έκφραση των Darcy-Weisbach (4) και για το συντελεστή τριβής F αυτή των Swamee-Jain (6). Η έκφραση (13) δίνει την πτώση πίεσης λόγω εξαρτημάτων, ενώ η αντλία μοντελοποιείται ως “αντλία σταθερής ισχύος” μέσω της σχέσης (16).

Πρέπει να τονιστεί, πως ο πηγαίος κώδικας PNrel μπορεί να εντοπίσει διαρροή σε ένα μόνο σωλήνα του δικτύου. Η διαρροή σε κάποιο σημείο του δικτύου έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των μετρήσεων στα μανόμετρα και τα ροόμετρα του δικτύου. Θεωρούμε πως το μοντέλο δίνει ακριβή αποτελέσματα για το δίκτυο σωληνώσεων πριν παρουσιαστεί βλάβη. Ο κώδικας PNrel στηρίζεται στα αποτελέσματα επίλυσης του μοντέλου και στις μετρούμενες πιέσεις και παροχές στο πραγματικό δίκτυο για να εντοπίσει το σημείο και το μέγεθος της διαρροής.

Ειδικότερα, ο κώδικας PNrel θεωρεί μια αρχική διαρροή σε συγκεκριμένο αγωγό του δικτύου. Τα αποτελέσματα της επίλυσης του δικτύου με τη θεωρούμενη διαρροή και οι μετρήσεις από τους αισθητήρες στο δίκτυο εισάγονται στη συνάρτηση σφάλματος, η οποία δίνει την απόκλιση μεταξύ του αρχικού σχεδιασμού και της παρούσας κατάστασης. Οι αποκλίσεις αυτές υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση:

$$er = \frac{1}{Np} \cdot \sqrt{\sum_{Np} \frac{(P(q) - \hat{P})}{\hat{P}}} + \frac{1}{Nq} \cdot \sqrt{\sum_{Nq} \frac{(Q(q) - \hat{Q})}{\hat{Q}}} \quad (29)$$

όπου P οι υπολογιζόμενες από το μοντέλο πιέσεις σε κόμβους του δικτύου, \hat{P} οι μετρούμενες πιέσεις σε κόμβους με αισθητήρα, Q οι υπολογιζόμενες από το μοντέλο ροές σε κλάδους του δικτύου, \hat{Q} οι μετρούμενες ροές σε κλάδους με αισθητήρα, q η θεωρούμενη διαρροή, Np ο αριθμός αισθητήρων πίεσης στο δίκτυο και Nq ο αριθμός αισθητήρων ροής στο δίκτυο

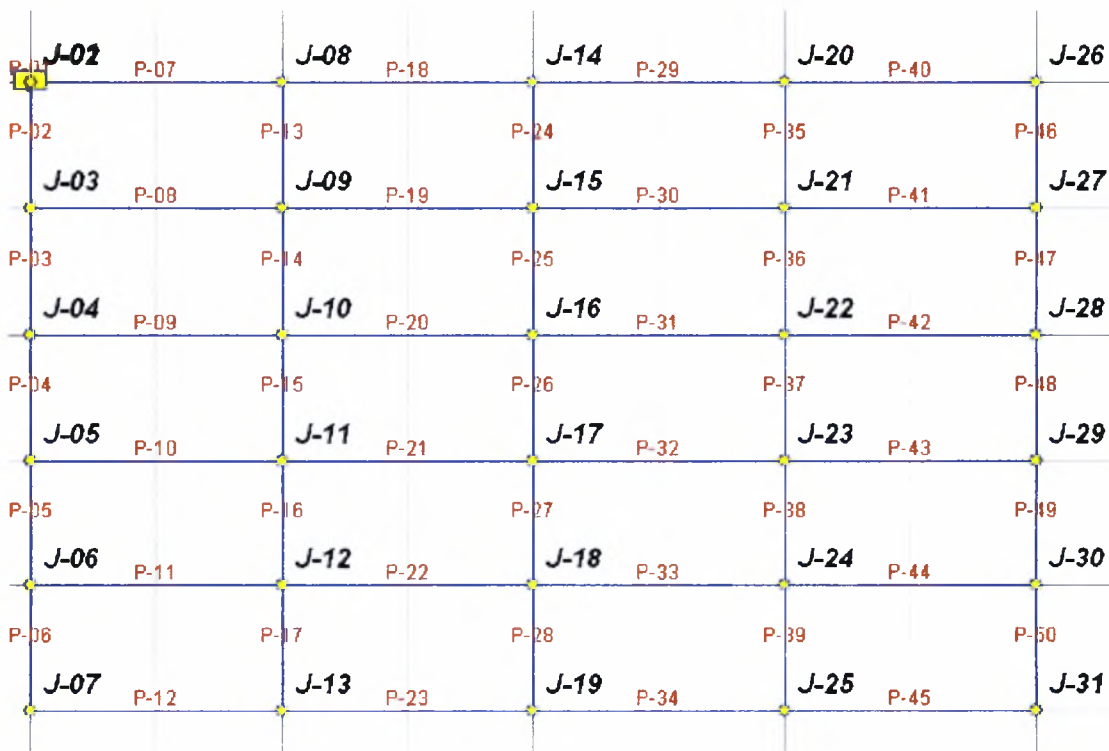
Για τον εντοπισμό της βλάβης ελαχιστοποιείται η παραπάνω συνάρτηση με μεταβλητή τη διαρροή στο συγκεκριμένο σωλήνα.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε σωλήνα του δικτύου, οπότε, μετά το τέλος της διαδικασίας, έχει υπολογιστεί η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης σφάλματος και η διαρροή που αντιστοιχεί σε αυτήν. Ο σωλήνας που θα δώσει τη χαμηλότερη τιμή για τη συνάρτηση σφάλματος έχει τη

μεγαλύτερη πιθανότητα να παρουσιάζει διαρροή, ενώ εκείνος που θα δώσει την υψηλότερη τιμή για τη συνάρτηση σφάλματος έχει τη χαμηλότερη πιθανότητα να παρουσιάζει διαρροή. Το μέγεθος της διαρροής είναι αυτό που έχει υπολογιστεί για το σωλήνα.

7.3 Αποτελέσματα

Για τον έλεγχο του πηγαίου κώδικα PNrel χρησιμοποιήθηκε ένα δίκτυο με 50 αγωγούς 31 κόμβους και 20 βρόχους. Όλοι οι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από PVC και έχουν διάμετρο 600mm και τραχύτητα 0.26mm. Το μήκος τους είναι 1000m στην κατεύθυνση Βορρά- Νότου και 2000m στην κατεύθυνση Ανατολής- Δύσης. Όλοι οι κόμβοι έχουν ζήτηση ίση με 50 lt/sec και το υψόμετρο τους είναι μηδενικό. Η δεξαμενή 1 έχει ύψος στάθμης 52m. Η κάτοψη του δικτύου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6: Εικονικό δίκτυο σωληνώσεων με 50 αγωγούς και 31 κόμβους.

Θεωρούμε τρεις αισθητήρες πίεσης στους κόμβους 12, 15 και 23. Η επίλυση του δικτύου με τον πηγαίο κώδικα PNdes δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα για τους κόμβους στους οποίους έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες.

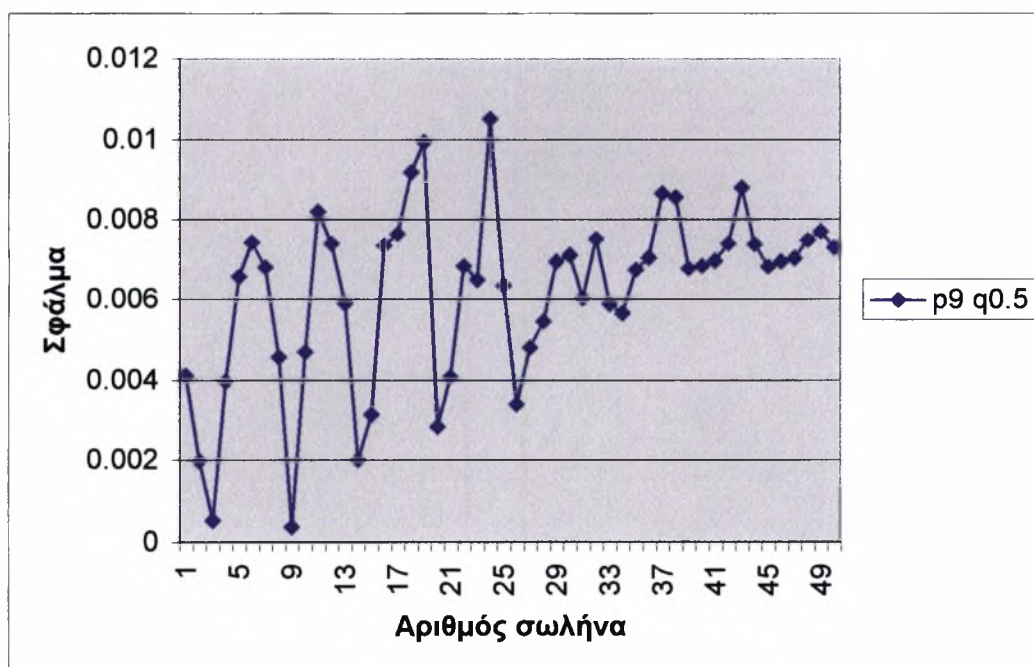
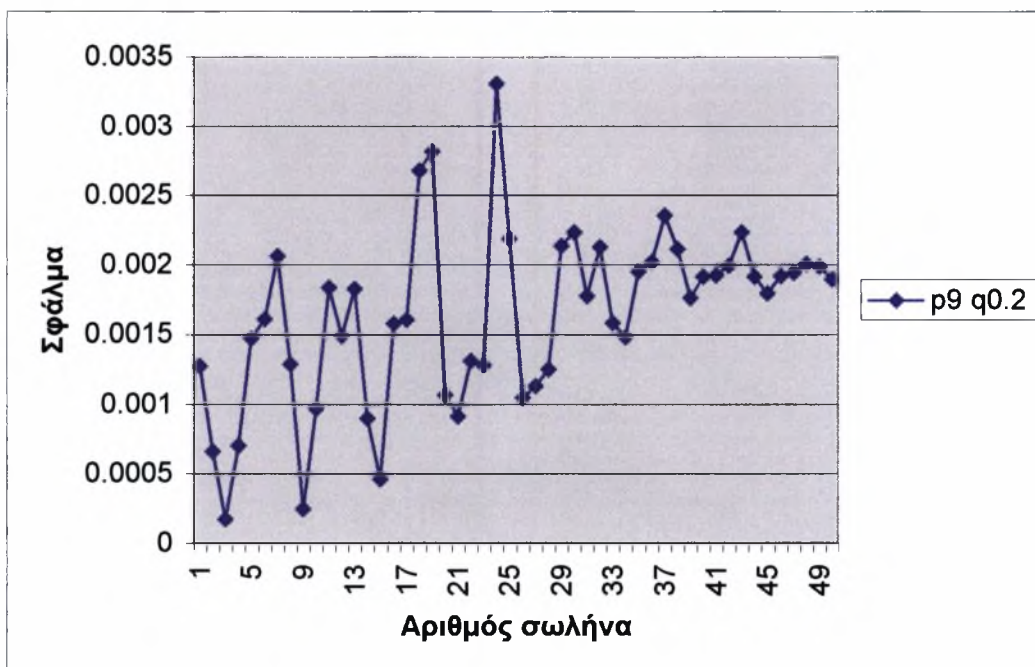
Κόμβος	X (m)	Ψ (m)	Z (m)	Πίεση (kPa)	Ύψος πίεσης (m)
12	2000	-4000	0	329.07	33.56
15	4000	-1000	0	336.24	34.29
23	6000	-3000	0	326.86	33.33

Πίνακας 11: Αποτελέσματα μοντέλου στους αισθητήρες πριν τη βλάβη.

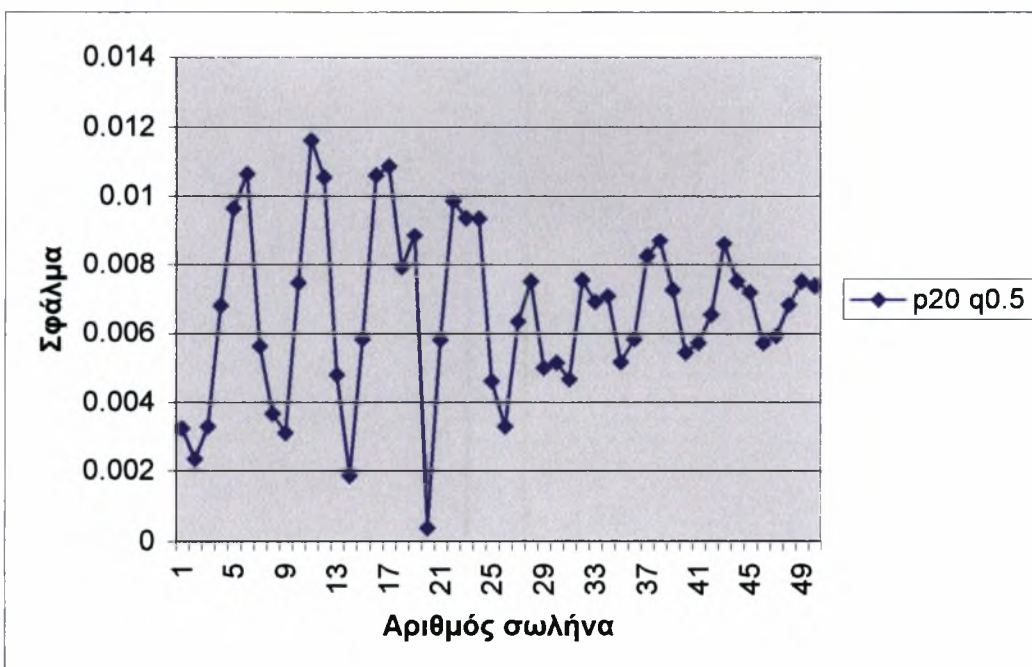
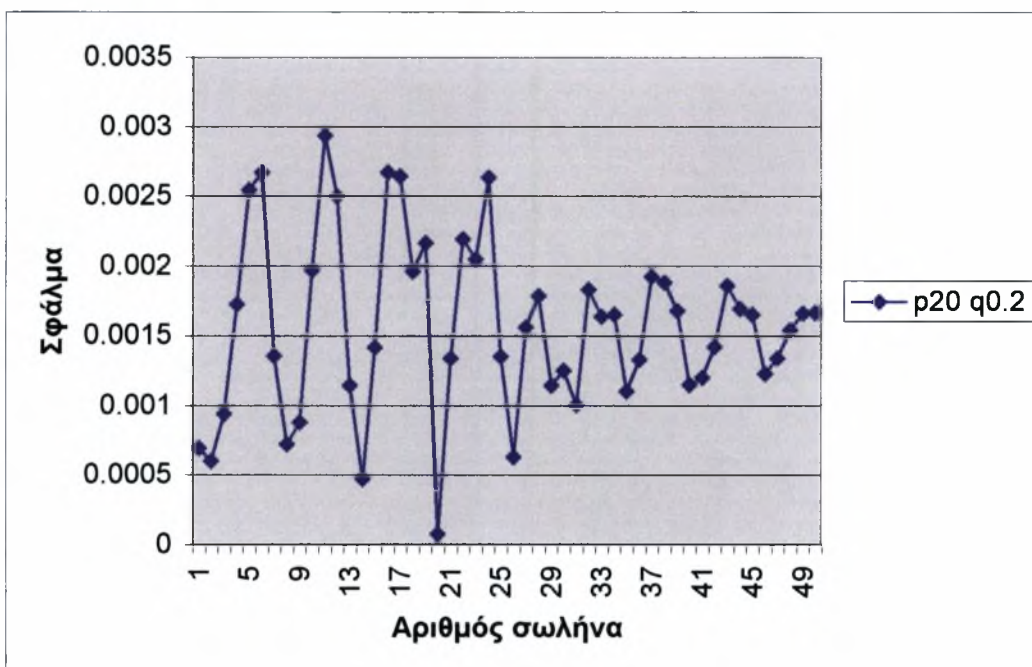
Θεωρείται βλάβη για καθένα από τους σωλήνες 9, 20, 25, 26, 33 και 42, με διαρροή 200lt/sec και 500lt/sec. Για καθεμία από τις παραπάνω περιπτώσεις, επειδή δεν υπάρχουν πραγματικά δεδομένα, εφαρμόζεται το λογισμικό PIPE2000, με τη δοσμένη διαρροή στο συγκεκριμένο κλάδο, έτσι ώστε να προκύψουν τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στον κώδικα PNrel,

Στις επόμενες σελίδες εμφανίζονται τα αποτελέσματα στην εξής μορφή: Ο πίνακας δίνει τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη βλάβη, όπως προέκυψαν από το PIPE2000, δηλαδή τις μετρούμενες πιέσεις στους αισθητήρες μετά τη βλάβη. Για κάθε σωλήνα ακολουθούν δύο γραφήματα που δίνουν την τιμή της συνάρτησης σφάλματος για καθέναν από τους 50 αγωγούς του δικτύου για διαρροή 200lt/sec και 500lt/sec αντίστοιχα.

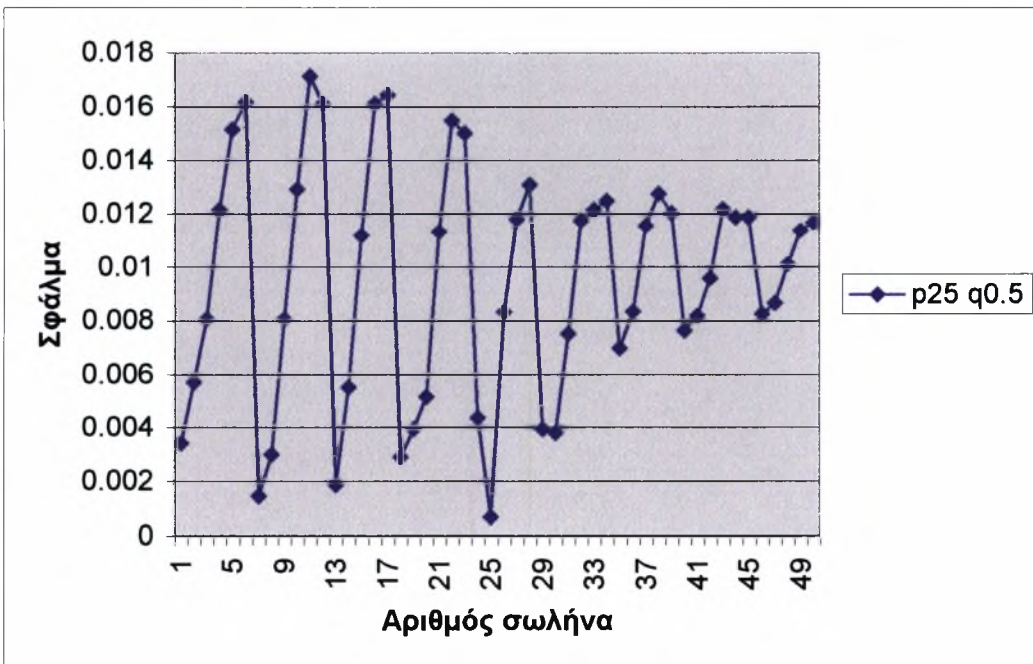
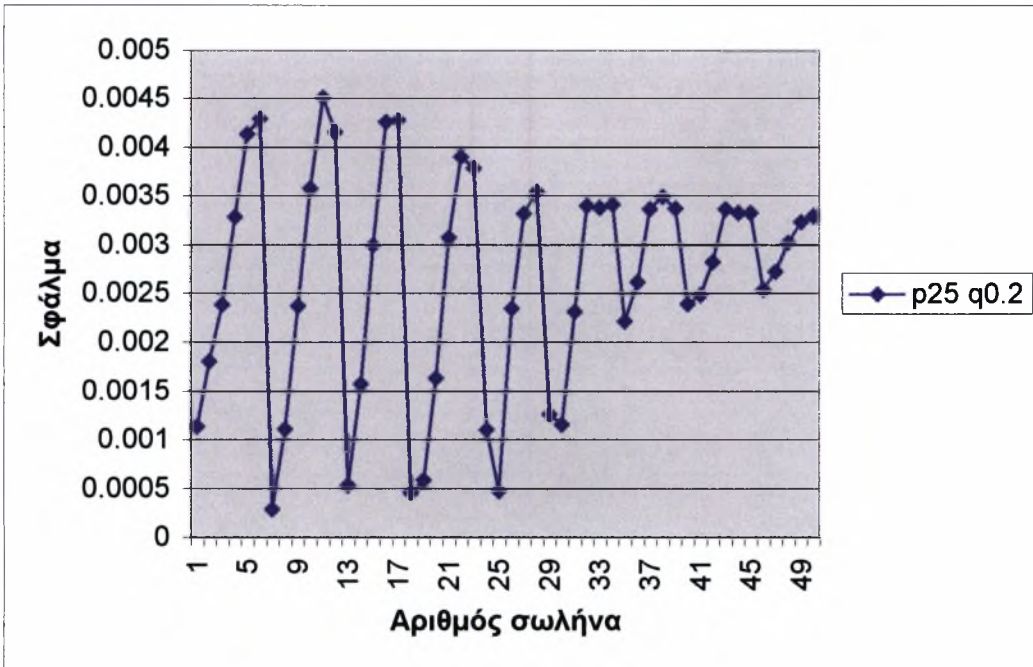
Σωλήνας 9	Διαρροή 200lt/sec	Διαρροή 500lt/sec
Κόμβος	Πίεση (kPa)	Πίεση (kPa)
12	278.5	191.2
15	288.3	204
23	277.5	190.3



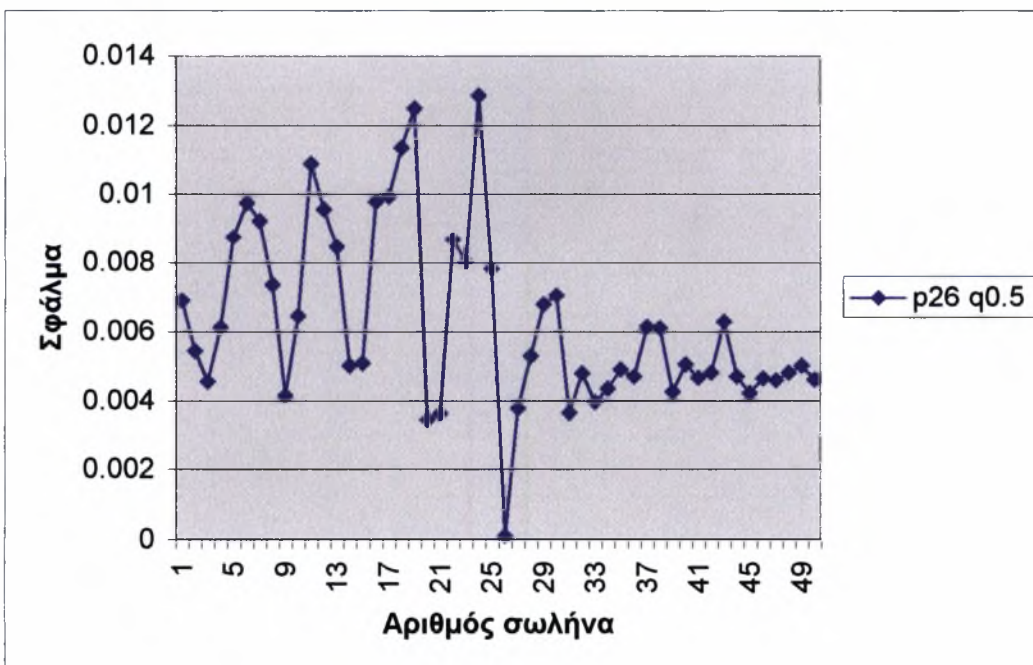
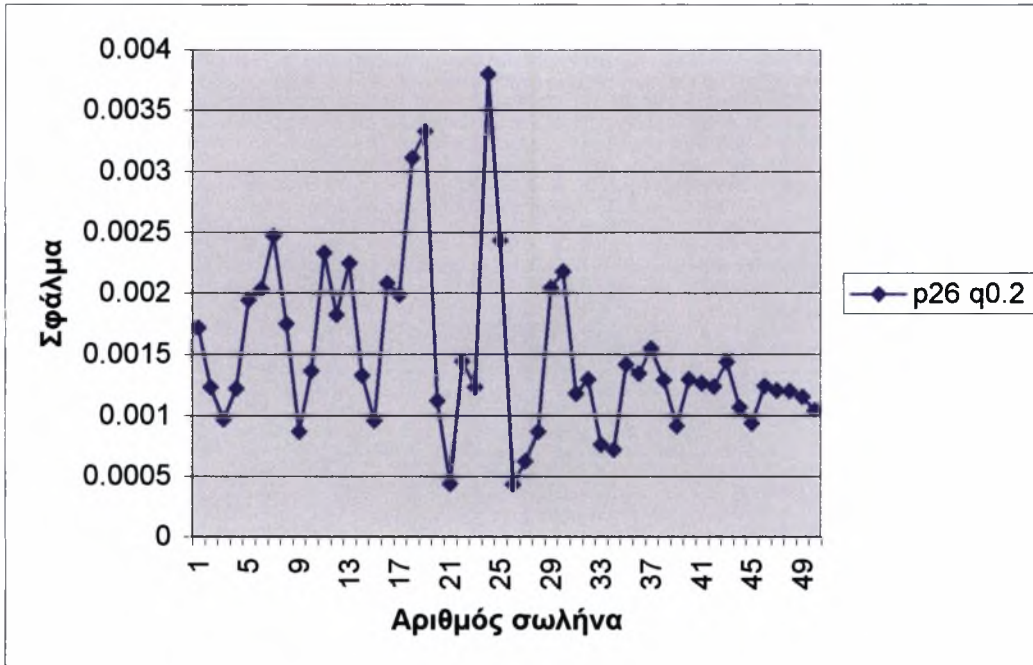
Σωλήνας 20	Διαρροή 200lt/sec	Διαρροή 500lt/sec
Κόμβος	Πίεση (kPa)	Πίεση (kPa)
12	277.5	185.4
15	285.4	195.2
23	274.6	181.4



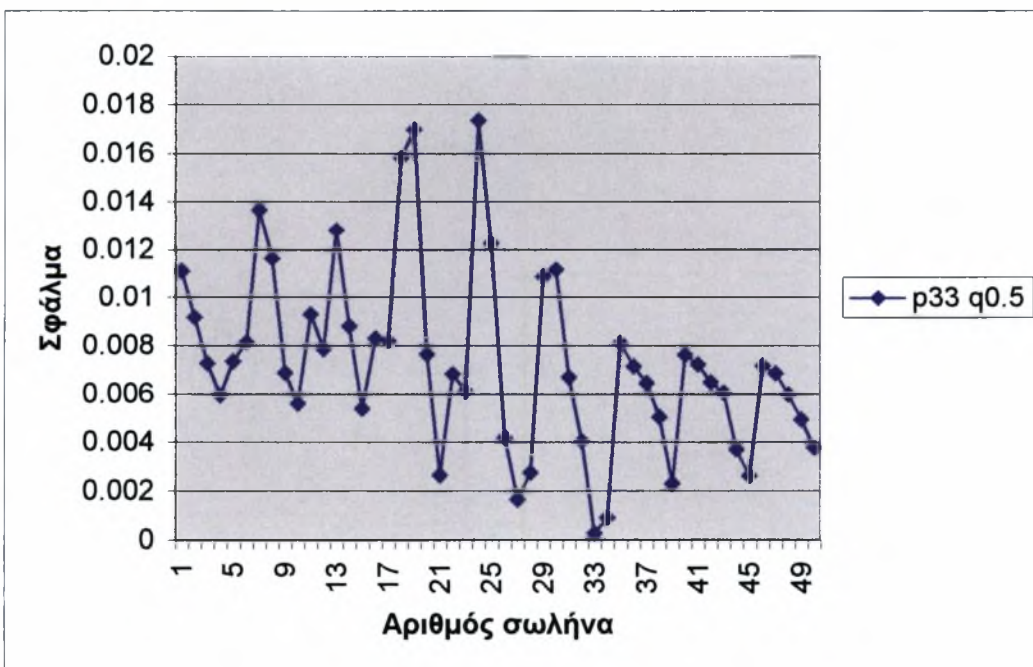
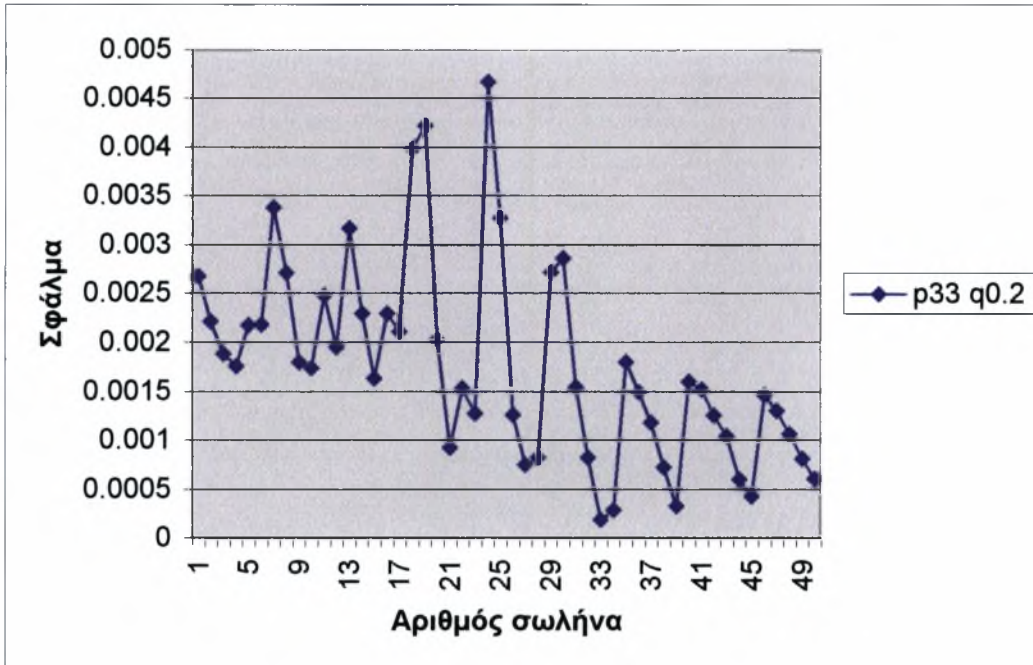
Σωλήνας 25	Διαρροή 200lt/sec	Διαρροή 500lt/sec
Κόμβος	Πίεση (kPa)	Πίεση (kPa)
12	276.6	185.4
15	281.5	188.3
23	273.6	179.5



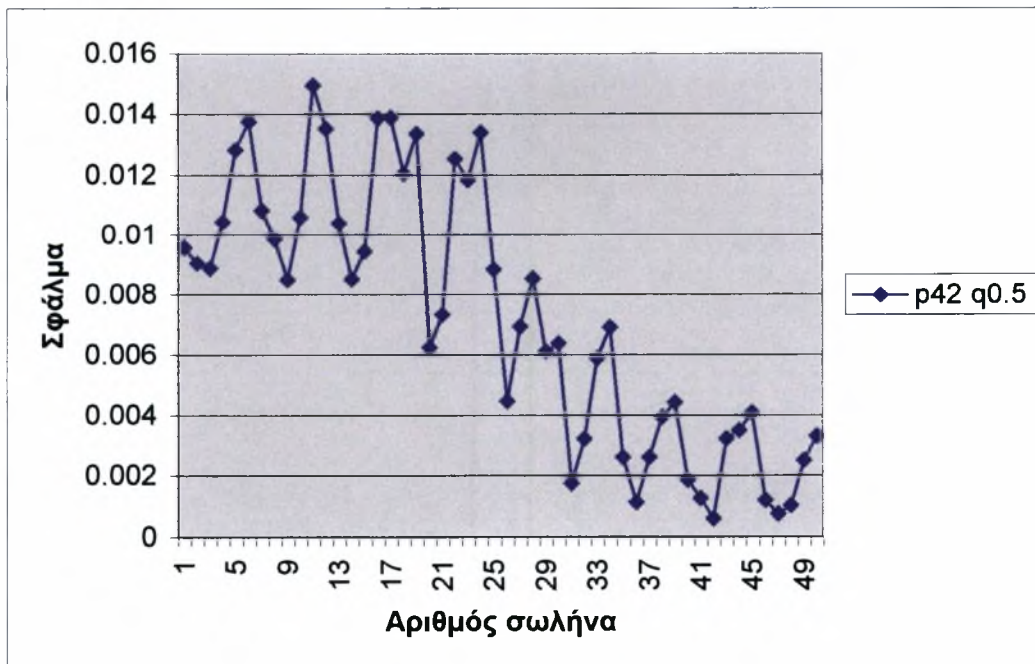
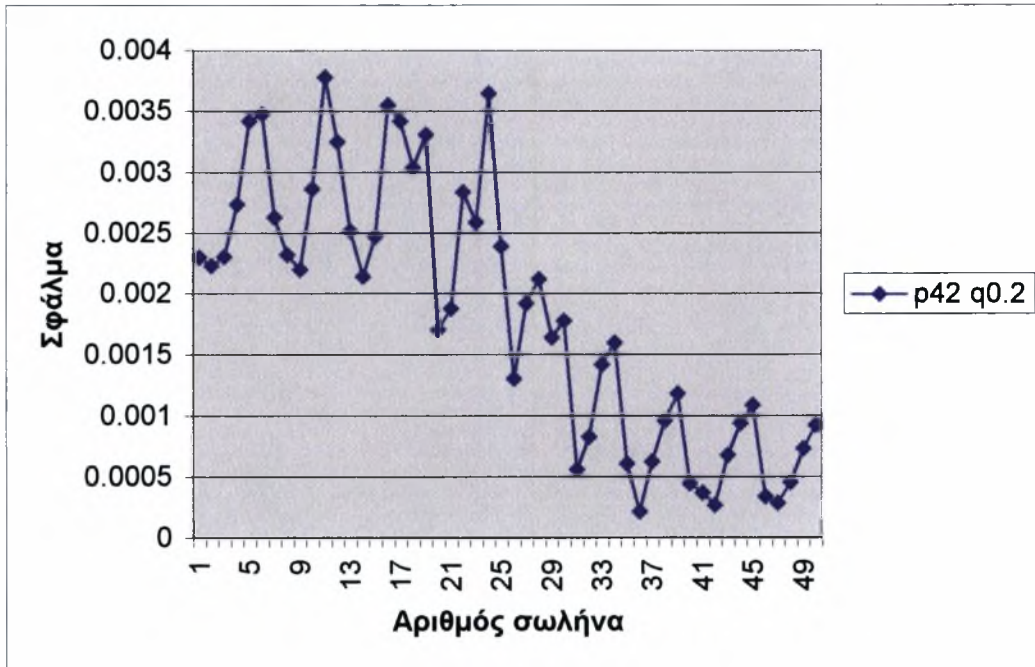
Σωλήνας 26	Διαρροή 200lt/sec	Διαρροή 500lt/sec
Κόμβος	Πίεση (kPa)	Πίεση (kPa)
12	274.6	180.4
15	284.4	193.2
23	271.7	174.6



Σωλήνας 33	Διαρροή 200lt/sec	Διαρροή 500lt/sec
Κόμβος	Πίεση (kPa)	Πίεση (kPa)
12	273.6	176.5
15	284.4	194.2
23	269.7	170.6



Σωλήνας 42	Διαρροή 200lt/sec	Διαρροή 500lt/sec
Κόμβος	Πίεση (kPa)	Πίεση (kPa)
12	275.6	181.4
15	283.4	191.2
23	269.7	169.7



7.4 Συμπεράσματα

Μια γρήγορη εξέταση των πινάκων δεδομένων οδηγεί στο συμπέρασμα, πως για μια συγκεκριμένη διαρροή, οι μετρήσεις στους αισθητήρες μεταβάλλονται ελάχιστα, σε οποιοδήποτε αγωγό του δικτύου κι αν παρουσιαστεί η βλάβη. Για παράδειγμα, “μεταφέροντας” βλάβη μεγέθους 200lt/sec από το σωλήνα 26 στο σωλήνα 33, η ένδειξη του αισθητήρα 12 μεταβάλλεται κατά 1 kPa, του αισθητήρα 15 δεν μεταβάλλεται καν, ενώ του αισθητήρα 23 μεταβάλλεται κατά 2 kPa. Αυτό επιβεβαιώνει τη δυσκολία εντοπισμού της βλάβης, εξετάζοντας αποκλειστικά τις μετρήσεις, χωρίς εξειδικευμένα εργαλεία.

Ελέγχοντας τα παραπάνω γραφήματα, προκύπτει ότι, για τις περισσότερες περιπτώσεις, ο κώδικας πρόβλεψε το σωστό σωλήνα και τη σωστή διαρροή. Μόνο για τις περιπτώσεις των αγωγών 9, 25, και 42 με διαρροή 200 lt/sec δεν έγινε δυνατή η πρόβλεψη του σωστού σωλήνα αλλά κάποιου γειτονικού. Όπως τονίστηκε όμως, ο αλγόριθμος δίνει την πιθανότητα βλάβης για κάθε σωλήνα με βάση τις συγκεκριμένες μετρήσεις. Στον πίνακα 12 παρουσιάζονται, για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε παραπάνω, οι σωλήνες στους οποίους είναι το πιθανότερο να παρουσιαστεί η βλάβη.

Σωλήνας βλάβης	Πιθανότεροι σωλήνες να εμφανιστεί η βλάβη, όπως υπολογίστηκαν από το PNrel			
9	3	9	14	15
20	9	14	20	26
25	7	13	18	25
26	20	21	26	27
33	27	33	34	39
42	36	41	42	47

Πίνακας 12: Πιθανότεροι σωλήνες εμφάνισης βλάβης, για δοσμένο σπασμένο σωλήνα.

Το σημαντικό είναι πως, ακόμα και σε συνθήκες τέτοιες που ο κώδικας PNgel δεν είναι σε θέση να εντοπίσει το σωστό αγωγό, εντοπίζει την περιοχή που βρίσκεται η βλάβη. Τέλος, πρέπει να τονιστεί, ότι το μοντέλο θεωρείται απόλυτα ακριβές. Στην πράξη κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει και το μοντέλο πάντα αποκλίνει από το πραγματικό δίκτυο. Όσο μικρότερες είναι αυτές οι διαφορές, τόσο πιο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος PNgel, καθώς αυτά στηρίζονται στη διαφορά μοντέλου – πραγματικών μετρήσεων, για τον υπολογισμό της βλάβης.

Σε κάθε περίπτωση είναι σημαντικό το ότι, με τρεις μετρήσεις πιέσεων σε ένα δίκτυο 50 αγωγών, καταφέραμε, αρκετά αξιόπιστα, να εντοπίσουμε τη βλάβη. Είναι προφανές πως η αύξηση του αριθμού των αισθητήρων πίεσης και ροής στο δίκτυο θα αύξανε την αξιοπιστία του αλγορίθμου. Επίσης η μεταβολή της θέσης των αισθητήρων στο δίκτυο έχει καταλυτική σημασία στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων του κώδικα PNgel. Επομένως η βέλτιστη τοποθέτηση των αισθητήρων στο δίκτυο αποτελεί ένα σημαντικό στόχο και αντικείμενο περαιτέρω έρευνας.

8. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

8.1 Συμπεράσματα

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η επίλυση δικτύων σωληνώσεων με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, μια εφαρμογή μεγάλης σημασίας για το μηχανικό. Σε αυτήν την κατεύθυνση χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό πακέτο PIPE2000 και αναπτύχθηκε ο πηγαίος κώδικας PNdes με τις επεκτάσεις PNort και PNrel σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB.

Το PIPE2000 αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στα χέρια του μηχανικού με το οποίο μπορεί να σχεδιάσει, να επιλύσει, και να πραγματοποιήσει όλες τις αλλαγές σε κάθε δίκτυο σωληνώσεων ανεξάρτητα της γεωμετρίας του. Οι δυνατότητες του τόσο κατά τον έλεγχο ανοχών, όσο και κατά την προσομοίωση στο χρόνο επιτρέπουν τον έλεγχο και κυρίως την επίτευξη ακρίβειας στους υπολογισμούς. Η ακρίβεια του κώδικα PIPE2000 διαπιστώθηκε με τη μοντελοποίηση πραγματικών δικτύων σωληνώσεων και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις μετρήσεις από τα ήδη υλοποιημένα δίκτυα. Τέλος θα πρέπει να τονιστεί η ευχρηστία του λογισμικού τόσο λόγω του γραφικού περιβάλλοντος εργασίας όσο και λόγω των βιβλιοθηκών εξαρτημάτων έτοιμων προς χρήση σε κάθε δίκτυο

Με βάση τη θεωρία για τα δίκτυα σωληνώσεων αναπτύχθηκε ο πηγαίος κώδικας PNdes σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Το μοντέλο δεν περιλαμβάνει τις δυνατότητες του PIPE2000 στη μοντελοποίηση εξαρτημάτων και στο πλήθος των εκφράσεων για την επίλυση του δικτύου. Τα αποτελέσματα που δίνει όμως είναι ακριβή ενώ ο αρχικός στόχος που ήταν η επέκταση του στους τομείς της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού με βάση το κόστος και της διάγνωσης βλαβών επιτεύχθηκε δίνοντας αξιόλογα αποτελέσματα.

Το PNort αποτελεί ένα εργαλείο για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού με βάση το συνολικό κόστος του δικτύου σε μια προκαθορισμένη περίοδο

λειτουργίας. Είχαμε τη δυνατότητα να εξετάσουμε πόσο μπορεί να βελτιωθεί ο αρχικός σχεδιασμός ενός δικτύου σωληνώσεων με τεχνικές βελτιστοποίησης ενώ διαπιστώσαμε πως για μια μακροχρόνια περίοδο μπορούμε να φτάσουμε ακόμα και στο μισό συνολικό κόστος, σε σχέση με έναν αρχικό μη βελτιστοποιημένο σχεδιασμό

Τέλος το PNrel συγκέντρωσε την προσπάθεια στη δημιουργία ενός μοντέλου διάγνωσης των βλαβών σε δίκτυα σωληνώσεων. Αυτό που διαπιστώθηκε είναι πως με έναν μικρό αριθμό μετρήσεων πιέσεων ή/ και παροχών στο δίκτυο μπορούμε να προβλέψουμε την περιοχή αν όχι το ακριβές σημείο της ζημιάς καθώς και τη σοβαρότητα της.

8.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Σίγουρα οι αλγόριθμοι που δημιουργήθηκαν δεν είναι πλήρεις καθώς ο χρόνος δεν επαρκούσε για κάτι τέτοιο. Ήδη ο αλγόριθμος PNdes δοκιμάζεται επεκτείνεται έτσι ώστε να μπορεί να περιλάβει και ρυθμιστήκες βαλβίδες στο δίκτυο στα πρότυπα του PIPE2000 ενώ η συμπλήρωση του με περισσότερες εκφράσεις επίλυσης είναι εφικτή. Όσο αφορά τον πηγαίο κώδικα PNopt θα μπορούσε κάποιος να επικεντρωθεί στη χρησιμοποίηση τεχνικών ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού έτσι ώστε οι διάμετροι των αγωγών να έχουν διακριτές τιμές όπως συμβαίνει στην πράξη. Τέλος αναφορικά με τον πηγαίο κώδικα PNrel το μελλοντικό βήμα για τη συμπλήρωση του είναι ο έλεγχος της αβεβαιότητας των δεδομένων που επηρεάζουν άμεσα τα αποτελέσματα.

Θα πρέπει τέλος να τονιστεί πως η παραπάνω εργασία είχε ως αντικείμενο αποκλειστικά ασυμπιεστές μόνιμες ροές. Θα μπορούσε επομένως να αποτελεσει ένα αρχικό στάδιο για τη δημιουργία αντιστοιχων μοντέλων για μη μόνιμες ροές, και για συμπιεστές ροές.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Παπαϊωάννου Θ. Α. (1993) **Μηχανική των Ρευστών**, Β έκδοση, Παπασωτηρίου
2. Potter M. C. and Wiggert D. C. (1997) **Mechanics of Fluids**, 2nd edition, Prentice Hall.
3. Mohinder L. N. (1992) **Piping Handbook**, 6th edition, McGraw Hill.
4. Wood D. J. (1995) **KYPIPE Reference Manual**, University of Kentucky.
5. Yu F. C. (1993) "How to calculate optimum pipe size for liquids" **Hydrocarbon Processing**, June, pp. 67-74.
6. Sloane B.A. (1994) "Select pipe size based on payback" **Hydrocarbon Processing**, July, pp. 55-61.
7. Boulos P. and Altman T. "A graph-theoretic approach to explicit nonlinear pipe network optimization" **Appl. Math. Modelling**, September 1991, vol.15, pp. 459-466.
8. Valougeorgis D., Poulakis Z. and Papadimitriou C. (2000) **Cost Optimization of Piping Systems**, 5th International conference Protection and restoration of the environment
9. Shinozuka M. and Liang J. **On-line Damage Identification of Water Delivery Systems**.
10. Poulakis Z., Valougeorgis D. and Papadimitriou C. (2001) **Health Monitoring of Pipe Networks**, 8th International conference Structural Safety and Reliability
11. S. C. Chapra, R. P. Canale **Numerical Methods for Engineers**, 3rd edition, McGraw Hill

10. Συνημμένο

10.1 Τραχύτητες αγωγών

Υλικό σωλήνα	C (Hazen-Williams)	ϵ [mm] (Darcy-Weisbach)	n (Manning)
Χυτοσίδηρος	130	0,26	0,01
Χάλυβας εμπορίου		0,04	
Χάλυβας (υλώσεις)	110	0,9 - 9	0,01
Χάλυβας (συγκολλήσεις)	120		
Γαλβανισμένος σίδηρος		0,15	
Ασφαλτωμένος σίδηρος		0,12	
Χαλκός		0,013 - 0,015	
Πλαστικό	150	0	
Σκυρόδεμα	140	0,3 - 3	0,01
Ξύλο	120	0,3	0,012 - 0,013

Πίνακας 13: Τραχύτητα σωλήνων διαφορετικού υλικού

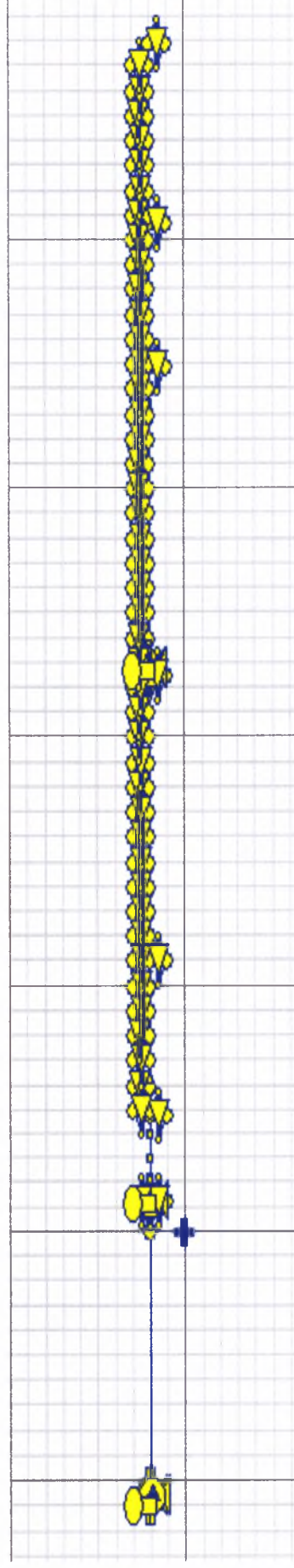


10.2 Συντελεστής πτώσης πίεσης εξαρτημάτων

Εξάρτημα	Συντελεστής M
Σύνδεση 45°	0,35
Σύνδεση 90°	0,75
Σύνδεση 180°	1,5
Σύνδεση T	0,4
Στόμια εξόδου	
Οξέα χείλη	1
Στρογγυλευμένα χείλη	1
Στόμια εισόδου	
Οξέα χείλη	0,5 - 1
Στρογγυλευμένα χείλη	0,04 - 0,2
Ακροφύσια	
30°	0,02
45°	0,04
60°	0,07
Βαλβίδα με διάφραγμα	
Ανοικτή	2,3
Ανοικτή 75%	2,6
Ανοικτή 50%	4,3
Ανοικτή 25%	21
Σφαιρική βαλβίδα	
Ανοικτή	6,4
Ανοικτή 50%	9,5
Βαλβίδα με πεταλούδα	
$\theta=10^\circ$	0,29
$\theta=20^\circ$	1,56
$\theta=60^\circ$	206

Πίνακας 14: Συντελεστή πτώσης πίεσης Km για διάφορα εξαρτήματα

10.3 Δίκτυο διαβροχής ταινιοδρόμων ΑΗΣ Πτολεμαΐδας



Σχήμα 7: Δίκτυο για τον ψεκασμό ταινιοδρόμων και αυτοκινητοδρόμων στον ατμοηλεκτρικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Πτολεμαΐδα.