

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

Εργαστήριο Θερμοδυναμικής & Θερμικών Μηχανών

Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΡΡΟΩΝ**



Υπό

**ΚΑΡΕΛΗ Δ. ΣΠΥΡΙΔΩΝ**

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

**ΒΟΛΟΣ 2006**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ**  
**ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.:	5054/1
Ημερ. Εισ.:	20-11-2006
Δωρεά:	Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός:	ΠΤ – ΜΜΒ
	2006
	ΚΑΡ

© 2006 Καρέλης Δ. Σπυρίδων

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας 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. Αναστάσιος Σταμάτης

(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Δημήτριος Βαλουγεώργης

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Βλάχος

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**Αφιερώνεται στους γονείς μου**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου , Επίκουρο καθηγητή κ. Αναστάσιο Σταμάτη , για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου.

Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Δ. Βαλουγεώργη και τον Καθηγητή κ. Ν. Βλάχο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Βαρούτη Στυλιανό για την πολύτιμη βοήθεια του στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής.

Αισθάνομαι επίσης την ανάγκη, να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους πρώην συμφοιτητές μου, Αθ. Σκίπη, Μιχ. Ασλανίδη, Δαν. Βασιλική, Σαβ. Λαζαρίδη, Ιωαν. Λιαρόπουλο, Μ. Μιχαλάκη, Ιωαν. Νικολάου, Δημ. Ξυδιά, Π. Παππά και Α. Σαλάτα για τις όμορφες στιγμές που περάσαμε όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την αδελφή μου Χρύσα, με την οποία συγκατοίκησα τα χρόνια των σπουδών μου.

Η παρούσα διπλωματική αφιερώνεται στους γονείς μου, για όλα όσα μου έχουν προσφέρει μέχρι σήμερα.

Καρέλης Σπύρος

# ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΡΡΟΩΝ

ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΚΑΡΕΛΗΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2006

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Σταμάτης Αναστάσιος, Επίκουρος Καθηγητής

## Περίληψη

Η μεταφορά Φυσικού Αερίου, γίνεται μέσω αγωγών. Οι αγωγοί αυτοί συνδεδεμένοι μεταξύ τους, δημιουργούν τα δίκτυα σωληνώσεων. Συχνά παρατηρούνται διαρροές κατά τη ροή του αερίου εντός των αγωγών. Αυτό οφείλεται σε αστοχίες των υλικών των αγωγών, όπως η θραύση τους. Για την επίλυση ενός δικτύου σωληνώσεων δημιουργούνται δύο συστήματα. Το πρώτο απαρτίζεται από τις πτώσεις πίεσης για κάθε στοιχείο του δικτύου, δίνοντας αριθμό εξισώσεων ίσο με τον αριθμό των αγωγών. Το δεύτερο μέρος του συστήματος προκύπτει από την εξίσωση συνέχειας σε κάθε κόμβο του δικτύου δίνοντας εξισώσεις όσες και ο αριθμός των κόμβων. Συνεπώς έχουμε εξισώσεις για την πτώση πίεσης σε κάθε κλάδο και εξισώσεις διατήρησης μάζας σε κάθε κόμβο. Ο συνολικός αριθμός εξισώσεων είναι ίσος με τις άγνωστες παροχές στους αγωγούς και τις άγνωστες πιέσεις στους κόμβους και έτσι μπορούμε να επιλύσουμε το δίκτυο.

Για τη μελέτη του θέματος που αναπτύχθηκε στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε ένα εικονικό δίκτυο σωληνώσεων. Αποτελείται από σαράντα ένα (41) αγωγούς, τριάντα πέντε (35) κόμβους, έξι (6) δεξαμενές και δύο (2) συμπιεστές. Η ροή του Φυσικού Αερίου ξεκινά από τις δεξαμενές και μέσω των αγωγών μεταφέρεται στα σημεία όπου υπάρχει η ζήτηση. Κόμβοι είναι το σημείο συνάντησης δύο ή περισσότερων αγωγών. Σε ορισμένες περιπτώσεις

χρησιμοποιούνται και συμπιεστές με σκοπό την αύξηση της πίεσης, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο. Το συγκεκριμένο δίκτυο αποτελείται από τρία τμήματα. Το πρώτο είναι ο κύριος αγωγός, διαμέτρου 36'' και πίεσης 725 psia (50 bar). Δύο ενδιάμεσα δίκτυα που συνδέουν τον κύριο αγωγό με τα δίκτυα πόλης, διαμέτρου 24'' και πίεσης 275 psia (19 bar). Τέλος τα δύο δίκτυα πόλης, χαμηλής πίεσης 58 psia (4 bar).

Αρχικά υπάρχουν ζητήσεις σε τρεις κόμβους του δικτύου. Ο πρώτος ανήκει στον κύριο αγωγό, ο δεύτερος στο ένα από τα δύο δίκτυα πόλης (πάνω δίκτυο) και ο τρίτος στο άλλο δίκτυο (κάτω δίκτυο). Υποθέτουμε διαρροή σε κάθε κόμβο του δικτύου ξεχωριστά και για κάθε διαρροή υπολογίζουμε τιμές των πιέσεων και των παροχών. Υπολογίζουμε τιμές για δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση η ζήτηση στους κόμβους που προαναφέρθηκαν παραμένει σταθερή, ενώ στη δεύτερη η ζήτηση μεταβάλλεται ανάλογα με το σημείο που συμβαίνει η διαρροή και το ποσοστό της διαρροής. Τα ποσοστά διαρροής που εξετάζουμε είναι 1%, 2%, 5% και 10% της ζήτησης. Έτσι όταν η διαρροή παρατηρείται σε κάποιο κόμβο του κυρίου αγωγού, η ζήτηση του κόμβου του κυρίου αγωγού μειώνεται σε ποσοστό ίσο με το ποσοστό της διαρροής. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με τη ζήτηση στους κόμβους του πάνω και κάτω δικτύου, όταν η διαρροή παρατηρείται στο πάνω ή το κάτω δίκτυο αντίστοιχα. Αφού υπολογίσουμε τιμές για διαρροές σε όλους τους κόμβους και για τις δύο περιπτώσεις, δημιουργούνται διαγράμματα της εκατοστιαίας διαφοράς πτώσης πίεσης συναρτήσει των κόμβων.

Ένα πραγματικό δίκτυο μεταφοράς φυσικού αερίου, όπως το δίκτυο της Ελλάδας με μήκος 512 km κύριου αγωγού, 450 km παράπλευρου δικτύου και 6500 km δικτύων πόλεων, αποτελείται από εκατοντάδες ίσως και χιλιάδες κόμβους και αγωγούς. Συνεπώς είναι πολύ δύσκολο και οικονομικά ασύμφορο να τοποθετηθούν





σε όλους αυτούς του κόμβους μετρητικοί σταθμοί της πίεσης και της ροής. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να επιλεγούν οι κατάλληλοι κόμβοι για την τοποθέτηση αυτών των μετρητικών σταθμών. Από την παραμετρική μελέτη των διαγραμμάτων που προέκυψαν, προκύπτουν οι πιο ευαίσθητοι κόμβοι στις διαρροές, οι οποίοι είναι αυτοί στους οποίους θα τοποθετηθούν οι μετρητικοί σταθμοί.

Υπάρχει και μια δεύτερη μέθοδος εύρεσης των συγκεκριμένων κόμβων. Από τη γραμμικοποίηση των εξισώσεων προκύπτει η σχέση πινάκων:

$$(\Delta y) = C (\Delta x)$$

Όπου  $\Delta y$  είναι το διάνυσμα των ποσοστιαίων διαφορών πίεσης. Ο πίνακας  $\Delta x$  είναι το διάνυσμα, των διαρροών. Αρχικά υπολογίζουμε τις μεγαλύτερες ιδιοτιμές του πίνακα  $C$ . Σε κάθε ιδιοτιμή αντιστοιχεί ένα ιδιοδιάνυσμα, του οποίου επιλέγουμε τις μεγαλύτερες συνιστώσες. Η κάθε συνιστώσα του ιδιοδιανύσματος αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο κόμβο. Οι κόμβοι που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης είναι και αυτοί στους οποίους θα τοποθετηθούν οι μετρητικοί σταθμοί.

Στη συνέχεια υποθέτουμε διαδοχικά διαρροή σε κάθε κόμβο του πάνω και κάτω δικτύου ξεχωριστά και υπολογίζουμε τιμές πιέσεων, μόνο στους κόμβους που έχουν τοποθετηθεί οι μετρητικοί σταθμοί. Σκοπός είναι να συμπεράνουμε σε ποια συγκεκριμένη περιοχή του δικτύου συμβαίνει η διαρροή. Τέλος ολοκληρώνουμε με τα συμπεράσματα και τις προτάσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε καλύτερα αποτελέσματα στο μέλλον.



## Πίνακας Περιεχομένων

<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....</b>	<b>6</b>
<b>Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....</b>	<b>8</b>
<b>Κεφάλαιο 3 Περιγραφή Φυσικού Προβλήματος.....</b>	<b>11</b>
3.1 Φυσικό Αέριο-Το καύσιμο του παρόντος και του μέλλοντος.....	11
3.1.1 Τι είναι Φυσικό Αέριο και ποια η προέλευσή του.....	11
3.1.2 Αποθέματα φυσικού αερίου και χρήσεις του.....	13
3.1.3 Φυσικό Αέριο και περιβάλλον.....	14
3.1.4 Το Φυσικό Αέριο στην Ελλάδα.....	15
3.2 Χαρακτηριστικά του Φυσικού Αερίου.....	19
3.2.1 Υδρογονάνθρακες.....	19
3.2.2 Φυσικό αέριο μεθάνιο.....	20
3.2.3 Χημικές ιδιότητες του φυσικού αερίου.....	21
3.2.4 Φυσικές ιδιότητες του φυσικού αερίου.....	21
3.3 Χαρακτηριστικά της Ροής.....	24
3.3.1 Στρωτή και τυρβώδης ροή .....	24
3.3.2 Συμπιεστή Ροή.....	25
<b>Κεφάλαιο 4 Υδραυλικό Μοντέλο.....</b>	<b>27</b>
4.1 Εισαγωγή.....	27
4.2 Μεταβολή πίεσης σε αγωγό.....	27



4.2.1	Ισόθερμη ροή αερίου σε αγωγό.....	27
4.2.2	Πτώση πίεσης λόγω τριβών.....	29
4.2.3	Υπολογισμός συντελεστή τριβής.....	30
4.2.4	Πτώση πίεσης λόγω εξαρτημάτων.....	32
4.2.5	Αύξηση πίεσης λόγω συμπίεσής.....	32
4.3	Σύστημα εξισώσεων για το δίκτυο.....	34
4.4	Μέθοδος επίλυσης εξισώσεων.....	35
<b>Κεφάλαιο 5 Εφαρμογές-Αποτελέσματα.....</b>		<b>36</b>
5.1	Περιγραφή Δικτύου.....	36
5.2	Μελέτη Διαρροών.....	38
5.3	Τοποθέτηση Μετρητικών Σταθμών.....	53
5.3.1	Μέθοδος Παραμετρικής Μελέτης.....	53
5.3.2	Μέθοδος Ιδιοτιμών.....	70
5.4	Εύρεση περιοχής διαρροών.....	78
<b>Κεφάλαιο 6 Αντίστροφος Σχεδιασμός.....</b>		<b>87</b>
6.1	Εισαγωγή.....	87
6.2	Εφαρμογή- Αποτελέσματα.....	88
<b>Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα- Προτάσεις.....</b>		<b>91</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>		<b>94</b>
<b>Παράρτημα.....</b>		<b>96</b>



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εισαγωγή του φυσικού αερίου στην Ελλάδα αποφασίστηκε για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι η προσπάθεια βελτίωσης και εκσυγχρονισμού του ενεργειακού ισοζυγίου της χώρας μας και ο δεύτερος το γεγονός ότι το φυσικό αέριο είναι το «ευγενέστερο» προς το περιβάλλον καύσιμο ευρείας χρήσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι, το έργο υποδομής φυσικού αερίου συνολικού προϋπολογισμού 700 δις. δρχ. είναι το μεγαλύτερο ενεργειακό έργο μετά τον ηλεκτρισμό της Ελλάδας. Η χρησιμοποίηση του στις κεντρικές θερμάνσεις, στις βιομηχανίες και στις βιοτεχνίες των ελληνικών μεγαλουπόλεων, πρόκειται να συμβάλλει καθοριστικά στη βελτίωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Για το λόγω αυτό, το φυσικό αέριο αναμένεται να καλύψει το ένα πέμπτο των εθνικών ενεργειακών αναγκών.

Η Ελλάδα προμηθεύεται το φυσικό αέριο από δύο διαφορετικές χώρες, τη Ρωσία και την Αλγερία. Το φυσικό αέριο από τη Ρωσία φθάνει μέσω αγωγού, ενώ από την Αλγερία με ειδικά δεξαμενόπλοια σε υγροποιημένη μορφή.

Σήμερα η διανομή του φυσικού αερίου γίνεται μέσω δικτύων διεθνώς συνδεδεμένων. Η ροή του μέσα σε έναν αγωγό, είναι συμπίεστη, μόνιμη και μονοφασική. Κάθε δίκτυο σωληνώσεων αποτελείται από τους αγωγούς μέσω των οποίων μεταφέρεται το ρευστό και από τους κόμβους, που είναι το σημείο συνάντησης δύο ή περισσότερων αγωγών. Αρχικά αποφασίζεται η διαδρομή που θα ακολουθήσει το φυσικό αέριο. Στη συνέχεια αποφασίζεται ο τύπος των αγωγών που θα χρησιμοποιηθούν, δηλαδή η διάμετρος και το υλικό με βάση συγκεκριμένες απαιτήσεις όπως είναι η πίεση. Τέλος τοποθετούνται οι δεξαμενές και οι συμπίεστες ώστε να ρυθμίζεται η πίεση του δικτύου στα επιθυμητά επίπεδα.

Η επίλυση δικτύου σωληνώσεων περιλαμβάνει, τον υπολογισμό των παροχών σε κάθε κλάδο του δικτύου και των πιέσεων σε κάθε κόμβο του δικτύου με βάση τις



δεδομένες ζητήσεις στους κόμβους. Οι δεξαμενές και οι συμπιεστές δίνουν στο αέριο την απαραίτητη ενέργεια για να φτάνει στο σημείο κατανάλωσής του, όπως αρχικά έχει απαιτηθεί και σχεδιαστεί.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση, σχετικά με το θέμα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Ακολουθεί στο κεφάλαιο 3 η περιγραφή του φυσικού προβλήματος, δηλαδή περιγράφεται η έννοια του φυσικού αερίου, οι φυσικές και χημικές του ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά της ροής του. Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται το υδραυλικό μοντέλο δηλαδή το σύστημα εξισώσεων, μέσω του οποίου γίνεται ο υπολογισμός των πιέσεων στους κόμβους και των παροχών στους αγωγούς. Το κεφάλαιο 5 είναι αυτό στο οποίο παρουσιάζονται οι εφαρμογές και τα αποτελέσματα. Αρχικά γίνεται η περιγραφή του δικτύου στο οποίο υπολογίστηκαν οι τιμές των πιέσεων και των παροχών. Γίνεται η μελέτη διαρροών μέσω διαγραμμάτων που εμφανίζουν την εκατοστιαία πτώση πίεσης (DP%) σε κάθε κόμβο, για όλα τα ποσοστά διαρροών σε όποιον κόμβο και αν παρουσιάζονται οι διαρροές. Στη συνέχεια γίνεται η τοποθέτηση των σταθμών μέτρησης πίεσης και παροχών, σε συγκεκριμένους κόμβους. Οι συγκεκριμένοι κόμβοι έχουν επιλεγεί προηγουμένους με δύο μεθόδους. Τη παραμετρική μελέτη των διαγραμμάτων και τη μέθοδο των ιδιοτιμών. Αφού τοποθετηθούν οι μετρητικοί σταθμοί, γίνεται ανίχνευση της περιοχής στην οποία συμβαίνει η διαρροή. Στο κεφάλαιο 6, γίνεται αναφορά στις προσπάθειες που έγιναν με σκοπό τον αντίστροφο σχεδιασμό του προβλήματος. Τέλος στο κεφάλαιο 7 αναφέρονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και οι πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η μεταφορά (ροή) φυσικού αερίου αποτελεί συμπιεστή ροή. Στη παρούσα διπλωματική εργασία η ροή συμβαίνει μέσα σε δίκτυα σωληνώσεων. Όμως τα περισσότερα βιβλία μηχανικής ρευστών που διδάσκονται στα διάφορα τμήματα κάνουν αναφορές στη ροή ρευστών μέσα σε απλούς αγωγούς και συνήθως η ροή αυτή είναι ασυμπίεστη. Στο βιβλίο μηχανικής ρευστών του Παπαϊωάννου [1], γίνεται μια πρώτη αναφορά σε δίκτυα σωληνώσεων, ασυμπίεστης όμως ροής. Μια πλήρης αναφορά επίλυσης δικτύων γίνεται στο βιβλίο των Potter και Wiggert [2], πάλι όμως για ασυμπίεστη ροή. Για την εξαγωγή των σχέσεων που διέπουν τη συμπιεστή ροή έγινε χρήση του συγγράμματος του Shapiro [3], καθώς και της διπλωματικής εργασίας του Βαρούτη [4]. Έτσι λοιπόν η επίλυση των δικτύων σωληνώσεων βασίστηκε στα παραπάνω συγγράμματα μόνο που χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις συμπιεστής ροής του τελευταίου συγγράμματος καθώς και της διπλωματικής εργασίας που προαναφέρθηκε.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είχε ως στόχο την βελτίωση υπάρχοντων πηγαίων κωδίκων, για το σχεδιασμό, τη λειτουργία και την βελτιστοποίηση δικτύων τυχαίας γεωμετρίας και πολυπλοκότητας. Αναπτύσσεται ένα πρόγραμμα αντίστροφου σχεδιασμού δικτύων σωληνώσεων τόσο σε συμπιεστά όσο και σε ασυμπίεστα ρευστά. Ο συγκεκριμένος κώδικας επικεντρώνεται στην εύρεση της ισχύος του συμπιεστή. Στη συνέχεια έγινε βελτιστοποίηση του δικτύου κατά το σχεδιασμό. Το κριτήριο για το βέλτιστο σχεδιασμό ήταν το συνολικό κόστος του δικτύου, όπως το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης. Τέλος εκτιμάται το εύρος της παραδοχής της ασυμπίεστότητας. Παρουσιάζεται μια σειρά από εφαρμογές με σκοπό να γίνουν εμφανείς οι διαφορές που εμφανίζονται κατά τη



χρήση κώδικα συμπιεστής και ασυμπίεστης ροής, σε βασικές μεταβλητές ενός δικτύου, όπως η πίεση σε έναν κόμβο, η παροχή σε έναν αγωγό και η πυκνότητα.

Οι σχέσεις του συμπιεστή, καθώς και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες εξήχθησαν από το βιβλίο της θερμοδυναμικής των Cengel και Boles [5], καθώς και από τα βιβλίο του Baehr [6]. Η επίλυση του δικτύου σωληνώσεων έγινε σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB. Σημαντικές πληροφορίες για τη μέθοδο μοντελοποίησης του δικτύου, αλλά και επίλυσης των εξισώσεων που το ορίζουν αντλήθηκαν από το εγχειρίδιο των Biran και Breiner [7], που αποτελεί σημαντικό βοήθημα στη χρήση της γλώσσας MATLAB. Σημαντική ήταν και η βοήθεια του συγγραμματος του Παπαδάκη [8], για την εξαγωγή των μέγιστων ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων, με σκοπό την εύρεση της περιοχής διαρροών με τη μέθοδο των ιδιοτιμών.

Αναφορές για την ανίχνευση διαρροών σε ένα δίκτυο σωληνώσεων γίνονται σε διάφορες δημοσιεύσεις. Στην εργασία των Billmann και Isermann [9], γίνονται προσομοιώσεις σε δίκτυα μεταφοράς υγρών και αερίων και εξάγονται μετρήσεις διαρροών, που δείχνουν πως οι τοποθεσίες που συμβαίνουν μικρές διαρροές μπορούν να βελτιωθούν. Οι τιμές που υπολογίζονται είναι μια παροχή και μια πίεση στην έξοδο του κάθε αγωγού. Έχοντας αυτές τις τιμές αναπτύσσονται μαθηματικά μοντέλα, πάνω στα οποία βασίζονται οι μέθοδοι ανίχνευσης διαρροών. Ενδεικτική αναφορά αποτελεί και η εργασία του Verde [10], που επιλύει το πρόβλημα ανίχνευσης διαρροών χρησιμοποιώντας αισθητήρες για παροχή και πίεση στα άκρα των αγωγών. Ο σχεδιασμός της εύρεσης των διαρροών βασίζεται στην υπόθεση διαρροών στο δίκτυο. Παρουσιάζεται εφαρμογή μιας λειτουργίας για ανίχνευση διαρροών σε δίκτυα σωληνώσεων, χρησιμοποιώντας αισθητήρες στην έξοδο του κάθε αγωγού. Μια ακόμη εκτενέστερη αναφορά, γίνεται στην εργασία των Fukushima,



Maeshima, Kinoshita, Shiraishi και Koshijima [11]. Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται το σύστημα διάγνωσης βλαβών που τοποθετήθηκε στο δίκτυο Νιϊγκάτα-Σαγκάη στην Ιαπωνία. Η δομή της ανίχνευσης διαρροών βασίζεται σε εξισώσεις κυμάτων. Υπολογίζονται τιμές της πίεσης και της παροχής. Γίνεται υπόθεση, πως η διαρροή ορίζεται σε κάθε αισθητήρα σαν τη ροή που χάνεται. Στην περίπτωση που εξασφαλίζεται πως δεν υπάρχει πραγματική διαρροή, εκτελείται μια παράμετρος ρύθμισης της πίεσης με σκοπό τη μείωση του ενδεχομένου να υπάρξουν διαρροές.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

### 3.1 Φυσικό Αέριο-Το καύσιμο του παρόντος και του μέλλοντος

#### 3.1.1 Τι είναι Φυσικό Αέριο και ποια η προέλευσή του

Το φυσικό αέριο είναι ορυκτό καύσιμο όπως το πετρέλαιο και ο άνθρακας. Το ονομάζουμε και ορυκτό καύσιμο επειδή διαμορφώθηκε εκατομμύρια χρόνια πριν από τα υπολείμματα των μικροσκοπικών ζώων και των φυτών θάλασσας. Πριν εκατομμύρια χρόνια έγιναν μεγάλες αναστατώσεις στο στερεό φλοιό της γης. Οι θάλασσες και οι λίμνες ήταν γεμάτες όχι μόνο από ψάρια αλλά και από δισεκατομμύρια μικροσκοπικούς ζωικούς και φυτικούς οργανισμούς (πλαγκτόν). Με το πέρασμα των αιώνων οι οργανισμοί αυτοί καταπλακώθηκαν από λάσπες και όγκους χωμάτων. Το φυσικό αέριο πολλές φορές είναι παγιδευμένο μέσα στους βράχους όπως το νερό στο σφουγγάρι. Το φυσικό αέριο είναι πραγματικά ένα μίγμα αερίων. Το κύριο συστατικό είναι μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ). Το μεθάνιο είναι άοσμο άχρωμο



και άγευστο. Για λόγους ασφαλείας οι επιχειρήσεις φυσικού αερίου προσθέτουν αυτή τη χαρακτηριστική μυρωδιά στο αέριο ώστε να ανιχνεύεται σε περίπτωση διαρροής.

**Σχήμα 3.1: Σχηματική παράσταση Μεθανίου**

Οι άνθρωποι χρησιμοποιούν το φυσικό αέριο συνήθως για θέρμανση. Το φυσικό αέριο σχεδόν πάντα θεωρείται μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούμε να παράγουμε φυσικό αέριο σε σύντομο χρονικό διάστημα. Υπάρχουν μερικές ανανεώσιμες πηγές μεθανίου, όπως οι χωματερές.



Οι πρώτες προσπάθειες εκμετάλλευσης του Φυσικού Αερίου (Φ.Α) ως ενεργειακή πηγή χρονολογούνται από τις αρχές του 20ου αιώνα, όταν στις ΗΠΑ έγιναν οι πρώτες γεωτρήσεις και κατασκευάστηκαν οι πρώτοι υποτυπώδεις αγωγοί μεταφοράς. Όμως το παγκόσμιο ενεργειακό τοπίο μετεβλήθη λόγω της ενεργειακής κρίσης κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 70'. Η προσπάθεια για μείωση της εξάρτησης της οικονομίας από το πετρέλαιο είχε σαν αποτέλεσμα την ισχυροποίηση της θέσης του φυσικού αερίου. Έτσι, κατά την περίοδο 1970-1996 η κατανάλωση του φυσικού αερίου τριπλασιάστηκε και έκτοτε συνεχίζει να αυξάνεται με ταχύ ρυθμό. Το φυσικό αέριο είναι δύσκολο να βρεθεί δεδομένου ότι είναι παγιδευμένο στους πορώδεις βράχους βαθιά στη γη. Οι επιστήμονες χρησιμοποιούν πολλές μεθόδους για να βρουν τις δεξαμενές του φυσικού αερίου. Εξετάζοντας τους επιφανειακούς βράχους βρίσκουν ενδείξεις για την πιθανή ύπαρξή του. Άλλες φορές με ελεγχόμενες μικρές εκρήξεις ή μικρές σεισμικές δονήσεις καταγράφουν την ύπαρξη του φυσικού αερίου.

Το φυσικό αέριο μπορεί να βρεθεί στις υπόγειες δεξαμενές πετρελαίου. Τα φρεάτια φυσικού αερίου φθάνουν σε βάθος 1500 μέτρα κατά μέσο όρο. Τα μικροσκοπικά θαλάσσια φυτά και τα ζώα πέθαναν και τα απομεινάρια τους έμειναν στον ωκεάνιο βυθό. Κατά τη διάρκεια του χρόνου, καλύφθηκαν από στρώματα λάσπης και άμμου. Με το πέρασμα εκατομμυρίων χρόνων, τα υπολείμματα θάβονταν όλο και βαθύτερα. Η τεράστια θερμότητα και η πίεση τα μετέτρεψαν σε πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Σήμερα, κάνουμε γεωτρήσεις και μέσω των στρωμάτων της άμμου, του βούρκου και των πετρωμάτων φθάνουμε στους σχηματισμούς βράχου που περιέχουν πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Αφότου βγαίνει το φυσικό αέριο από το έδαφος, στέλνεται σε εγκαταστάσεις όπου καθαρίζεται από τις προσμίξεις του και



χωρίζεται στα διάφορα μέρη του. Το φυσικό αέριο είναι συνήθως μεθάνιο, αλλά περιέχει και μικρά ποσά άλλων αερίων όπως το προπάνιο και το βουτάνιο.

### 3.1.2 Αποθέματα φυσικού αερίου και χρήσεις του

Σήμερα, τα μεγαλύτερα γνωστά αποθέματα αερίου, περίπου 40% του συνόλου, βρίσκονται στην πρώην ΕΣΣΔ, σημερινή Ρωσία και κυρίως τη Σιβηρία. Ακολουθεί η Μέση Ανατολή με περίπου 32%, κυρίως το Ιράν, ενώ στη Δυτική Ευρώπη τα αποθέματα αντιστοιχούν στο 4% περίπου. Οι μεγαλύτεροι καταναλωτές είναι η Ρωσία με 31% του συνόλου και οι ΗΠΑ με 28%, η Δυτική Ευρώπη με 15% και η Ιαπωνία με 3%. Οι μεγαλύτεροι εξαγωγείς είναι η Ρωσία με 38% του συνόλου, ο Καναδάς με 14%, το Τουρκμενιστάν με 9%, η Ολλανδία και η Αλγερία με 8%. Οι μεγαλύτεροι εισαγωγείς είναι η Ουκρανία με 17%, οι ΗΠΑ με 14%, η Γερμανία με 13% και η Ιαπωνία με 12%. Συγκριτικά με το πετρέλαιο, υπάρχει πολύ μεγαλύτερη επάρκεια αποθεμάτων φυσικού αερίου και η τροφοδοσία της παγκόσμιας ενεργειακής αγοράς είναι κατά πολύ ασφαλέστερη. Ως εκ τούτου, η επιλογή του φυσικού αερίου ως κύριας ενεργειακής πηγής αποτελεί παγκόσμια στρατηγική επιλογή. Το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται τόσο στα σπίτια όσο και στη βιομηχανία. Η βιομηχανία μάλιστα είναι ο μεγαλύτερος χρήστης. Το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται επίσης ως συστατικό στα λιπάσματα, τις κόλλες, τα χρώματα, τα απορρυπαντικά πλυντηρίων, και σε πολλά άλλα αγαθά. Το φυσικό αέριο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ακριβώς όπως η χημική ενέργεια του άνθρακα χρησιμοποιείται για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια, ανάλογα χρησιμοποιείται και η ενέργεια του αερίου. Το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται ακόμη και ως καύσιμο για τα αυτοκίνητα. Η καύση του φυσικού αερίου εκπέμπει λιγότερους ρύπους στην



ατμόσφαιρα απ' ότι η βενζίνη. Τα οχήματα πρέπει να έχουν ειδικό εξοπλισμό για να χρησιμοποιήσουν το φυσικό αέριο ως καύσιμο.

### 3.1.3 Φυσικό Αέριο και περιβάλλον

Σημαντικό ρόλο για την αποδοχή του φυσικού αερίου διαδραμάτισε η εκτεταμένη επιβάρυνση του περιβάλλοντος από την καύση των συμβατικών καυσίμων. Σε μια εποχή όπου τα σοβαρά προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης απαιτούν ενεργειακές επιλογές που συνδυάζουν την οικονομική ανάπτυξη με την περιβαλλοντική προστασία, είναι λογικό η ζήτηση του φυσικού αερίου να αυξάνεται ταχύτατα.

Το φυσικό αέριο, λόγω της μορφής και της σύστασης του, θεωρείται ένα κατεξοχήν οικολογικό καύσιμο. Οι ρύποι που εκλύονται στο περιβάλλον κατά την καύση του είναι σημαντικά μειωμένοι σε σχέση με αυτούς που παράγονται από τα άλλα συμβατικά καύσιμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το φυσικό αέριο, ενώ παγκοσμίως συμμετέχει στην κατανάλωση καυσίμων κατά 22.5%, ευθύνεται μόνο για το 16% των εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Για την παραγωγή ίσου ποσού ενέργειας, το φυσικό αέριο εκπέμπει 30% λιγότερο CO<sub>2</sub> σε σχέση με το πετρέλαιο και 50% λιγότερο CO<sub>2</sub> σε σχέση με τον άνθρακα. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένου ότι το CO<sub>2</sub> είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες δημιουργίας του Φαινομένου του Θερμοκηπίου. Όσον αφορά τους άλλους παραγόμενους ρύπους, το φυσικό αέριο εκπέμπει 2 φορές λιγότερο CO και 4700 φορές λιγότερο SO<sub>2</sub> από το μαζούτ. Σε σύγκριση με το ντίζελ η εκπομπή CO και SO<sub>2</sub> είναι μειωμένη κατά 2,3 και 733 φορές αντίστοιχα.

Επιπλέον, η καύση του φυσικού αερίου είναι καθαρή, με αποτέλεσμα τη μειωμένη εκπομπή αιθάλης και αιωρούμενων σωματιδίων. Ως οικολογικό καύσιμο,



το φυσικό αέριο παρουσιάζει ένα ακόμη πλεονέκτημα μιας και η υψηλότερη απόδοση της καύσης του έχει σαν αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι και 30%. Η μειωμένη εκπομπή των SOx περιορίζει τη δημιουργία του φαινομένου της όξινης βροχής, προστατεύοντας με αυτό τον τρόπο τα δάση και τους βιότοπους. Ταυτόχρονα, λόγω της χαμηλής εκπομπής SO<sub>2</sub>, επιβραδύνεται η φθορά αρχαίων μνημείων.

Το Φυσικό Αέριο κατά συνέπεια, έχει αναδειχθεί στο κατεξοχήν οικολογικό καύσιμο του 21ου αιώνα και η ισχυροποίηση της θέσης του στην ενεργειακή θέση της Ελλάδας θα προωθούσε ουσιαστικά εκείνο το είδος ανάπτυξης που συμβαδίζει με την προστασία της φύσης και του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα η εισαγωγή του Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα αποφασίστηκε από την Πολιτεία στα πλαίσια της προσπάθειας εκσυγχρονισμού και βελτίωσης του ενεργειακού ισοζυγίου της χώρας. Το φυσικό αέριο είναι μια σύγχρονη και αποδοτική πηγή ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον, που χρησιμοποιείται εύκολα και με ασφάλεια.

#### **3.1.4 Το Φυσικό Αέριο στην Ελλάδα**

Το Φυσικό Αέριο που διανέμεται στην Ελλάδα έχει ελάχιστη περιεκτικότητα σε μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) 85%. Τα λοιπά συστατικά του είναι αιθάνιο (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), προπάνιο (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), πεντάνιο (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>), βουτάνιο (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), άζωτο (N<sub>2</sub>), διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Η εισαγωγή και η αξιοποίηση του Φυσικού Αερίου προϋποθέτουν την ύπαρξη κατάλληλης υποδομής, για τη μεταφορά, την αποθήκευση και τη διανομή του. Η βασική υποδομή του Ελληνικού Συστήματος περιλαμβάνει:

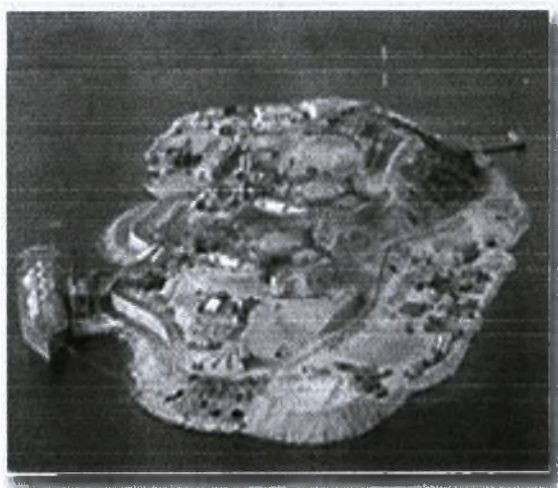


- Τον κύριο αγωγό, μήκους 512 km, που εκτείνεται από τα βόρεια σύνορα μέχρι την Αττική, με παράπλευρους κλάδους, μήκους 450 km.



**Σχήμα 3.2: Το ελληνικό δίκτυο μεταφοράς φυσικού αερίου**

- Τον τερματικό Σταθμό του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG) στη νησίδα Ρεβυθούσα, στον κόλπο των Μεγάρων.



**Σχήμα 3.3: Σταθμός υγροποιημένου φυσικού αερίου στη Ρεβυθούσα**

- Τα Δίκτυα Κατανομής και Διανομής Φυσικού Αερίου στις πόλεις, συνολικού μήκους 6500 km περίπου.





Η αγορά του Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα παρουσιάζει έντονη τάση ανάπτυξης. Σήμερα αποτελεί πλέον πραγματικότητα, καλύπτοντας το 6% του εθνικού ενεργειακού ισοζυγίου με σημαντικές προοπτικές αύξησης. Η συνολική κατανάλωση ανήλθε σε  $1,9 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  το έτος 2000, ενώ το έτος 2002 έφθασε τα  $2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ . Το 74% περίπου του Φυσικού Αερίου που καταναλώνεται στην Ελλάδα προέρχεται από τη Ρωσία. Το Φυσικό Αέριο από τη Ρωσία φθάνει μέσω αγωγού. Το σύστημα μεταφοράς απαρτίζεται από μια σειρά κύριων αγωγών υψηλής πίεσης (50 bar), οι αγωγοί είναι διαμέτρου 36 ιντσών και εκτείνονται από τα ελληνο-βουλγαρικά σύνορα μέχρι την Αττική, συνολικού μήκους 512 km και από διακλαδώσεις συνολικού μήκους 450 km, με επίσης υψηλή πίεση. Το σύστημα μεταφέρει το Φυσικό Αέριο στην Ανατολική Μακεδονία, τη Θράκη, τη Θεσσαλονίκη, το Βόλο και την Αττική. Προ των πυλών της πόλης η πίεση μεταφοράς μειώνεται και αρχίζει το αστικό δίκτυο διανομής διαμέσου του οποίου το Φυσικό Αέριο μεταφέρεται στα νοικοκυριά, στους χώρους δραστηριοτήτων του τριτογενούς τομέα και στις βιομηχανίες. Έχει μελετηθεί επίσης η υποβρύχια διασύνδεση των αγωγών φυσικού αερίου της Ελλάδας και της Ιταλίας και αφού διέλθει ο αγωγός από την ξηρά, θα γίνει η σύνδεση με τον υφιστάμενο αγωγό στο ύψος της Λαμίας. Το υπόλοιπο 26% του Φυσικού Αερίου που καταναλώνεται στην Ελλάδα, προέρχεται από την Αλγερία, μεταφέρεται με ειδικά δεξαμενόπλοια στη νησίδα Ρεβυθούσα σε υγροποιημένη μορφή (LNG). Ο αγωγός από τη νήσο Ρεβυθούσα οδεύει βόρεια της περιοχής της Μάνδρας και Ασπροπύργου και καταλήγει στον κεντρικό αγωγό βόρεια των ΕΛΔΑ.



Το έργο του υγροποιημένου φυσικού αερίου (Natural Gas) περιλαμβάνει τις εγκαταστάσεις υποδοχής, αποθήκευσης και αεριοποίησης, δηλαδή:

1. Ειδικές λιμενικές εγκαταστάσεις για την εκφόρτωση του LNG από ειδικά κατασκευασμένα δεξαμενόπλοια,
2. Σύστημα εκφόρτωσης για δύο αφίξεις το μήνα,
3. Δυο δεξαμενές αποθήκευσης χωρητικότητας 60.000 m<sup>3</sup> η κάθε μία, που είναι υπόγειες μέχρι το ύψος πλήρωσής τους με LNG,
4. Συμπιεστές και εμβαπτιζόμενες αντλίες,
5. Συγκρότημα αεριοποιητών LNG δηλαδή εναλλάκτες θαλασσινού νερού, αεριοποιητές καύσης και ρευστού,
6. Μονάδα παραγωγής αζώτου που μαζί με το νερό χρησιμεύει για την αντιμετώπιση εκτάκτων αναγκών,
7. Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την ενεργειακή αυτονομία των εγκαταστάσεων,
8. Σύστημα πυρσού απαερίων με πυρσούς εδάφους,
9. Σύστημα πυροπροστασίας,
10. Βοηθητικές παροχές.

Η νησίδα συνδέεται απέναντι με την Αττική με δύο υποθαλάσσιους αγωγούς διαμέτρου 24 ιντσών. Από εκεί αγωγός περίπου 30 km συνδέει το σταθμό με τον κύριο αγωγό. Η μονάδα υγροποίησης έχει ήδη κάνει την επεξεργασία ώστε να απομακρυνθούν τα στερεά σωματίδια, το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό τα οποία ενδέχεται να δημιουργήσουν προβλήματα στη λειτουργία. Η μεταφορά του





υγροποιημένου φυσικού αερίου γίνεται με ειδικά κατασκευασμένο πλοίο Century που ναυλώθηκε για 8 χρόνια από τις αρχές του 1998. Μπορεί να μεταφέρει LNG, αιθυλένιο, αιθάνιο και υγραέριο μέσα σε 8 μέρες από την Αλγερία. Η πρώτη παραλαβή έγινε στις 20 Νοεμβρίου του 1999. Το αέριο αυτό που κοστίζει περισσότερο από το ρωσικό φυσικό αέριο, αξιοποιήθηκε κυρίως για τον εμπλουτισμό των ήδη υπαρχόντων ποσοτήτων του αερίου και τη διασφάλιση της πτώσης πίεσης που είναι σύνθητες φαινόμενο κατά τους χειμερινούς μήνες.

## 3.2 Χαρακτηριστικά του Φυσικού Αερίου

### 3.2.1 Υδρογονάνθρακες

Οι υδρογονάνθρακες είναι ενώσεις άνθρακα και υδρογόνου (HC), οι οποίες έχουν την ιδιότητα να οξειδώνονται ταχέως, δηλαδή να καίγονται παράγοντας θερμότητα. Η δημιουργία τους αποδίδεται σε μια διαδικασία μετασχηματισμού / αποσύνθεσης ζωικών και φυτικών οργανικών υλών που είναι εγκλωβισμένες σε ιζηματογενή πετρώματα.

Το πέτρωμα από το οποίο προέρχεται ο φυσικός υδρογονάνθρακας ονομάζεται «μητρικό πέτρωμα». Στις περισσότερες περιπτώσεις το πέτρωμα αυτό είναι αργιλώδους και σπανίως ασβεστώδους σύστασης. Οι υδρογονάνθρακες τείνουν να μεταναστεύσουν από το μητρικό πέτρωμα προς την επιφάνεια, εξαιτίας των θερμικών μεταβολών και των πιέσεων οι οποίες αναπτύσσονται στο υπέδαφος ή εξαιτίας της δράσεως υπογείων υδάτων και τεκτονικών φαινομένων.

Κατά την ανοδική τους πορεία οι υδρογονάνθρακες συναντούν πορώδη πετρώματα (άμμο, ψαμμόλιθο) τα οποία αποτελούν το ιδανικό καταφύγιο τους. Μάλιστα, πάνω από τα πετρώματα υπάρχει ένα μη-διαπερατό στρώμα λόγου χάρη ένα αργιλώδες ιζημα, το οποίο εμποδίζει την περαιτέρω μετακίνηση, συγκρατώντας



τους μέσα στο πορώδες πέτρωμα. Το πέτρωμα αυτό ονομάζεται «πέτρωμα αποθήκευσης». Το μη-διαπερατό στρώμα ονομάζεται «πέτρωμα κάλυψης».

Οι φυσικοί υδρογονάνθρακες ταξινομούνται ως εξής:

- **Υγροί:** το αργό πετρέλαιο από το οποίο λαμβάνονται με απόσταξη τα υγρά καύσιμα (πετρέλαιο, μαζούτ, βενζίνη, κ.λπ), η άσφαλτος και το υγροποιημένο Φ.Α (LNG).

- **Αέριοι:** το φυσικό αέριο, που αποτελείται ουσιαστικά από μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ), το οποίο κατά κανόνα δεν απαιτεί καμιά προηγούμενη επεξεργασία «αναμόρφωσης», διανέμεται στα αστικά δίκτυα αντικαθιστώντας το αέριο πόλης (x φωταέριο), που συνήθως παράγονταν από ορυκτό άνθρακα, λιγνίτη, τύρφη, ή από καυσόξυλα.

- **Στερεοί:** υπάρχουν και ορισμένοι στερεοί φυσικοί υδρογονάνθρακες, οι οποίοι εντούτοις δε θα μας απασχολήσουν λόγω του ότι η χρησιμοποίησή τους δε σχετίζεται με τους αέριους υδρογονάνθρακες.

### 3.2.2 Φυσικό αέριο - μεθάνιο

Το φυσικό αέριο συχνά ονομάζεται λόγω συντομίας μεθάνιο, επειδή ο υδρογονάνθρακας αυτός αποτελεί το κύριο συστατικό του. Η εκατοστιαία περιεκτικότητα του φυσικού αερίου τόσο σε μεθάνιο όσο στα υπόλοιπα συστατικά ποικίλλει από κοίτασμα σε κοίτασμα αλλά τα κύρια χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου που εισάγεται στην Ελλάδα βρίσκονται εντός των ορίων ανοχής και δεν δημιουργούν κανένα πρόβλημα στην κατανάλωση.

Το φυσικό αέριο είναι ένωση άχρωμη, άοσμη και μη-τοξική. Χάρη στη καθαρότητα του, η καύση του παράγει ουσιαστικά μόνο υδρατμούς και διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και άρα αποτελεί μεταξύ των ορυκτών καυσίμων (υδρογονάνθρακες



και άνθρακας), την καθαρότερη και λιγότερο ρυπογόνο πρωτογενή πηγή ενέργειας που είναι σήμερα διαθέσιμη.

### 3.2.3 Χημικές ιδιότητες του φυσικού αερίου

Οι χημικές ιδιότητες του φυσικού αερίου προσδιορίζονται με τη μέθοδο της χρωματογραφικής ανάλυσης, η οποία επιτρέπει τον καθορισμό της σύνθεσης του. Το φυσικό αέριο που διανέμεται στην Ελλάδα έχει ελάχιστη περιεκτικότητα σε μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ), 85%. Τα λοιπά συστατικά του φυσικού αερίου είναι το αιθάνιο ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), το προπάνιο ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), το βουτάνιο ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), το πεντάνιο ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ), το άζωτο ( $\text{N}_2$ ), το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), κ.λπ.

Το φυσικό αέριο αποτελεί μίγμα κορεσμένων αλειφατικών υδρογονανθράκων, δηλαδή των κοινώς ονομαζόμενων παραφινών. Κορεσμένοι είναι οι υδρογονάνθρακες εκείνοι όπου το κάθε άτομο του άνθρακα (C), ο οποίος είναι τετρασθενές στοιχείο, συνδέεται με 4 άλλα άτομα (C και / ή  $\text{H}_2$ ). Οι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες έχουν τον γενικό χημικό τύπο  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ . Το πρώτο μέλος αυτής της σειράς υδρογονανθράκων είναι το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ). Ακολουθούν με αύξουσα τιμή του  $n$ , το αιθάνιο ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), το προπάνιο ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) κ.λπ.

Στους υδρογονάνθρακες (παραφίνες) με αριθμό ατόμων άνθρακα C μεγαλύτερο ή και ίσο του 4 εμφανίζεται το φαινόμενο της ισομέρειας, δηλαδή ενώσεις που έχουν τον ίδιο μοριακό τύπο αλλά διαφορετική δομή. Όσο αυξάνει η τιμή του  $n$  τόσο αυξάνει ο αριθμός των ισομερών.

### 3.2.4 Φυσικές ιδιότητες του φυσικού αερίου

Οι φυσικές ιδιότητες του φυσικού αερίου εξαρτώνται από τη σύσταση του και από την περιεκτικότητα του στις συστατικές του χημικές ενώσεις. Οι ιδιότητες αυτές



προσδιορίζονται με μαθηματικούς υπολογισμούς που βασίζονται στη σύνθεση του ή πειραματικά με εργαστηριακές αναλύσεις.

#### ❖ Μέτρηση του όγκου

Ο όγκος του αερίου μπορεί να μετρηθεί υπό διάφορες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Ειδικότερα, για το φυσικό αέριο χρησιμοποιούνται κατά κανόνα δυο διαφορετικές μονάδες μέτρησης του όγκου:

- το Κανονικό κυβικό μέτρο ( $\text{Nm}^3$ ), είναι η μονάδα του φυσικού αερίου υπό συνθήκες  $0^\circ\text{C}$  και  $1013\text{mbar}$ .
- το Πρότυπο κυβικό μέτρο ( $\text{Stm}^3$ ), είναι η μονάδα όγκου του αερίου υπό συνθήκες  $15^\circ\text{C}$  και  $1013\text{mbar}$ .

#### ❖ Θερμογόνος δύναμη

Η θερμογόνος δύναμη (ανώτερη και κατώτερη) μπορεί να υπολογισθεί θεωρητικά εφόσον είναι γνωστή η σύνθεση του εξεταζόμενου αερίου. Η μέτρηση της ανώτερης και κατώτερης θερμογόνου δύναμης μπορεί να πραγματοποιηθεί και στο εργαστήριο με τη βοήθεια ειδικών οργάνων τα οποία ονομάζονται «θερμιδόμετρα» και μετρούν τη θερμότητα που μεταβιβάζεται σε έναν αγωγό θερμότητας (στην προκειμένη περίπτωση στο νερό) από τη καύση της μονάδας όγκου ενός αερίου.

Αποτελεί την ποσότητα της θερμότητας που εκλύεται κατά την τέλεια καύση υπό σταθερή πίεση ενός  $\text{m}^3$  αερίου όταν τα προϊόντα της καύσης αναχθούν στην αρχική θερμοκρασία. Ειδικότερα, διακρίνονται δυο τύποι θερμογόνου δύναμης:

#### • Ανώτερη θερμογόνος δύναμη ( $H_o$ )

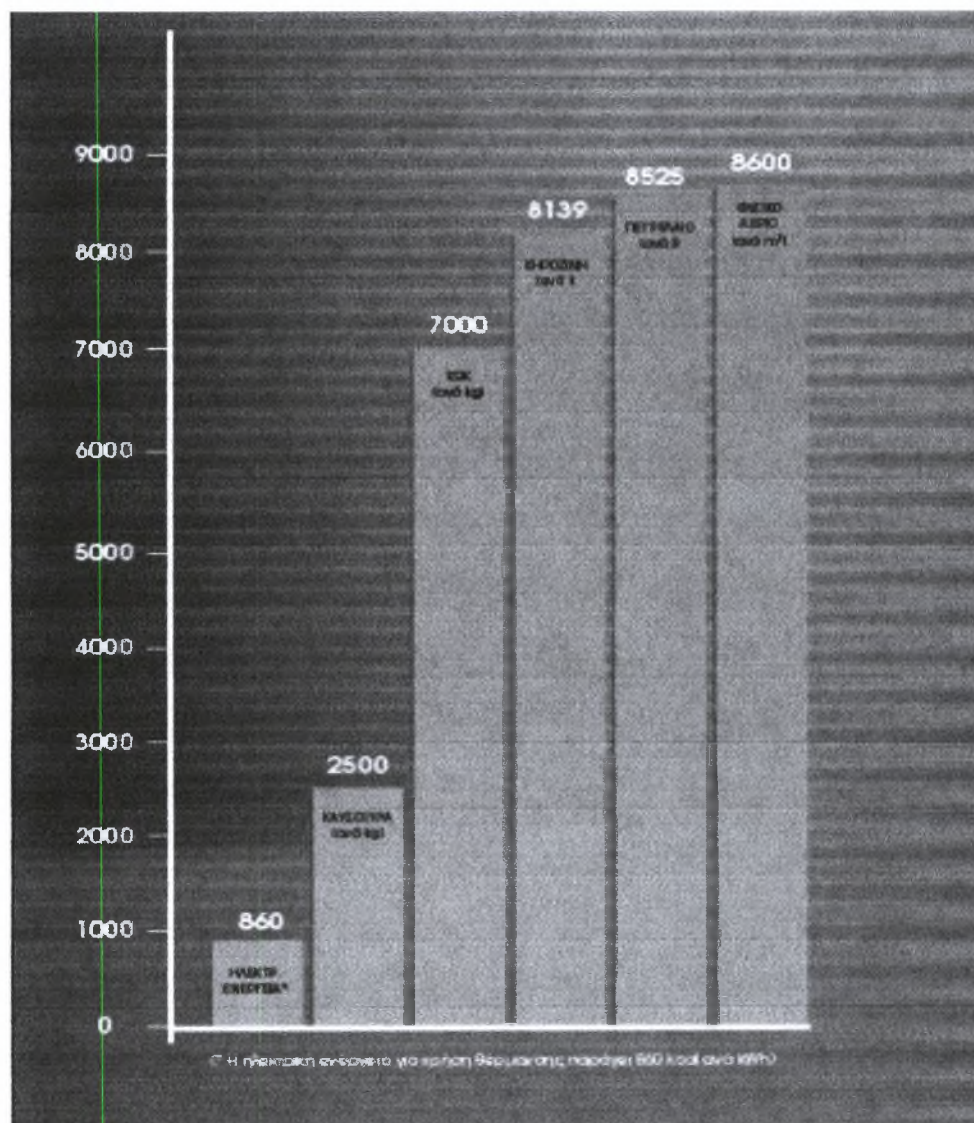
Η Α.Θ.Δ. είναι η ενέργεια ανά μονάδα μάζας καυσίμου, που απελευθερώνεται κατά την πλήρη καύση του, όταν η θερμοκρασία των καυσαερίων που παράγονται



φθάσει στους  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  και οι παραγόμενοι υδρατμοί υγροποιηθούν απελευθερώνοντας έτσι τη θερμότητα συμπύκνωσής τους. Μονάδα μέτρησής της είναι:  $\text{J}/\text{Nm}^3$

• Κατώτερη θερμογόνος δύναμη (Hu)

Η Κ.Θ.Δ. είναι η ενέργεια ανά μονάδα μάζας του καυσίμου, που εκλύεται μετά από πλήρη καύση με την υποθετική προϋπόθεση, ότι τα καυσαέρια φθάνουν στους  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  αλλά οι υδρατμοί δεν υγροποιούνται κρατώντας έτσι δεσμευμένη την ενέργεια συμπύκνωσής τους. Γι' αυτό είναι:  $\text{Κ.Θ.Δ.} < \text{Α.Θ.Δ.}$ .



Σχήμα 3.4: Κατώτερη θερμογόνος δύναμη ορισμένων καυσίμων





### 3.3 Χαρακτηριστικά της Ροής

#### 3.3.1 Στρωτή και τυρβώδης ροή

Όπως είναι γνωστό, ο Reynolds το 1883 απέδειξε πειραματικά, ότι οι ροές διακρίνονται σε δύο διαφορετικούς τύπους. Τις στρωτές και τις τυρβώδεις. Στη στρωτή ροή, το ρευστό κινείται ομαλά και κατά στρώματα (ή στιβάδες), χωρίς σωματίδια ρευστού του ενός στρώματος να μεταφέρονται στο αμέσως γειτονικό του, αφού δεν υπάρχει συνιστώσα ταχύτητας εγκάρσια προς τη διεύθυνση ροής του. Στη μόνιμη κατάσταση η ταχύτητα και η πίεση είναι χρονικά αμετάβλητες σε κάθε σημείο του πεδίου ροής.

Στη τυρβώδη ροή, τα σωματίδια του ρευστού κινούνται σε ακανόνιστες τροχιές προς όλες τις διευθύνσεις κατά εντελώς τυχαίο τρόπο. Η κίνηση αυτή των σωματιδίων μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με τη θερμική κίνηση των μορίων. Στο είδος αυτό της ροής λαμβάνει χώρα έντονη ανάμιξη του ρευστού. Σε ένα σημείο του πεδίου ροής η ταχύτητα και η πίεση δεν είναι χρονικά σταθερές, αλλά παρουσιάζουν πολύ ακανόνιστες διακυμάνσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί η βασική κίνηση του ρευστού επικαλύπτεται από μια ακανόνιστη ροή με διακυμάνσεις υψηλής συχνότητας παράλληλα και εγκάρσια προς τη βασική ροή.

Η βασική παράμετρος η οποία χαρακτηρίζει το είδος μιας ροής, ως στρωτής ή τυρβώδης είναι ο αριθμός Reynolds (Re), ο οποίος ορίζεται από τη γενική εξίσωση:

$$Re = \frac{u_0 l_0}{\nu} \quad (3.1)$$

Όπου  $\nu$  είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού,  $u_0$  κάποια ταχύτητα αναφοράς και  $l_0$  ένα χαρακτηριστικό μήκος το οποίο εξαρτάται από τη γεωμετρία του εξεταζόμενου προβλήματος. Για ροή σε αγωγούς κυκλικής διατομής, ως ταχύτητα αναφοράς χρησιμοποιείται η μέση ταχύτητα ( $u$ ) του ρευστού και ως χαρακτηριστικό μήκος, η εσωτερική διάμετρος ( $d$ ) του αγωγού. Έτσι, η εξίσωση (3.1) γράφεται:



$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (3.2)$$

Η ροή μέσα σε ένα λείο αγωγό θεωρείται στρωτή, όταν ο αδιάστατος αριθμός Reynolds έχει τιμή μικρότερη από μια κρίσιμη  $Re \leq 2300$ . Κάτω από την τιμή αυτή, η ροή είναι πάντοτε στρωτή. Σε τεχνικές εφαρμογές η ροή θεωρείται σίγουρα τυρβώδης για τιμές του  $Re$  μεγαλύτερες από 10.000.

Η περίπτωση της τυρβώδους ροής του φυσικού αερίου σε κυλινδρικό αγωγό αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της εργασίας αυτής. Η ροή του φυσικού αερίου μέσα στον αγωγό θεωρείται συμπίεστη, μόνιμη και πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδης ροή.

### 3.3.2 Συμπίεστη Ροή

Με τον όρο συμπίεστη ροή εννοούμε κάθε ροή, στην οποία η πυκνότητα του ρευστού μεταβάλλεται σημαντικά κατά μήκος μιας ροϊκής γραμμής. Τα φαινόμενα συμπίεστότητας εμφανίζονται συνήθως σε υψηλές ταχύτητες ροής αερίων όπως για παράδειγμα στην ροή αέρα γύρω από αεροσκάφη και την ροή ρευστών σε συμπίεστες και στροβίλους. Όμως υπάρχουν και παραδείγματα όπου η επίδραση της συμπίεστότητας είναι σημαντική και για ροές υγρών, όπως είναι το υδραυλικό πλήγμα και τα κύματα πίεσης που δημιουργούνται από υποβρύχιες εκρήξεις. Για το χαρακτηρισμό μιας ροής ως συμπίεστη ή ασυμπίεστης, χρησιμοποιείται σαν κριτήριο ο αριθμός Mach,  $M$ , δηλαδή ο λόγος:

$$M = \frac{u}{a}, \quad (3.3)$$

όπου  $u$  είναι η τοπική ταχύτητα του ρευστού και  $a$  η αντίστοιχη ταχύτητα του ήχου.

Στις τεχνικές εφαρμογές, ως συμπίεστη ροή χαρακτηρίζεται κάθε ροή στην οποία ο αριθμός Mach είναι μεγαλύτερος από το 0,3. Στην παρούσα εργασία το ρευστό που



μεταφέρεται είναι φυσικό αέριο με αποτέλεσμα η ροή μέσα στους αγωγούς να θεωρείται συμπίεστη. Με βάση την τιμή του αριθμού Mach, διακρίνουμε τρία βασικά είδη συμπίεστης ροής: την υποηχητική ( $M < 1$ ), την ηχητική ( $M = 1$ ) και την υπερηχητική ( $M > 1$ ). Εκτός από τα τρία αυτά είδη, αναφέρεται συχνά και μία άλλη περιοχή συμπίεστης ροής, η διηχητική ροή ( $0,9 \leq M \leq 1,2$ ). Στην παρούσα εργασία η ροή θεωρήθηκε μονοδιάστατη και το φυσικό αέριο, ως τέλειο αέριο. Η μονοδιάστατη ανάλυση περιορίζεται στις περιπτώσεις όπου η ταχύτητα και η πυκνότητα μπορεί να θεωρηθούν σταθερές σε τυχαία διατομή του αγωγού μεταφοράς του αερίου. Για μονοδιάστατη συμπίεστη ροή, η μακροσκοπική εξίσωση συνέχειας σε αγωγό μεταβαλλόμενης διατομής είναι:

$$D(\rho A u) = 0 \Rightarrow \rho A u = c t, \quad (3.4)$$

και λαμβάνει την μορφή:

$$\dot{m} = \rho_1 A_1 u_1 = \rho_2 A_2 u_2 \Rightarrow Q_1 = Q_2, \quad (3.5)$$

η μακροσκοπική εξίσωση γραμμικής ορμής, την μορφή:

$$\mathbf{F} = \dot{m} (\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1), \quad (3.6)$$

και η μακροσκοπική εξίσωση ενέργειας, αμελώντας τις μεταβολές της δυναμικής ενέργειας, την μορφή:

$$\frac{\dot{Q} - \dot{W}_s}{\dot{m}} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + h_2 - h_1, \quad (3.7)$$

Όμως για την ανάλυση της συμπίεστης ροής, εκτός από τις τρεις εξισώσεις διατήρησης της μάζας, ορμής και ενέργειας, είναι απαραίτητη και η καταστατική εξίσωση του ρέοντος ρευστού. Και αυτό γιατί, στη συμπίεστη ροή οι άγνωστες μεταβλητές είναι τέσσερις (η πυκνότητα, η πίεση, η θερμοκρασία και η ταχύτητα).





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

### 4.1 Εισαγωγή

Η ροή σε ένα δίκτυο σωληνώσεων ξεκινά από τις δεξαμενές και καταλήγει μέσω αγωγών στα σημεία όπου υπάρχει ζήτηση. Συνδέοντας αυτά τα σημεία, μέσω σωληνώσεων, δημιουργείται το δίκτυο. Βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου είναι οι αγωγοί, μέσω των οποίων γίνεται η μεταφορά του αερίου, οι κόμβοι, το σημείο δηλαδή όπου συναντιούνται δύο οι περισσότεροι αγωγοί. Σημαντικό είναι να ληφθούν εξαρχής και διάφορες βασικές παράμετροι του δικτύου, όπως ο τύπος των αγωγών (μήκος, διάμετρος, υλικό και τραχύτητα). Επίσης γίνεται και ορισμός των διαφόρων εξαρτημάτων του δικτύου, όπως βαλβίδες και συνδέσεις καθώς και των χαρακτηριστικών των συμπίεστών (ισχύς, βαθμός απόδοσης). Έχοντας πλέον όλα αυτά τα δεδομένα έχουμε δημιουργήσει τη γεωμετρία του δικτύου και μπορεί να ξεκινήσει η επίλυσή του.

### 4.2 Μεταβολή πίεσης σε αγωγό

#### 4.2.1 Ισόθερμη ροή αερίου σε αγωγό

Όταν η ροή είναι ισόθερμη, η ταχύτητα του ήχου  $a$ , ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, παραμένει σταθερή και ισχύει ότι:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{p_1}{p_2} \quad (4.1)$$

Όπου η πρώτη αναλογία προέρχεται από την ισότητα της ταχύτητας του ήχου, η μεσαία από τη σταθερή παροχή μάζας και η τελευταία από την εφαρμογή της καταστατικής εξίσωσης

$$P = \rho R^* T \quad \text{ή} \quad T = \frac{P}{\rho R^*} = \text{ct} \quad (4.2)$$



όπου  $p$  είναι η απόλυτη πίεση,  $\rho$  η πυκνότητα,  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία,  $R^* = \frac{R}{MB}$  η ειδική σταθερά του αερίου,  $R$  η σταθερά των ιδανικών αερίων και  $M.B$  το μοριακό βάρος του αερίου. Μετά από λογαρίθμηση και παραγωγή ως προς την πυκνότητα της σχέσης (4.2) προκύπτει:

$$\frac{dp}{p} = \frac{d\rho}{\rho} \Rightarrow dp = p \frac{d\rho}{\rho} \quad (4.3)$$

Ο αριθμός Mach δίνεται από τη σχέση:

$$M = \frac{u}{a} = \frac{u}{\sqrt{\gamma R^* T}} = \frac{u}{\sqrt{\lambda \frac{p}{\rho}}} \quad (4.4)$$

Ακολουθώντας την ίδια επεξεργασία όπως παραπάνω έχουμε:

$$\ln M = \ln u - \ln(\sqrt{\gamma R^* T}) \Rightarrow \ln M = \ln u - \frac{1}{2} \ln(\gamma R^* T) \Rightarrow \frac{dM}{M} = \frac{du}{u} \quad (4.5)$$

ομοίως παραγωγίζεται η εξίσωση της συνέχειας (3.5), η οποία σε συνάρτηση με τη σχέση (4.5) δίνει:

$$\rho A u = \text{const} \Rightarrow \frac{d\rho}{\rho} + \frac{du}{u} + \frac{dA}{A} = 0 \Rightarrow \frac{d\rho}{\rho} = \frac{dM}{-M} \quad (4.6)$$

Σε γενικευμένη μορφή οι εξισώσεις ορμής με σταθερό ιξώδες είναι:

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_i \quad (4.7)$$

Εισάγωντας τις καταστατικές εξισώσεις Navier-Stokes στην περίπτωση της μονοδιάστατης μόνιμης ροής, στη διεύθυνση  $x$  η εξίσωση της ορμής παίρνει τη μορφή:

$$\rho u \frac{du}{dt} = -\frac{dp}{dx} + \rho g_x + \frac{d}{dx} \left( \mu \frac{du}{dx} \right) \quad (4.8)$$

και για διαφορά ύψους  $dz$

$$\rho u du + dp + \rho g dz + dp_L = 0 \quad (4.9)$$



Η πτώση πίεσης λόγω τριβής δίνεται από τη σχέση Darcy-Weisbach:

$$dp_L = f \frac{L}{d} \rho \frac{u^2}{2} \quad (4.10)$$

η οποία για συμπιεστή ροή, εισάγοντας τον αριθμό Mach με την ταχύτητα ήχου είναι:

$$\alpha^2 = \gamma \frac{p}{\rho} \quad (4.11)$$

$$\text{δίνει } dp_L = f \frac{dx}{x} \rho \frac{u^2}{2} = f \frac{dx}{d} \gamma \frac{p}{\alpha^2} \frac{u^2}{2} = f \frac{dx}{d} \gamma p \frac{M^2}{2} \quad (4.12)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (4.3) και (4.12) στην εξίσωση της ορμής,

$$\rho u du + dp + dp_L = 0 \quad (4.13)$$

$$\text{προκύπτει ότι: } p \frac{d\rho}{\rho} + \rho u^2 \frac{du}{u} + f \frac{dx}{x} \gamma p \frac{M^2}{2} = 0 \quad (4.14)$$

διαιρώντας την προηγούμενη σχέση με  $p$  προκύπτει

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{\rho}{p} u^2 \frac{du}{u} + f \frac{dx}{d} \gamma \frac{M^2}{2} = 0 \Rightarrow -\frac{dM}{M} + \frac{\rho}{p} u^2 \frac{du}{u} + f \frac{dx}{d} \gamma \frac{M^2}{2} = 0 \quad (4.15)$$

Γνωρίζοντας ότι  $\frac{\rho}{p} = \frac{1}{R^* T} = \frac{\gamma}{\gamma R^* T} = \frac{\gamma}{\alpha^2}$  και εισάγοντας τη σχέση (4.5) στη (4.15)

$$\text{προκύπτει ότι } -\frac{dM}{M} + \frac{\gamma u^2}{\alpha^2} \frac{dM}{M} + f \frac{dx}{d} \gamma \frac{M^2}{2} = 0 \text{ ή } -dM + \gamma M^2 dM + f \frac{dx}{d} \gamma \frac{M^3}{2} = 0$$

Άρα η εξίσωση της ορμής σε συνάρτηση του αριθμού Mach γίνεται:

$$f \frac{dx}{d} = \frac{2dM}{\gamma M^3} - \frac{2dM}{M} \quad (4.16)$$

#### 4.2.2 Πτώση πίεσης λόγω τριβών

Η παροχή μάζας δίνεται από τη σχέση  $Q = A \rho u$  όπου αντικαθιστώντας με τις σχέσεις (4.11) και (4.3) προκύπτει:



$$Q = A \rho u = A \gamma \frac{p}{a^2} \frac{u^2}{u} = A \frac{\gamma M^2 \rho R^* T}{u} \quad (4.17)$$

Λύνοντας ως προς  $M^2$  προκύπτει

$$M^2 = \frac{Q}{A \gamma \rho R^* T} \quad (4.18)$$

Με ολοκλήρωση της σχέσης (4.16) μεταξύ της αρχής και του τέλους του σωλήνα που συμβολίζονται με τα σημεία 1 και 2 αντίστοιχα, προκύπτει ότι:

$$\int_1^2 \frac{f}{d} dx = \int_1^2 \frac{2}{\gamma M^3} dM - \int_1^2 \frac{2}{M} dM \Rightarrow f \frac{l}{d} = \frac{1}{\gamma M_1^2} - \frac{1}{\gamma M_2^2} - 2 \ln M_2 + 2 \ln M_1 \quad \text{ή}$$

$$f \frac{l}{d} = \frac{1}{\gamma M_1^2} - \frac{1}{\gamma M_2^2} - \ln M_2 + \ln M_1 = \frac{1}{\gamma M_1^2} \left(1 - \frac{M_1^2}{M_2^2}\right) - 2 \ln \frac{M_2}{M_1} \quad (4.19)$$

Συνδυάζοντας τα παραπάνω με τις σχέσεις (4.1) και (4.18) καταλήγουμε στις εκφράσεις

$$f \frac{l}{d} = \frac{1}{\gamma M_1^2} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2\right) - 2 \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{A R^* T \rho_1}{Q u_1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2\right) - 2 \ln \frac{p_1}{p_2} \Rightarrow$$

$$f \frac{l}{d} = \frac{A R^* T \rho_1}{Q u_1 p_1} (p_1^2 - p_2^2) - 2 \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{A^2}{Q^2 R^* T} (p_1^2 - p_2^2) - 2 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Τέλος μετά από κατάλληλη επεξεργασία προκύπτει η σχέση πτώσεις πίεσης

$$(p_1^2 - p_2^2) = \frac{Q^2 R^* T}{A^2} \left(2 \ln \frac{p_1}{p_2} + f \frac{l}{d}\right) \quad (4.20a)$$

Θεωρώντας την πυκνότητα του αερίου μέσα στον αγωγό σαν τη μέση τιμή των πυκνοτήτων στα άκρα του αγωγού η σχέση (4.20a) γίνεται:

$$P_L = p_1 - p_2 = \frac{Q^2}{2 \rho_m A^2 g_c} \left(2 \ln \frac{p_1}{p_2} + f \frac{l}{d}\right) \quad (4.20b)$$

### 4.2.3 Υπολογισμός συντελεστή τριβής

Υπάρχουν αρκετές εκφράσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής. Για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής  $f$  χρησιμοποιείται συνήθως το διάγραμμα Moody,



που αποτελεί μια σχετικά ακριβή προσεγγιστική μέθοδο. Υπάρχουν όμως και εκφράσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό, για συγκεκριμένο εύρος τιμών του αριθμού Reynolds (Re) της ροής. Για αριθμούς  $Re > 4000$ , το διάγραμμα Moody απεικονίζεται αρκετά ικανοποιητικά από την εξίσωση Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\frac{e}{d}}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (4.21)$$

όπου  $e$  η τραχύτητα του αγωγού.

Η εξίσωση Colebrook είναι ένας έξυπνος συνδυασμός των εξισώσεων Prandtl:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log (Re \sqrt{f}) - 0,8 \quad (4.22)$$

Η συγκεκριμένη εξίσωση, που ισχύει για αριθμούς  $Re > 10^5$ , έχει το μειονέκτημα ότι είναι πεπλεγμένης μορφής ως προς τη μεταβλητή  $f$ . Αυτό σημαίνει ότι, για τη λύση της, απαιτείται η επαναληπτική μέθοδος με δοκιμή και σφάλμα,

και Nikuradse: 
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left( \frac{d}{e} \right) + 1,14 \quad (4.23)$$

Η σχέση αυτή συνδέει το συντελεστή τριβής με τη σχετική τραχύτητα του σωλήνα έχει λογαριθμική μορφή παρόμοια προς την εμπειρική σχέση του Prandtl (4.22). Διαπιστώθηκε πως η σχέση αυτή συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα για τραχείς σωλήνες και για τιμές  $(d/e)/(Re \sqrt{f}) > 0,005$ . Συνεπώς η εξίσωση (4.21) για  $e \ll$ , παίρνει τη μορφή της εξίσωσης (4.22), ενώ για  $Re \gg$ , παίρνει τη μορφή της εξίσωσης (4.23). Η εξίσωση Colebrook είναι πεπλεγμένης μορφής ως προς  $f$  και, για τη λύση της, απαιτείται η επαναληπτική διαδικασία δοκιμή και σφάλμα, που είναι ακριβής αλλά χρονοβόρα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η σχέση των

$$\text{Swamee-Jain: } f = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( 0,27 \frac{e}{d} + 5,74 \frac{1}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (4.24)$$



που ουσιαστικά δίνει τα ίδια αποτελέσματα με την σχέση του Colebrook (4.21) σε πολύ μικρότερο χρόνο. Η σχέση (4.24) είναι ακριβής για  $5000 < Re < 10^8$  και για  $10^{-8} < e/d < 0,01$ .

#### 4.2.4 Πτώση πίεσης λόγω εξαρτημάτων

Τα διάφορα εξαρτήματα σε ένα σωλήνα δημιουργούν μια πτώση πίεσης στο δίκτυο. Η πτώση πίεσης είναι ανάλογη του συντελεστή  $K_m$ , ο οποίος παίρνει διάφορες τιμές για κάθε εξάρτημα και δίνεται από τη σχέση:

$$P_m = K_m \rho_m \frac{u^2}{2}, \text{ ή} \quad (4.25)$$

$$P_m = K_m \frac{Q^2}{2 \rho_m A^2} \quad (4.26)$$

όπου  $\rho_m$  είναι η μέση τιμή της πυκνότητας στον αγωγό.

#### 4.2.5 Αύξηση πίεσης λόγω συμπίεσής

Για την υπερνίκηση της πτώσης πίεσης γίνεται χρήση συμπιεστών. Συμπιεστές είναι οι συσκευές που προκαλούν αύξηση της πίεσης, όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο σε ένα δίκτυο.

Η εξίσωση ενέργειας για συμπιεστές είναι:

$$W_{in} - W_{out} = Q_2 \left( h_2 + \frac{u_2^2}{2} + g z_2 \right) - Q_1 \left( h_1 + \frac{u_1^2}{2} + g z_1 \right) \quad (4.27)$$

Όμως για αμελητέα αλλαγή στην κινητική ενέργεια και την υψομετρική διαφορά και επειδή ισχύει το ισοζύγιο μάζας  $Q_2 = Q_1 = Q$  η σχέση (4.27) γίνεται:

$$W_{in} - W_{out} = Q (h_2 - h_1) = Q c_p (T_2 - T_1) \quad (4.28\alpha)$$

Εάν έχουμε και απουσία έργου τότε:

$$W_{in} = Q c_p (T_2 - T_1) \quad \text{ή} \quad W_{in} = Q c_p T_1 \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \quad (4.28\beta)$$



Για ισεντροπική συμπίεση που προκαλεί ο συμπιεστής έχουμε από την ισεντροπική σχέση των ιδανικών αερίων

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4.29)$$

Άρα η σχέση (4.28β) γίνεται:

$$W_{in} = Q c_p T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) = Q c_p T_1 \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right) \quad (4.30)$$

Επίσης από τη θερμοδυναμική έχουμε ότι  $c_p = c_v + R^*$  και  $\frac{c_p}{c_v} = \gamma$ . Με συνδυασμό των δύο

$$\text{προηγούμενων σχέσεων προκύπτει: } c_p = R^* \frac{\gamma}{\gamma - 1} \quad (4.31)$$

Τελικά η (4.30) γίνεται:

$$W_{in} = Q R^* T_1 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right) \quad (4.32\alpha)$$

Μετατρέποντας την ισχύ του συμπιεστή σε ίππους η (4.32α) γίνεται:

$$W_{in} = \frac{Q R^* T}{550} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right) \quad (4.32\beta)$$

$$\text{Συνεπώς: } \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{550 \cdot W_{in}}{Q \cdot R^* \cdot T} \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1} + 1\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4.33)$$

Οπότε η αύξηση πίεσης λόγω του συμπιεστή είναι:

$$P_p = p_1 \cdot \left(\left(\frac{550 \cdot W_{in}}{Q \cdot R^* \cdot T} \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1} + 1\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right) \quad (4.34)$$

όπου  $T$  η θερμοκρασία του δικτύου και  $p_1, p_2$  οι πιέσεις πριν και μετά τον συμπιεστή.



### 4.3 Σύστημα εξισώσεων για το δίκτυο

Για την επίλυση ενός δικτύου σωληνώσεων δημιουργούνται δύο γραμμικά συστήματα, το πρώτο απαρτίζεται από τις πτώσεις πίεσης για κάθε στοιχείο του δικτύου, δίνοντας  $x$  εξισώσεις, όσες και ο αριθμός των αγωγών. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (4.20β), (4.26) και (4.34) και για συμπιεστές σταθερής ισχύος προκύπτει η σχέση:

$$\Delta P_i = P_{Li} + P_m + P_{pi}$$

όπου  $P_L$  είναι η πτώση πίεσης λόγω τριβών,  $P_m$  η πτώση πίεσης λόγω εξαρτημάτων και  $P_p$  η αύξηση πίεσης λόγω συμπιεστή στον αγωγό  $i$ , αντίστοιχα.

Συνεπώς:

$$\Delta P_i = \frac{Q^2}{2 \cdot \rho_m \cdot A_i^2 \cdot g_c} \left( 2 \ln \frac{p_i^1}{p_i^2} + f_i \frac{L_i}{d_i} \right) + \sum K_m \frac{Q^2}{2 \cdot \rho_m \cdot A_i^2 \cdot g_c} - p_i^1 \left( \left( \frac{550 W_m \gamma}{Q \cdot R \cdot T \gamma - 1} + 1 \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad (4.35)$$

Ο συμπιεστής θεωρήθηκε στην αρχή του αγωγού  $i$  και οι εκθέτες 1,2 συμβολίζουν τον κόμβο αρχής και τέλους του αγωγού  $i$ .

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

$$\sum_i (\pm) Q_{ij} - D_j = 0 \quad (4.36)$$

Όπου  $D_j$  η ζήτηση στον κόμβο  $j$  και  $Q_j$  η παροχή μάζας του σωλήνα  $i$  που φτάνει ή φεύγει από τον κόμβο  $j$ , ενώ το πρόσημο  $\pm$  χρησιμοποιείται ανάλογα με το αν η ροή φτάνει προς τον κόμβο ή αν η ροή φεύγει από τον κόμβο. Συνεπώς έχουμε  $x$  εξισώσεις για την πτώση πίεσης σε κάθε κλάδο και  $y$  εξισώσεις διατήρησης μάζας σε κάθε κόμβο. Ο συνολικός αριθμός εξισώσεων είναι  $(x+y)$  ίσος με τις αγνώστους  $x$  παροχές στους αγωγούς και  $y$  πιέσεις στους κόμβους και έτσι μπορούμε να επιλύσουμε το δίκτυο.





#### 4.4 Μέθοδος επίλυσης εξισώσεων

Η ροή του Φυσικού Αερίου μέσα σε ένα δίκτυο σωληνώσεων είναι, όπως προαναφέρθηκε, συμπιεστή. Συνεπώς η τιμή της πυκνότητας δεν παραμένει σταθερή σε όλο το δίκτυο, αλλά μεταβάλλεται. Αρχικά ορίζουμε τιμές πιέσεων στο δίκτυο. Η επαναληπτική διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων πτώσης πίεσης, ξεκινά με τον αρχικό υπολογισμό των τιμών των πυκνοτήτων. Η επίλυση γίνεται αντικαθιστώντας σε κάθε επανάληψη τις παλαιές τιμές των πυκνοτήτων με τις νέες. Η επαναληπτική διαδικασία σταματά όταν η διαφορά στις τιμές των πιέσεων, ανάμεσα στην τελευταία και προτελευταία επανάληψη γίνει μεγαλύτερη από  $10^{-5}$ . Όταν ικανοποιηθεί το συγκεκριμένο κριτήριο, τυπώνονται οι τελικές τιμές των πιέσεων, των παροχών και των πυκνοτήτων του δικτύου. Το μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων, αποτελούμενο από τις εξισώσεις συνέχειας και τις εξισώσεις πτώσης πίεσης, επιλύεται με την μέθοδο Newton, μέσω της συνάρτησης «fsolve» του Matlab.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 Περιγραφή Δικτύου

Το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από σαράντα ένα (41) αγωγούς και τριάντα πέντε (35) κόμβους. Περιλαμβάνει τρία τμήματα. Τον κύριο αγωγό, ο οποίος περιέχει τους κόμβους 1, 2, 3, 4, 5, 20, 21, 22, 23 και 35. Τα ενδιάμεσα δίκτυα που συνδέουν τον κύριο αγωγό με τα δίκτυα πόλης, που αποτελούνται το πρώτο από τους κόμβους 6, 7 και 8 και το δεύτερο από τους 24, 25 και 26. Τέλος τα δίκτυα πόλης, που αποτελούνται το πρώτο (πάνω δίκτυο) από τους κόμβους 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 και 19, και το δεύτερο (κάτω δίκτυο) από τους 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 και 34. Η πίεση του κύριου αγωγού είναι 50 bar, των ενδιάμεσων δικτύων 19 bar και των δικτύων πόλης 4 bar. Τα μήκη καθώς και οι διαμέτροι των αγωγών ποικίλουν ανάλογα με το τμήμα του δικτύου στο οποίο βρίσκονται. Για παράδειγμα οι αγωγοί του κύριου αγωγού έχουν μήκος 300 ft και διάμετρο 36'', των ενδιάμεσων δικτύων έχουν μήκος 150 ft και διάμετρο 24'', τέλος των δικτύων πόλης έχουν μήκος από 50 ft έως 112 ft και διάμετρο από 8'' έως 24''. Στον πίνακα 5.1 φαίνονται αναλυτικά οι τιμές των μηκών και των διαμέτρων των αγωγών του δικτύου. Η τραχύτητα των αγωγών είναι 0,005 ft. Οι δεξαμενές που έχουν τοποθετηθεί στο δίκτυο βρίσκονται στους κόμβους 1, 6, 9, 24 και 27. Η πίεση της δεξαμενής στο κόμβο 1 είναι 725 psia, η μέγιστη τιμή πίεσης που μπορεί να έχει ο κύριος αγωγός, στους κόμβους 6 και 24 πίεση 275 psia, η μέγιστη που μπορεί να έχει το ενδιάμεσο δίκτυο και στους κόμβους 9 και 27 οι δεξαμενές έχουν πίεση 58 psia αντίστοιχα. Επίσης στο δίκτυο έχουν τοποθετηθεί και δύο (2) συμπιεστές, στους κόμβους 2 και 25 με ισχύ 657,67 Hp. Ζητήσεις υπάρχουν στους κόμβους 16, 33 και 35, κάθε ζήτηση είναι ίση με 10 lb/hr. Θεωρήθηκαν σε όλους τους αγωγούς εξαρτήματα με συντελεστή  $k=10$ . Η γεωμετρία του δικτύου φαίνεται στο σχήμα 5.1.



ΑΓΩΓΟΣ	ΜΗΚΟΣ (ft)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (in)
1	300	36
2	0	36
3	300	36
4	300	36
5	150	24
6	150	24
7	150	24
8	150	24
9	70,71	24
10	50	12
11	50	8
12	70,71	8
13	50	8
14	50	8
15	50	8
16	50	8
17	50	8
18	50	12
19	50	24
20	50	24
21	50	8
22	111,8	8
23	300	36
24	300	36
25	0	36
26	300	36
27	150	24
28	150	24
29	150	24
30	150	24
31	50	8
32	50	8
33	50	8
34	50	8
35	50	8
36	50	8
37	50	8
38	50	8
39	111,8	8
40	50	8
41	300	36

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: Τιμές μήκους και διαμέτρου του κάθε αγωγού**



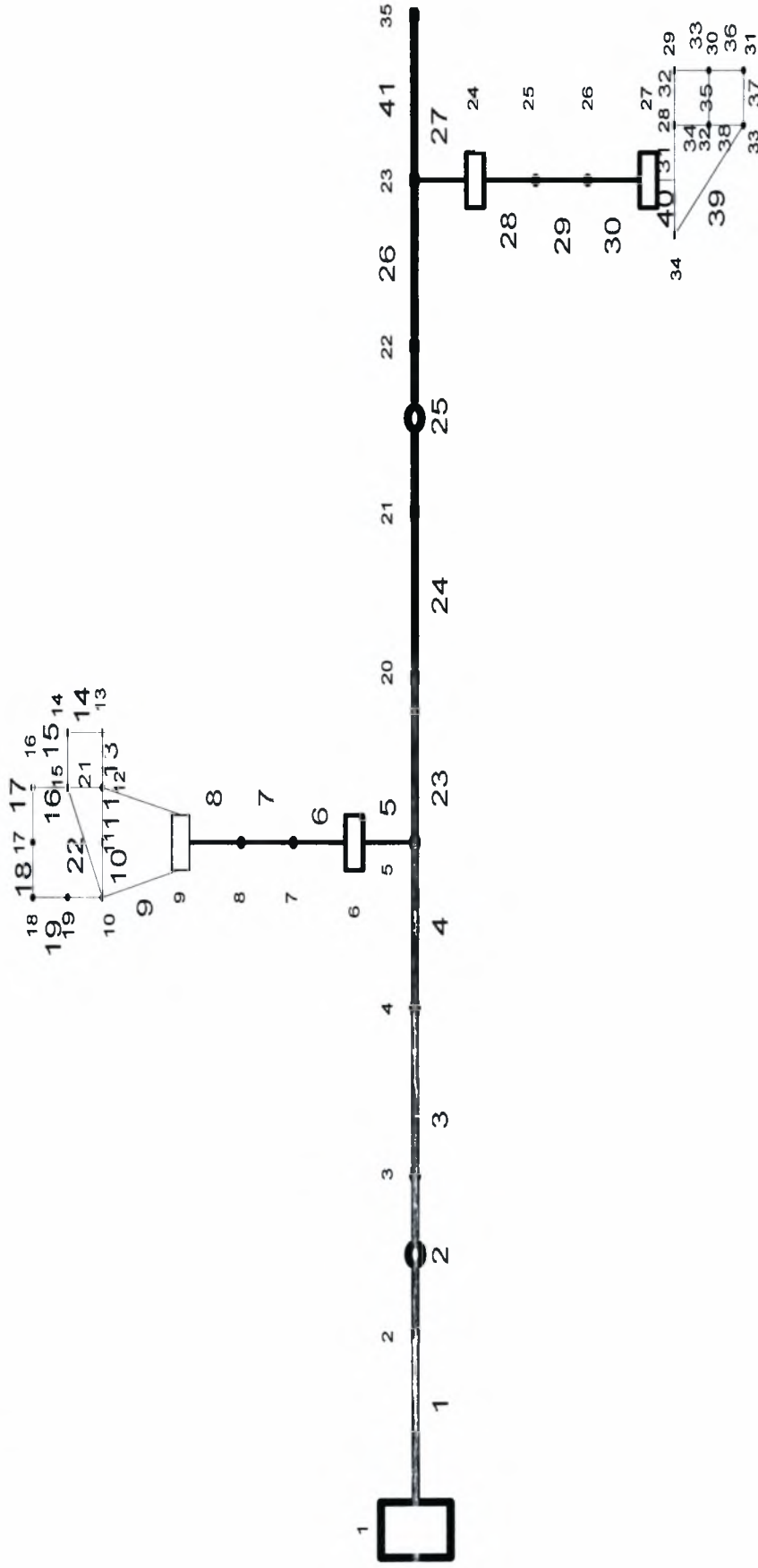
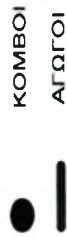
## 5.2 Μελέτη Διαρροών

Υποθέτουμε διαρροή σε κάθε κόμβο ξεχωριστά, εκτός από τους κόμβους στους οποίους υπάρχουν ζητήσεις και δεξαμενές. Τα ποσοστά διαρροών που εξετάζουμε είναι αρχικά, 1% της ζήτησης, στη συνέχεια 2% της ζήτησης, μετά 5% και τέλος 10%. Μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις. **Περίπτωση Α:** Η ζήτηση παραμένει σταθερή σε όποιο κόμβο και αν συναντάται η διαρροή. **Περίπτωση Β:** Η ζήτηση μειώνεται ανάλογα με το μέγεθος της διαρροής και με τον κόμβο στον οποίο συμβαίνει αυτή. Έτσι όταν η διαρροή παρατηρείται στους κόμβους του κύριου αγωγού μειώνεται η ζήτηση του κόμβου 35, όταν παρατηρείται στους κόμβους του πάνω δικτύου ή του ενδιάμεσου δικτύου που ενώνει τον κύριο αγωγό με το πάνω δίκτυο μειώνεται η ζήτηση του κόμβου 16 και τέλος όταν η διαρροή παρατηρείται στους κόμβους του κάτω δικτύου ή στο ενδιάμεσο δίκτυο που ενώνει το κάτω δίκτυο με τον κύριο αγωγό μειώνεται η ζήτηση του κόμβου 33.

Έχοντας πλέον γνωστά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως τα μήκη, οι διάμετροι και η τραχύτητα των αγωγών, τη θέση και την πίεση των δεξαμενών, την θέση και την ισχύ των συμπιεστών, τις ζητήσεις σε όποιους κόμβους και αν υπάρχουν, αλλά και τα χαρακτηριστικά του αερίου όπως η θερμοκρασία, είμαστε σε θέση να επιλύσουμε το σύστημα που αποτελείται από τις εξισώσεις (4.35) και (4.36). Έτσι με βάση την εξίσωση της πτώσης πίεσης (4.35) μπορούμε να υπολογίσουμε τις πιέσεις και στους τριάντα πέντε (35) κόμβους του δικτύου και με βάση την εξίσωση συνέχειας (4.36) μπορούμε να υπολογίσουμε τις παροχές στους σαράντα ένα (41) αγωγούς του δικτύου. Αρχικά υπολογίζουμε τις πιέσεις και τις παροχές υποθέτοντας μόνο ζητήσεις στο δίκτυο και καμία διαρροή. Η διαρροή σε κάποιο σημείο του δικτύου έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των μετρήσεων σε πιέσεις και παροχές. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι πιέσεις και οι παροχές



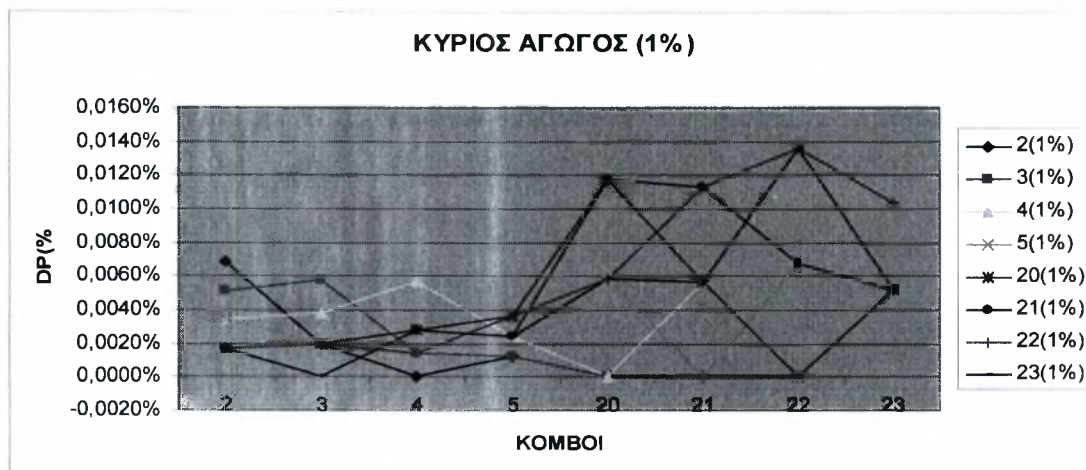
υποθέτοντας διαρροή σε κάθε κόμβο ξεχωριστά με τον τρόπο που αναφέρθηκε προηγουμένως. Αφού γνωρίζουμε τις πιέσεις και στους τριάντα πέντε (35) κόμβους, πολύ εύκολα μπορούμε να υπολογίσουμε και την πτώση πίεσης  $\Delta P$  στην έξοδο του κάθε αγωγού. Έτσι λοιπόν είμαστε σε θέση γνωρίζοντας τις πτώσεις πίεσης να μπορούμε να υπολογίσουμε την εκατοστιαία διαφορά πτώσης πίεσης  $DP(\%)$ , ανάμεσα στην πτώση πίεσης του κάθε κόμβου όταν δεν παρατηρείται διαρροή και στην πτώση πίεσης του κάθε κόμβου όταν συμβαίνει η διαρροή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα εκατοστιαίας διαφοράς πτώσης πίεσης  $DP(\%)$  για κάθε κόμβο στον οποίο παρατηρείται διαρροή, συναρτήσει των κόμβων και για τις δύο περιπτώσεις. Για κάθε ποσοστό διαρροής (1%, 2%, 5% και 10%) σχεδιάζονται τρία διαφορετικά διαγράμματα. Το πρώτο για τον κύριο αγωγό, το δεύτερο για το πάνω δίκτυο μαζί με το ενδιάμεσο δίκτυο και το τρίτο για το κάτω δίκτυο μαζί με το ενδιάμεσο.



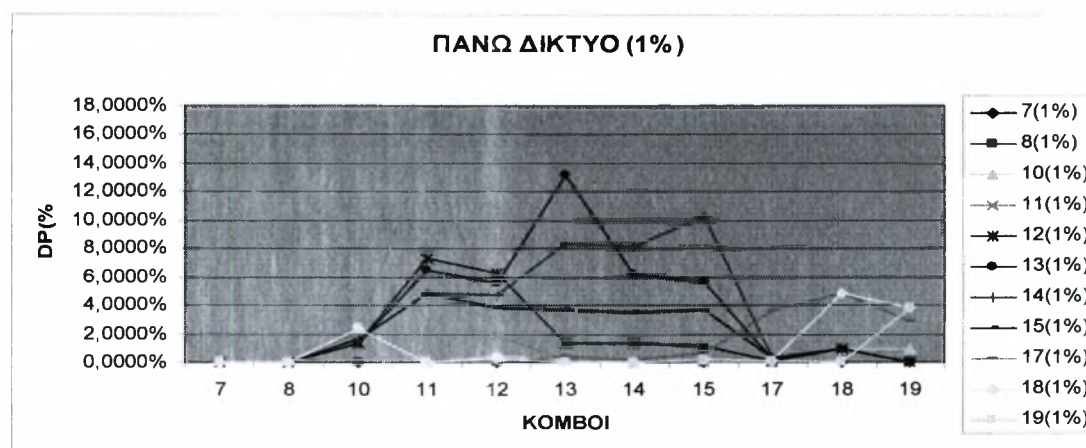


## ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α

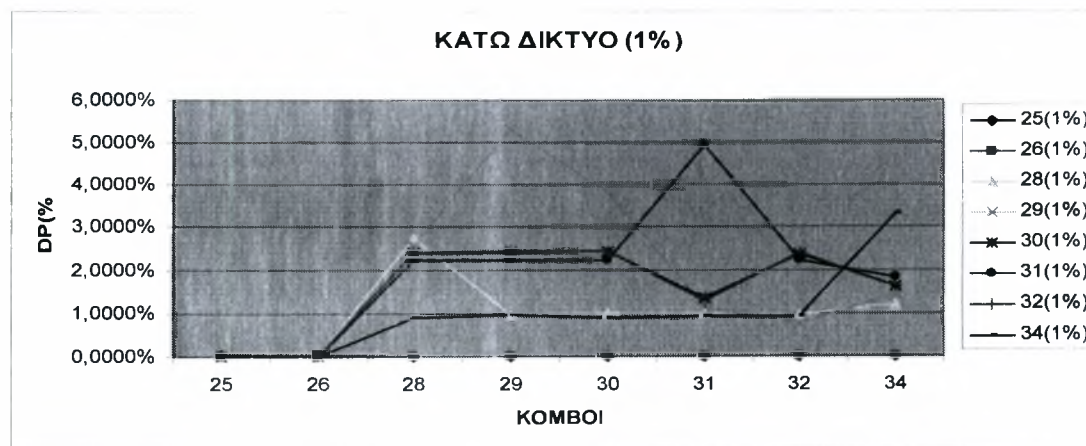
### **ΔΙΑΡΡΟΗ 1%:**



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στον κύριο αγωγό



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στο πάνω δίκτυο

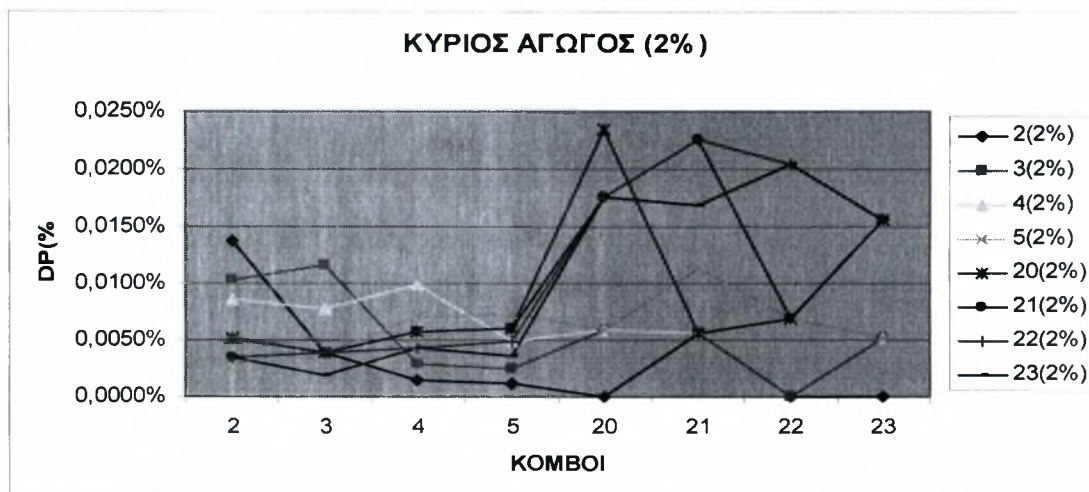


**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στο κάτω δίκτυο

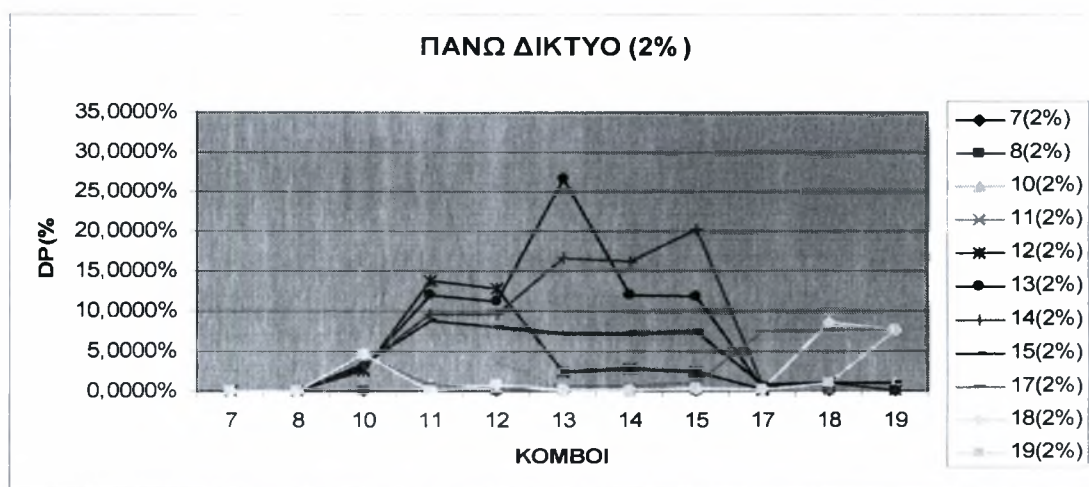




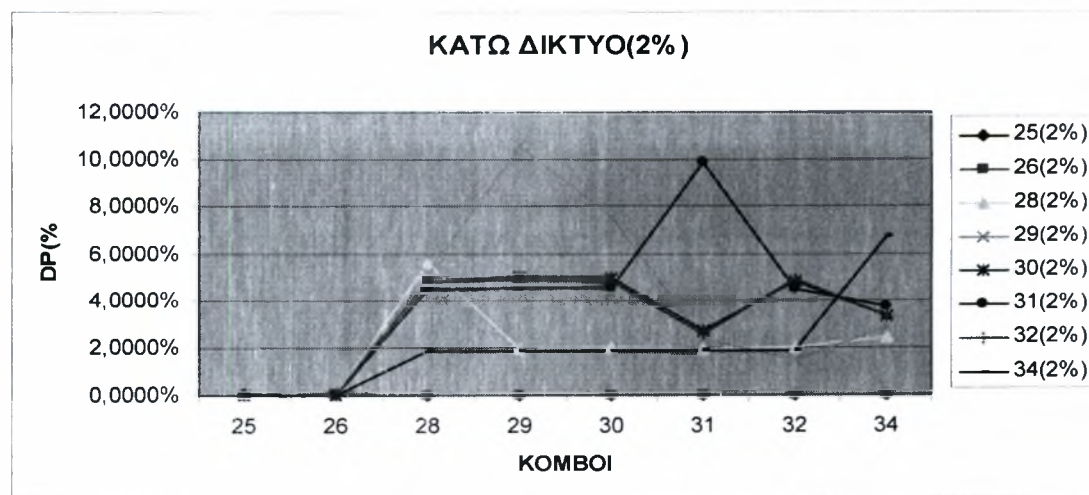
**ΔΙΑΡΡΟΗ 2%:**



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.4:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στον κύριο αγωγό



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.5:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στο πάνω δίκτυο

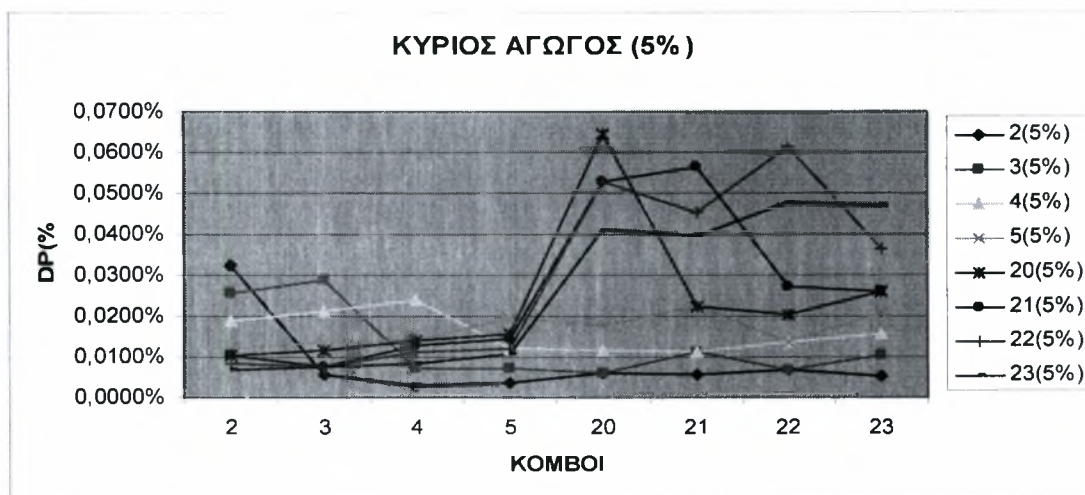


**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.6:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στο κάτω δίκτυο

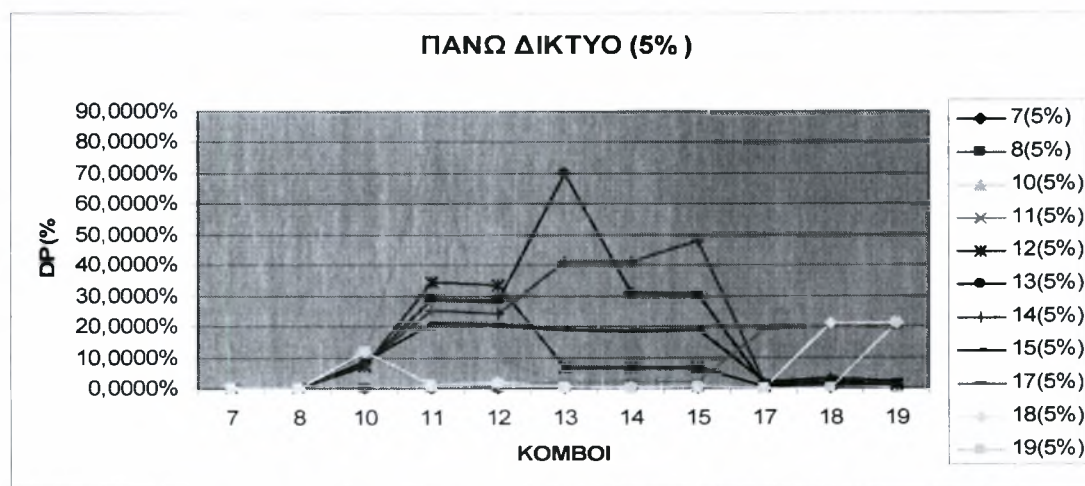




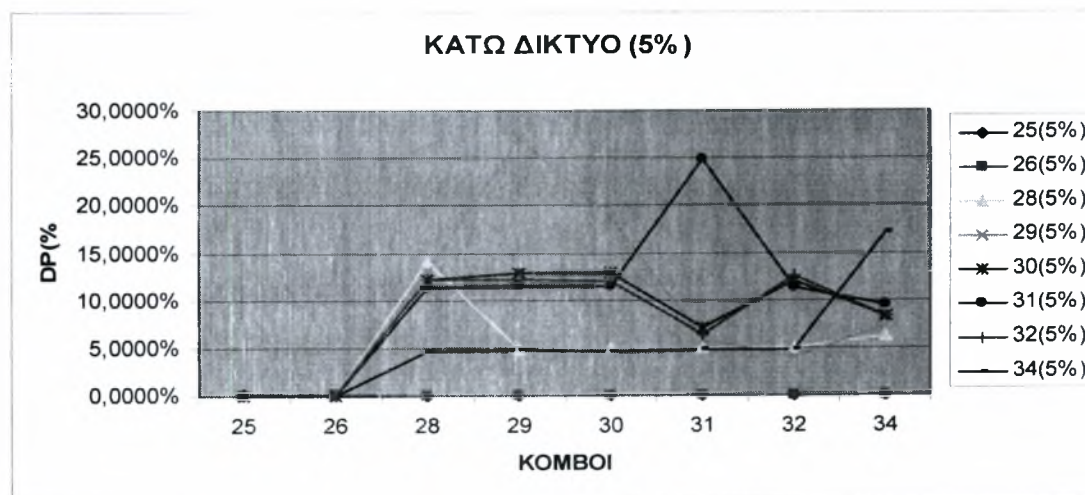
### ΔΙΑΡΡΟΗ 5%:



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.7:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στον κύριο αγωγό



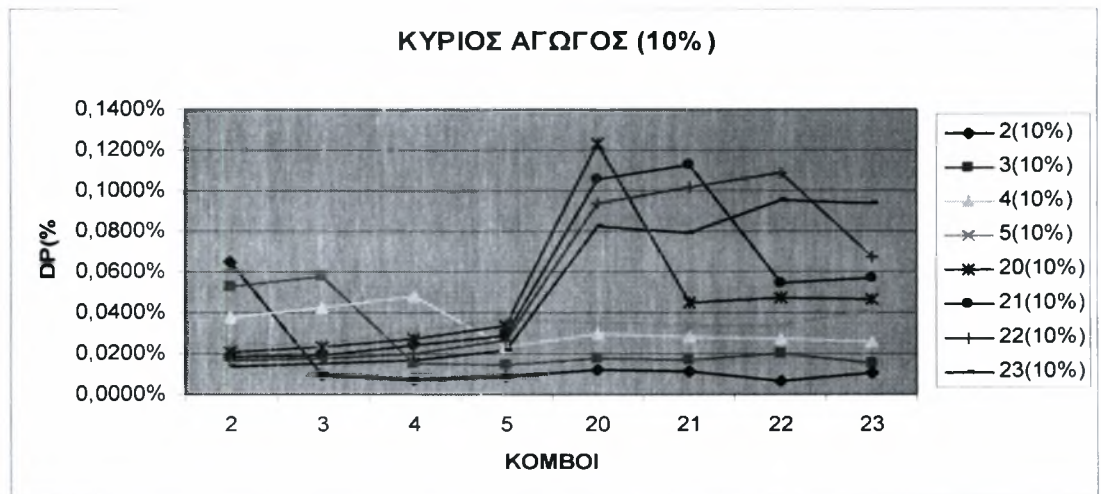
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.8:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στο πάνω δίκτυο



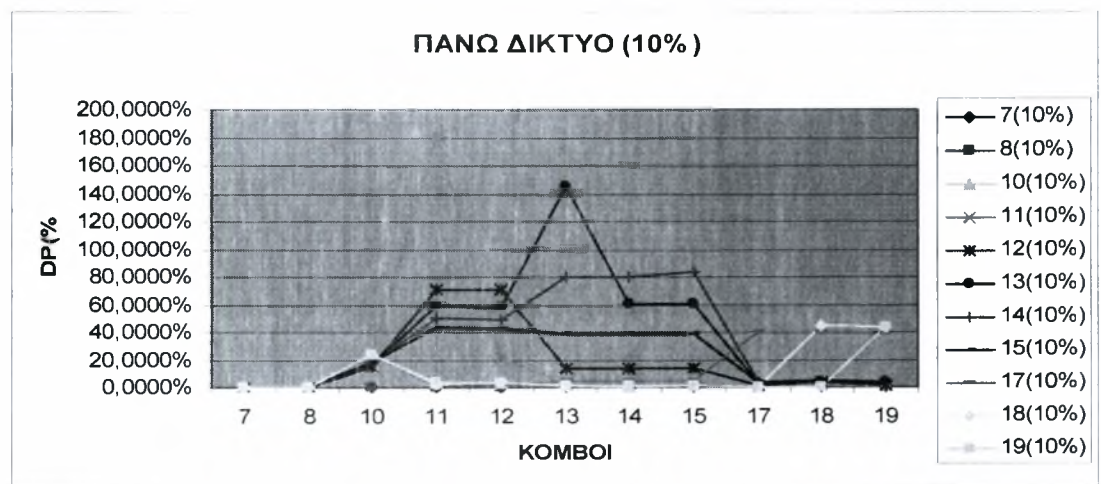
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.9:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στο κάτω δίκτυο



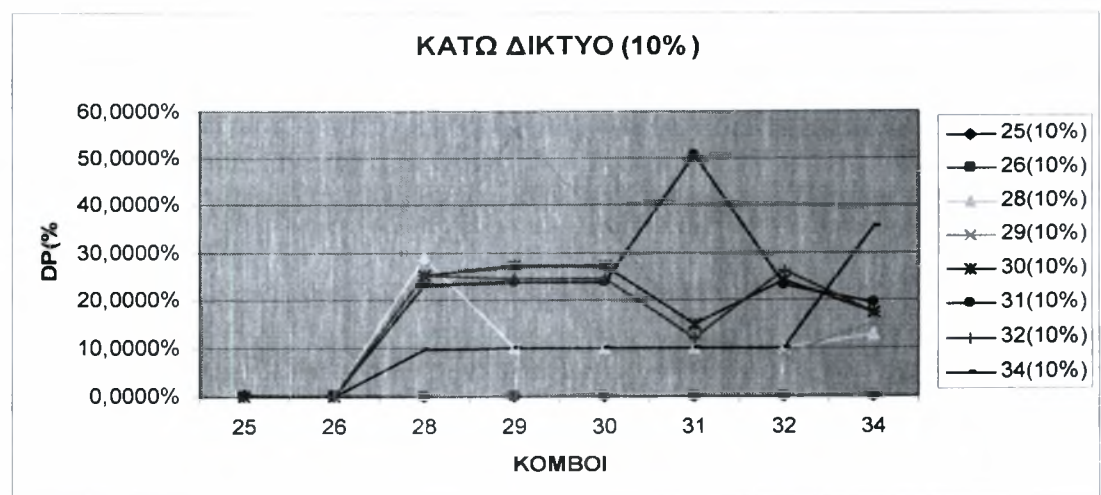
**ΔΙΑΡΡΟΗ 10%:**



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.10:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 10% στον κύριο αγωγό



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.11:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 10% στο πάνω δίκτυο



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.12:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 10% στο κάτω δίκτυο



Στα γραφήματα 5.1, 5.4, 5.7 και 5.10 παρουσιάζονται οι καμπύλες της εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης, όταν η διαρροή συναντάται σε κάθε κόμβο του κυρίου αγωγού ξεχωριστά, συναρτήσει των κόμβων αυτών. Παρατηρούμε πως οι τιμές της εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης είναι πολύ μικρές. Αυτό οφείλεται στις μεγάλες διαμέτρους των αγωγών του κυρίου αγωγού. Όταν το ποσοστό διαρροής που εξετάζουμε είναι 1%, παρατηρούμε ότι εάν η διαρροή παρατηρείται στους κόμβους 2, 3, 4, 20 και 22 η μέγιστη τιμή της DP% παρατηρείται στους αντίστοιχους κόμβους. Για παράδειγμα όταν η διαρροή συμβαίνει στον αγωγό 2 η μέγιστη τιμή της εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης παρατηρείται στον κόμβο 2. Εάν η διαρροή συμβαίνει στον κόμβο 5 η μέγιστη τιμή παρατηρείται στον κόμβο 22, εάν η διαρροή παρατηρείται στον κόμβο 21 η μέγιστη τιμή της DP% παρατηρείται στο γειτονικό κόμβο 20, ενώ τέλος όταν συμβαίνει στον κόμβο 23 η τιμή παρατηρείται στο γειτονικό κόμβο 22. Για διαρροή 2% όταν συμβαίνει διαρροή στους κόμβους 2, 3, 4, 20 και 21 η μέγιστη τιμή εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης παρατηρείται στους αντίστοιχους κόμβους. Η διαρροή στον κόμβο 5 παρουσιάζει μέγιστη τιμή στον κόμβο 21, ενώ οι διαρροές στους κόμβους 22 και 23 στους γειτονικούς τους 21 και 22 αντίστοιχα. Όταν το ποσοστό διαρροής που εξετάζουμε είναι 5% οι διαρροές στους κόμβους 2, 3, 4, 20, 21 και 22 εμφανίζουν μέγιστες τιμές στους αντίστοιχους κόμβους. Η διαρροή στον κόμβο 5 παρουσιάζει μέγιστη τιμή στον κόμβο 21, όπως και στην περίπτωση της 2% διαρροής. Όταν εμφανίζεται η διαρροή στον κόμβο 23 τότε η μέγιστη τιμή της DP% παρατηρείται στο γειτονικό κόμβο 22. Το ίδιο συμβαίνει και για διαρροή 10%, μόνο όταν η διαρροή συμβαίνει στον κόμβο 5, η μέγιστη τιμή παρατηρείται στον κόμβο 23. Συνολικά για όλα τα ποσοστά διαρροών (1%, 2%, 5% και 10%) παρατηρούμε ότι σε κάθε κόμβο εμφανίζεται η μέγιστη τιμή εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης όταν στον αντίστοιχο κόμβο παρουσιάζεται διαρροή.





Στα γραφήματα 5.2, 5.5, 5.8 και 5.11 παρουσιάζονται οι καμπύλες της εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης, όταν η διαρροή συναντάται σε κάθε κόμβο του πάνω δικτύου ξεχωριστά, συναρτήσει των κόμβων αυτών. Παρατηρούμε όπως και στον κύριο αγωγό ότι υπάρχει σημαντική διαφορά της πίεσης σε κάθε κόμβο. Μεγάλη διαφορά παρατηρείται στους κόμβους 11, 13 και 15 για διαρροές στους αντίστοιχους κόμβους, για τους δύο πρώτους κόμβους. Ενώ στον κόμβο 15 για διαρροή στον κόμβο 14. Καθώς μεγαλώνει το ποσοστό διαρροής, παρατηρούμε ότι η καμπύλη για διαρροή στο κόμβο 14 τείνει να ακολουθήσει τις υπόλοιπες καμπύλες διαρροών που παρουσιάζουν σταθερές τιμές στους κόμβους 13, 14 και 15. Για όλα τα ποσοστά διαρροών, όταν η διαρροή εμφανίζεται στους κόμβους 7, 8, 10, 11, 13, 18 και 19 η μέγιστη τιμή της DP% παρουσιάζεται στους αντίστοιχους κόμβους. Αντίθετα όταν η διαρροή παρατηρείται στους κόμβους 12, 14, 15 και 17 η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στους κόμβους 11, 15, 11 και 18 αντίστοιχα. Συνολικά παρατηρούμε ότι τα ποσοστά διαρροής δεν προκαλούν καμία αλλαγή στα αποτελέσματα που προκύπτουν. Για όλα τα ποσοστά διαρροής, παρατηρούμε ότι σε κάθε κόμβο εμφανίζεται η μέγιστη τιμή εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης, όταν στον αντίστοιχο κόμβο παρουσιάζεται διαρροή, εκτός από τον κόμβο 15 που παρουσιάζει μέγιστη τιμή όταν η διαρροή παρατηρείται στον κόμβο 14.

Τέλος στα γραφήματα 5.3, 5.6, 5.9 και 5.12 παρουσιάζονται οι καμπύλες της εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης, όταν η διαρροή συναντάται σε κάθε κόμβο του κάτω δικτύου ξεχωριστά, συναρτήσει των κόμβων αυτών. Παρατηρούμε όπως και στον κύριο αγωγό, αλλά και το πάνω δίκτυο ότι υπάρχει σημαντική διαφορά της πίεσης σε κάθε κόμβο. Μεγάλη διαφορά παρατηρείται στους κόμβους 29, 31 και 34 για διαρροές στους αντίστοιχους κόμβους. Όταν το ποσοστό διαρροής που υποθέσαμε, στο κάτω δίκτυο είναι 1% της συνολικής ζήτησης του κόμβου 33, σε κάθε κόμβο του δικτύου παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές ποσοστιαίας διαφοράς πτώσης πίεσης, όταν

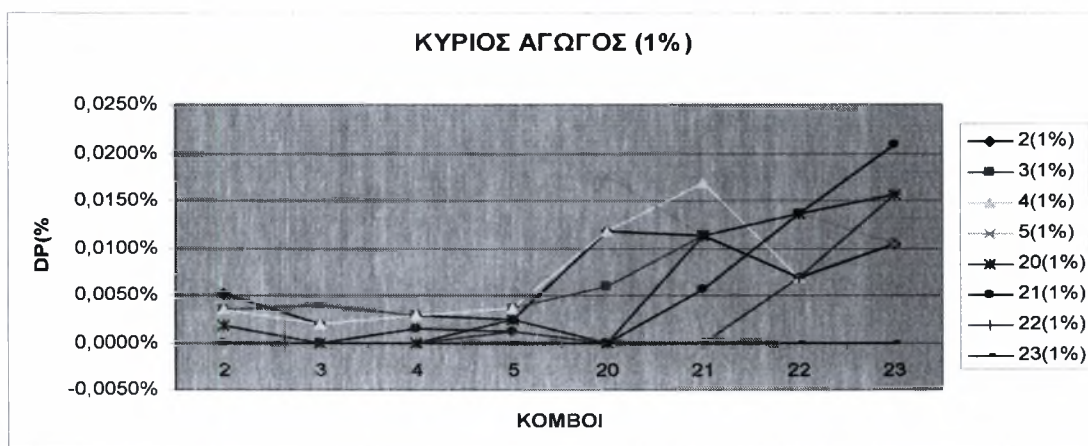


η διαρροή συμβαίνει στους αντίστοιχους κόμβους , εκτός από τους κόμβους 30 και 32. Όταν παρατηρείται διαρροή στους συγκεκριμένους κόμβους, οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στους κόμβους 29 και 30 αντίστοιχα. Για διαρροές 2% και 5% σε κάθε κόμβο του δικτύου παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές DP%, όταν η διαρροή συμβαίνει στους αντίστοιχους κόμβους , εκτός από τον κόμβο 30 που παρουσιάζει μέγιστη τιμή στον κόμβο 29. Τέλος για διαρροή 10% σε όποιον κόμβο και αν παρατηρείται η διαρροή στον αντίστοιχο κόμβο παρουσιάζεται και η μέγιστη τιμή της εκατοστιαίας διαφοράς πτώσης πίεσης. Για όλα τα ποσοστά διαρροής, παρατηρούμε ότι σε κάθε κόμβο εμφανίζεται η μέγιστη τιμή εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης, όταν στον αντίστοιχο κόμβο παρουσιάζεται διαρροή, εκτός από τον κόμβο 30 που παρουσιάζει μέγιστη τιμή όταν η διαρροή παρατηρείται στον κόμβο 29.

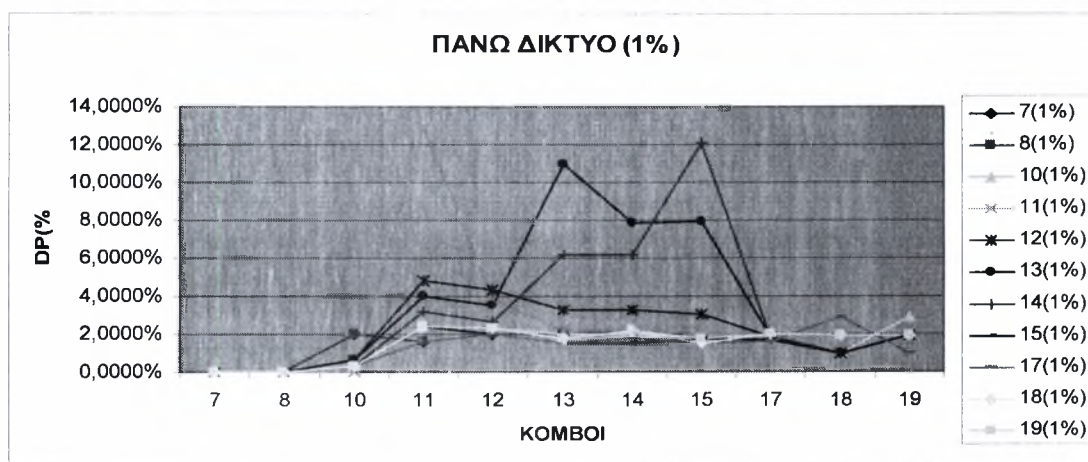


## ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β

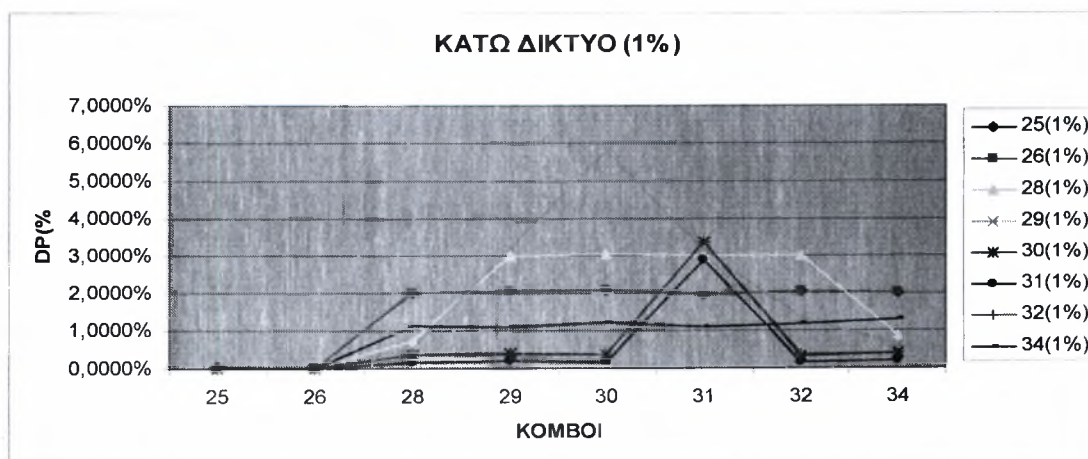
### ΔΙΑΡΡΟΗ 1%:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.13:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στον κύριο αγωγό



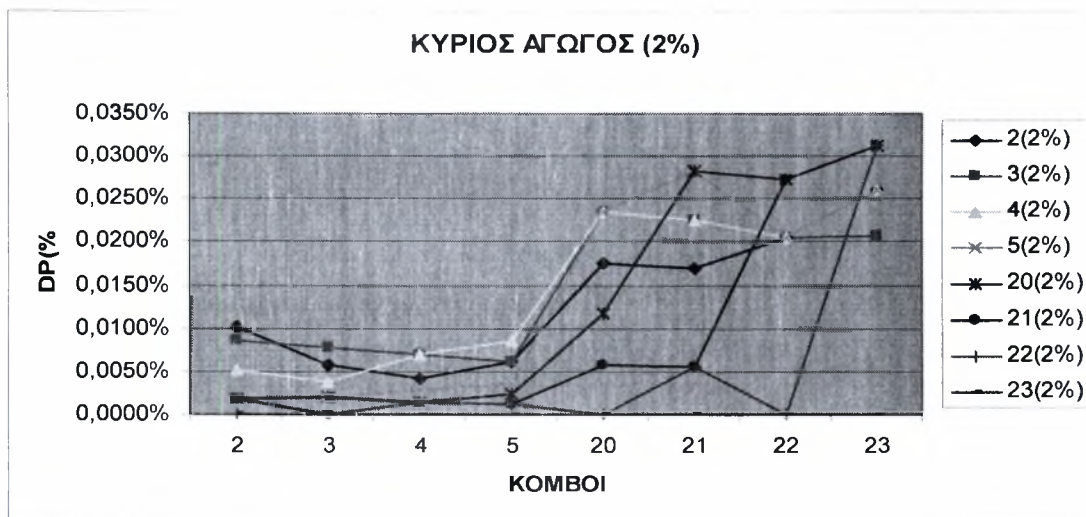
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.14:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στο πάνω δίκτυο



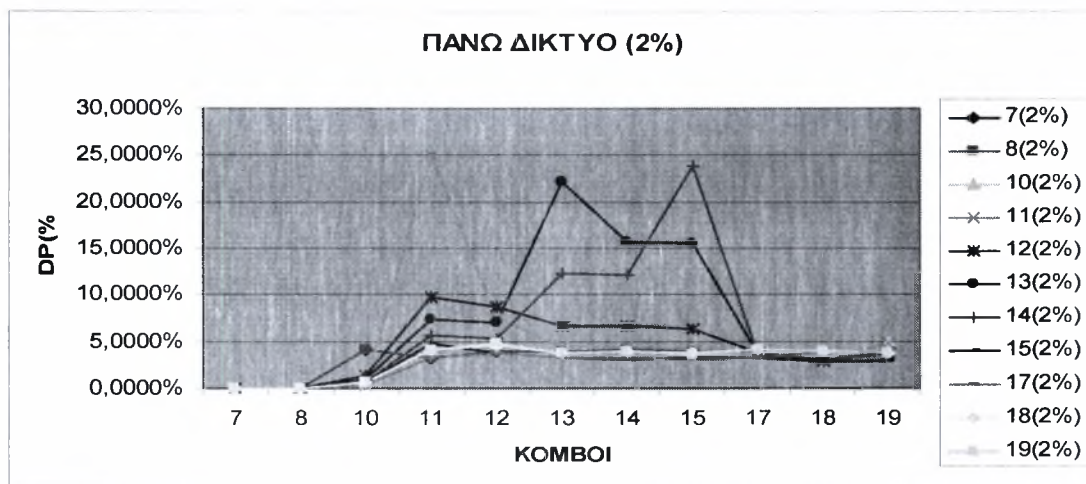
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.15:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στο κάτω δίκτυο



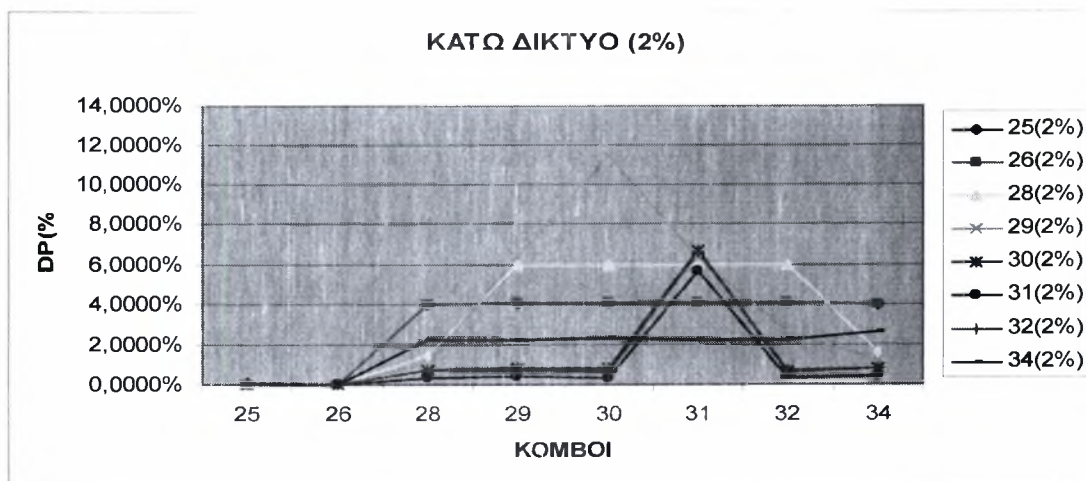
**ΔΙΑΡΡΟΗ 2%:**



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.16:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στον κύριο αγωγό



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.17:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στο πάνω δίκτυο

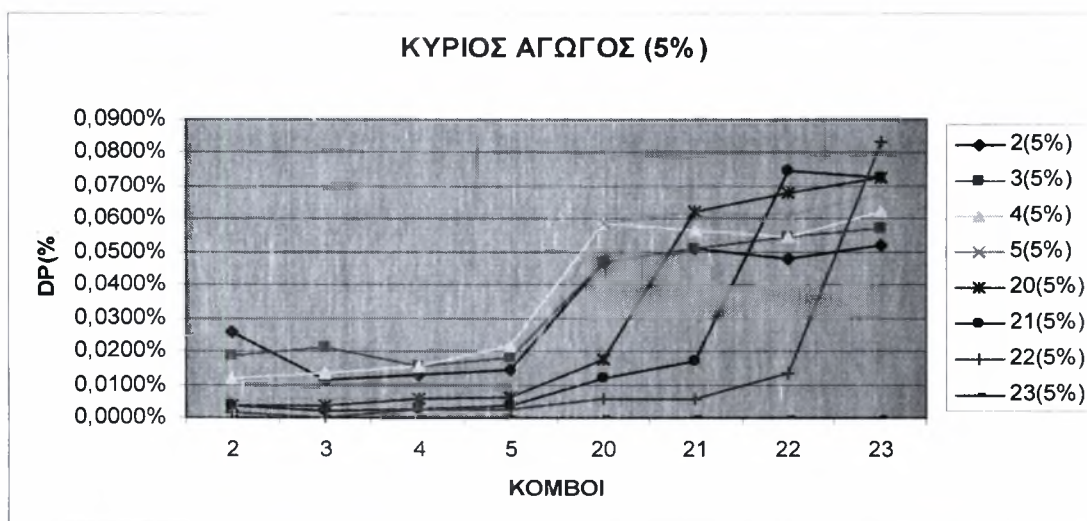


**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.18:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στο κάτω δίκτυο

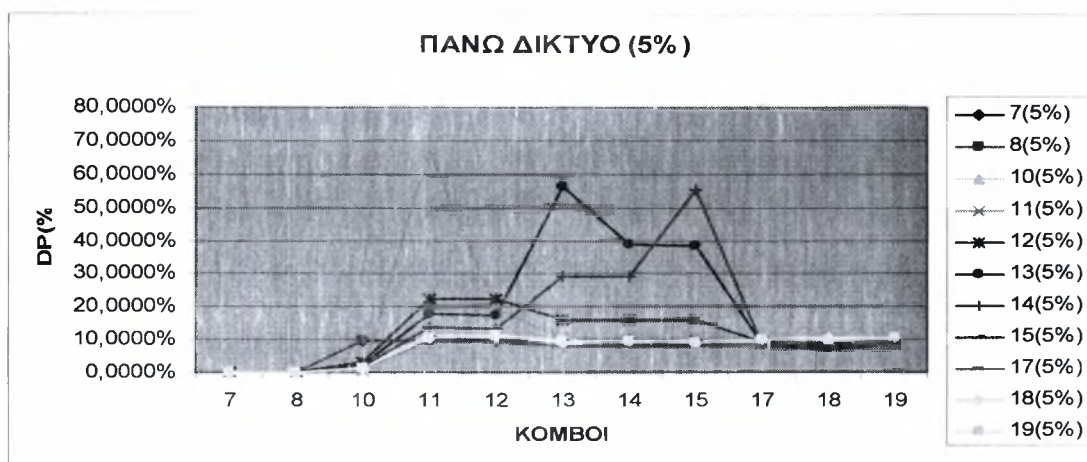




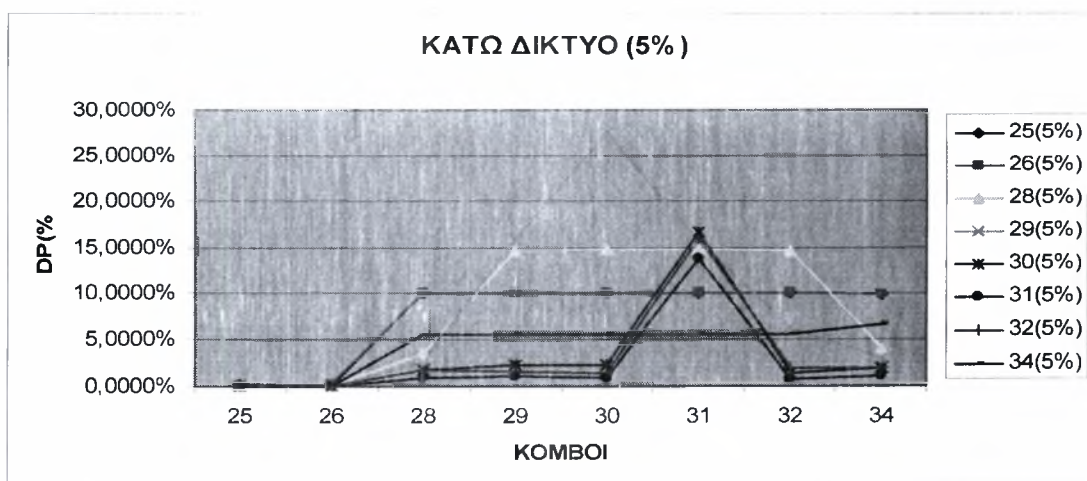
### ΔΙΑΡΡΟΗ 5%:



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.19:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στον κύριο αγωγό



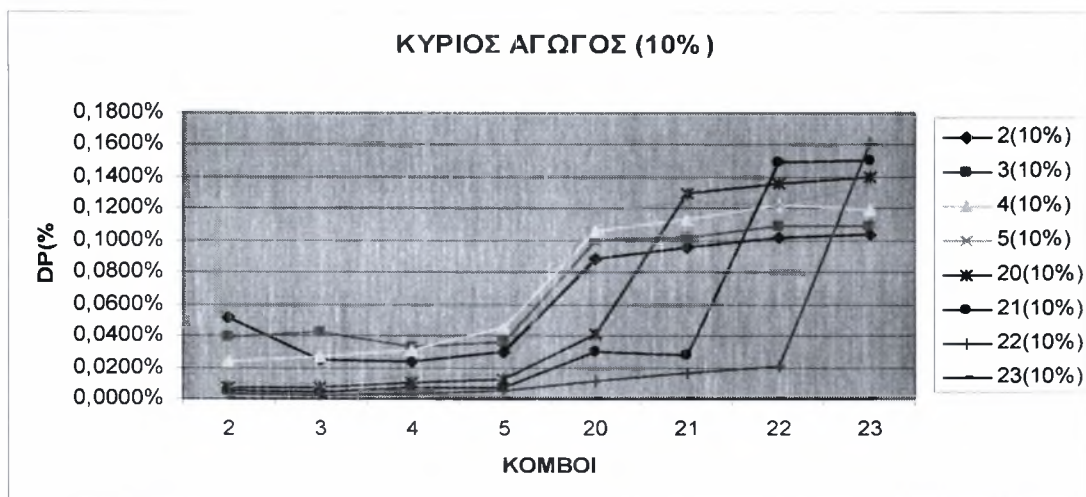
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.20:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στο πάνω δίκτυο



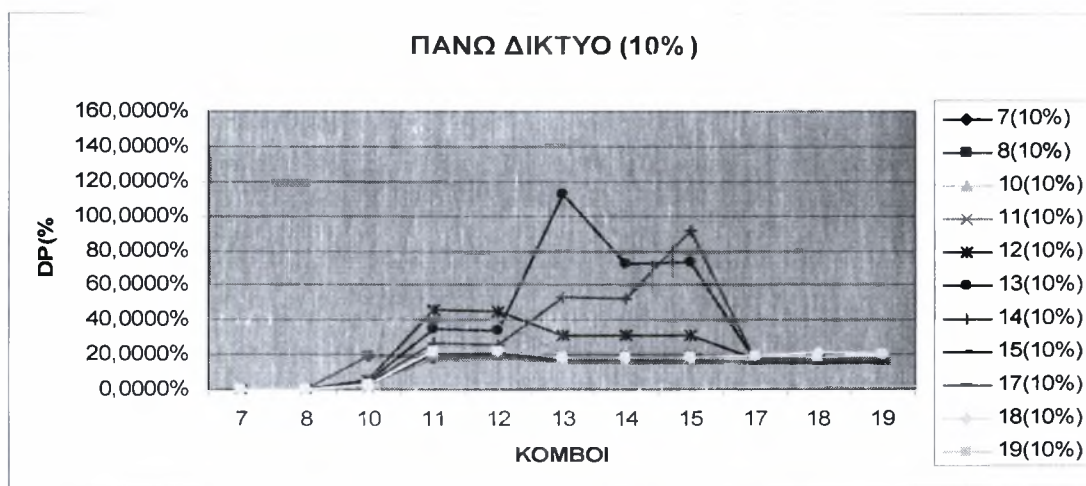
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.21:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στο κάτω δίκτυο



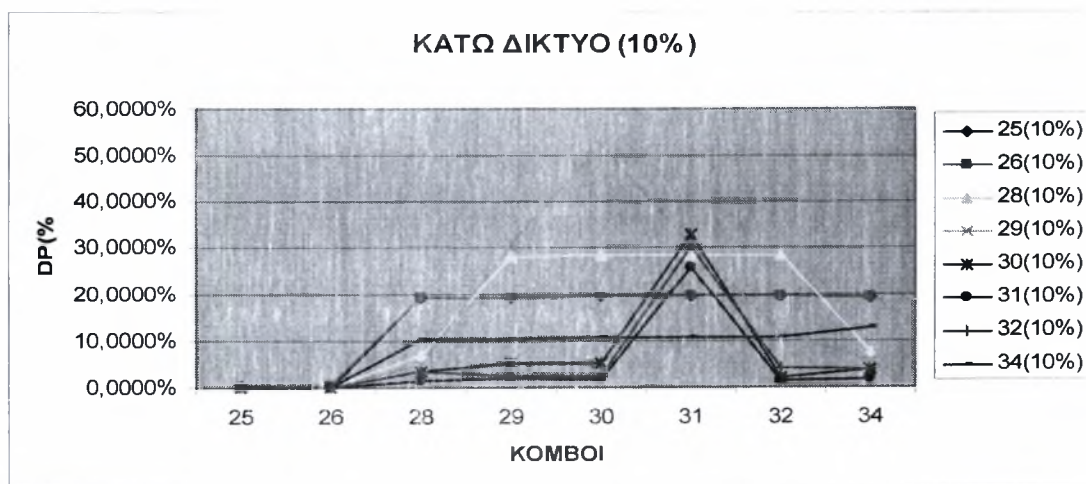
**ΔΙΑΡΡΟΗ 10%:**



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.22:**  $DP(\%)$  για διαρροή 10% στον κύριο αγωγό



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.23:**  $DP(\%)$  για διαρροή 10% στο πάνω δίκτυο



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.24:**  $DP(\%)$  για διαρροή 10% στο κάτω δίκτυο



Στα γραφήματα 5.13, 5.16, 5.19 και 5.22 παρουσιάζονται οι καμπύλες της εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης, όταν η διαρροή συναντάται σε κάθε κόμβο του κυρίου αγωγού ξεχωριστά, συναρτήσει των κόμβων αυτών. Όπως συμβαίνει και στην Περίπτωση Α, παρατηρούμε πως οι τιμές της εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης είναι πολύ μικρές. Αυτό οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, στις μεγάλες διαμέτρους των αγωγών του κυρίου αγωγού.. Παρατηρούμε ότι στους κόμβους 2, 3 και 4 η μέγιστη τιμή ποσοστιαίας διαφοράς πίεσης παρουσιάζεται, όταν η διαρροή εμφανίζεται στους αντίστοιχους κόμβους. Όταν η διαρροή συμβαίνει στους κόμβους 5, 20, 21, 22 και 23 παρατηρούμε ότι οι καμπύλες διαρροών αποκτούν μεγάλη κλίση όταν συναντούν τους συγκεκριμένους κόμβους και παρουσιάζουν μέγιστη τιμή στους αμέσους επόμενους γειτονικούς κόμβους.

Στα γραφήματα 5.14, 5.17, 5.20 και 5.23 παρουσιάζονται οι καμπύλες της εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης, όταν η διαρροή συναντάται σε κάθε κόμβο του πάνω δικτύου ξεχωριστά, συναρτήσει των κόμβων αυτών. Παρατηρούμε όπως και στον κύριο αγωγό ότι υπάρχει σημαντική διαφορά της πίεσης σε κάθε κόμβο. Μεγάλη διαφορά παρατηρείται στους κόμβους 11 και 13 για διαρροές στους αντίστοιχους κόμβους, καθώς και στο 15 για διαρροή στον κόμβο 14. Παράλληλα παρατηρούμε ότι για διαρροή στους κόμβους 10, 15, 17, 18 και 19 δεν υπάρχει διαφορά της πίεσης στους κόμβους 12, 13, 14, 15, 17, 18 και 19.

Τέλος στα γραφήματα 5.15, 5.18, 5.21 και 5.24 παρουσιάζονται οι καμπύλες της εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης, όταν η διαρροή συναντάται σε κάθε κόμβο του κάτω δικτύου ξεχωριστά, συναρτήσει των κόμβων αυτών. Παρατηρούμε ότι στον κόμβο 30 για διαρροή στον κόμβο 29, η τιμή της DP% είναι δυσανάλογα μεγαλύτερη με τις υπόλοιπες τιμές των υπόλοιπων καμπύλων. Κάτι ανάλογο, συμβαίνει και στον κόμβο 31 για διαρροή στους κόμβους 30 και 31. Ενώ στους υπόλοιπους κόμβους παρουσιάζουν μικρές τιμές και σχεδόν σταθερές μεταξύ τους, στο συγκεκριμένο





κόμβο παρουσιάζουν μια απότομη αύξηση της τιμής της εκατοστιαίας διαφοράς πτώσης πίεσης.

### 5.3 Τοποθέτηση Μετρητικών Σταθμών

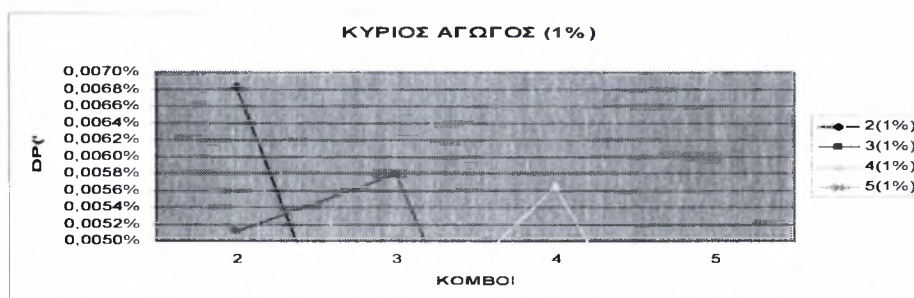
#### 5.3.1 Μέθοδος Παραμετρικής Μελέτης

Το συγκεκριμένο δίκτυο του Σχ. 5.1 που αποτελείται από τριάντα πέντε (35) κόμβους και σαράντα ένα (41) αγωγούς είναι ένα εικονικό δίκτυο. Ένα πραγματικό δίκτυο μεταφοράς φυσικού αερίου, όπως το δίκτυο της Ελλάδας με μήκος 512 km κύριου αγωγού, 450 km παράπλευρου δικτύου και 6500 km δικτύων πόλεων, αποτελείται από εκατοντάδες ίσως και χιλιάδες κόμβους και αγωγούς. Συνεπώς είναι πολύ δύσκολο και οικονομικά ασύμφορο να τοποθετηθούν σε όλους αυτούς του κόμβους μετρητικοί σταθμοί της πίεσης και της ροής. Για το λόγω αυτό θα πρέπει να επιλεγούν οι κατάλληλοι κόμβοι για την τοποθέτηση αυτών των μετρητικών σταθμών.

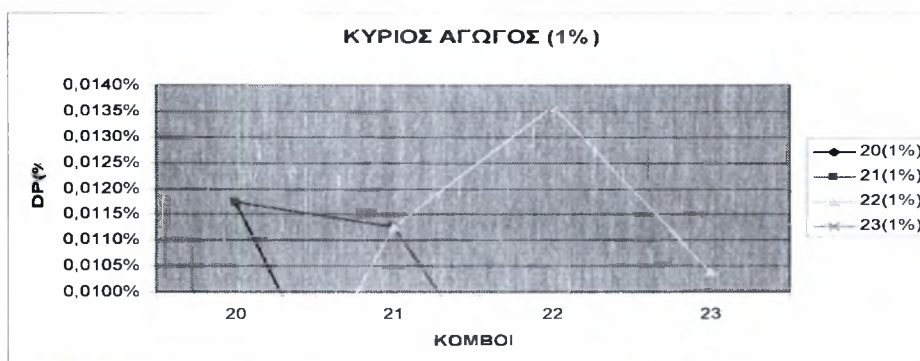
Αρχικά διαιρούμε το δίκτυο σε επιμέρους δίκτυα. Ο κύριος αγωγός χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο αποτελείται από τους κόμβους 1, 2, 3, 4 και 5 και το δεύτερο από τους κόμβους 20, 21, 22, 23 και 35. Το πάνω δίκτυο επίσης σε δύο μέρη, το πρώτο απαρτίζεται από τους κόμβους 7, 8, 10, 11, 12, 13 και 14, ενώ το δεύτερο από τους 15, 16, 17, 18 και 19. Το κάτω δίκτυο παραμένει ως έχει. Γίνεται παραμετρική μελέτη των διαγραμμάτων που προέκυψαν. Για κάθε ποσοστό διαρροής επιλέγεται μια τιμή ποσοστιαίας πτώσης πίεσης  $DP(\%)$  και οι κόμβοι των οποίων οι τιμές ξεπερνούν τη συγκεκριμένη αυτή τιμή, είναι οι ευαίσθητοι κόμβοι στις διαρροές. Έτσι για κάθε τμήμα του δικτύου, ο κάθε κόμβος εμφανίζεται με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Οι κόμβοι που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη συχνότητα είναι οι πιο ευαίσθητοι κόμβοι και συνεπώς αυτοί που θα επιλεγούν για την τοποθέτηση των μετρητικών σταθμών.



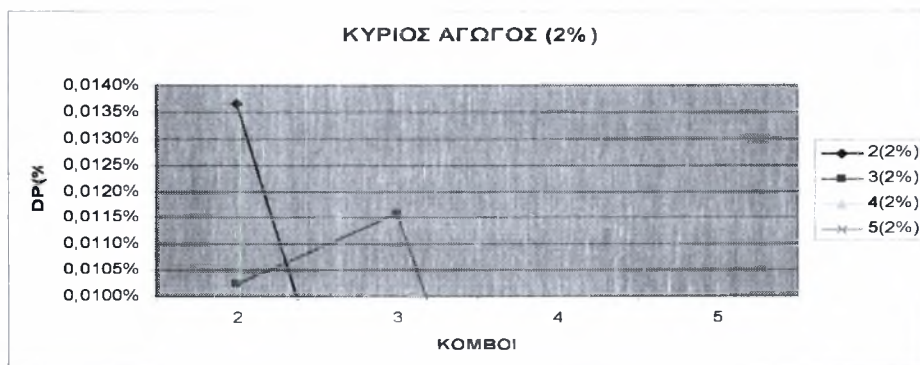
## ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α



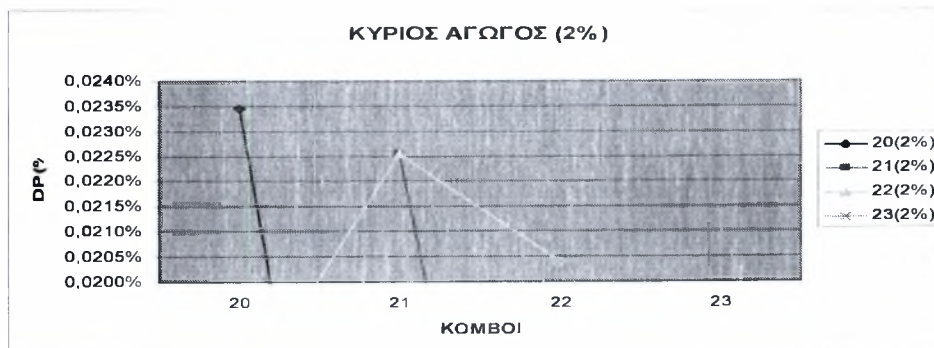
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.25:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στον κύριο αγωγό(1-5)



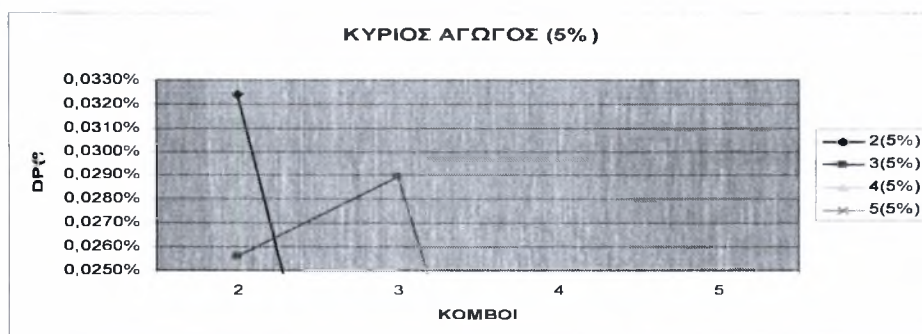
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.26:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στον κύριο αγωγό(20-35)



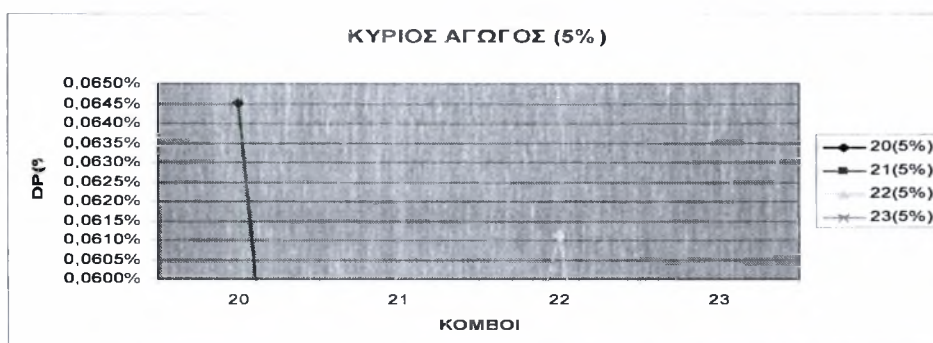
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.27:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στον κύριο αγωγό(1-5)



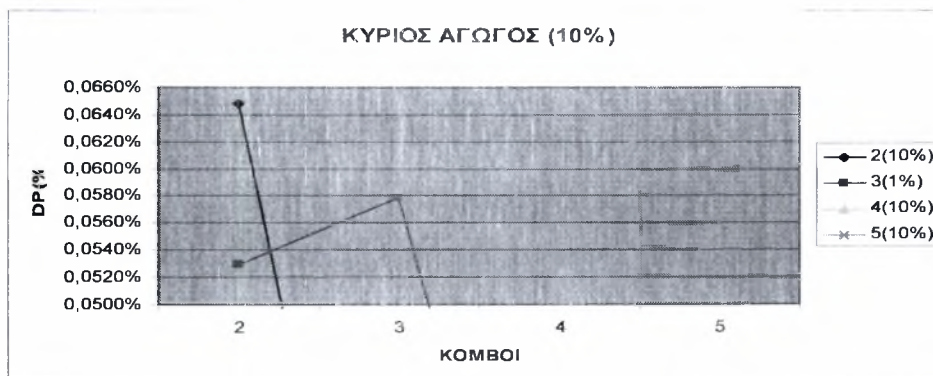
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.28:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στον κύριο αγωγό(20-35)



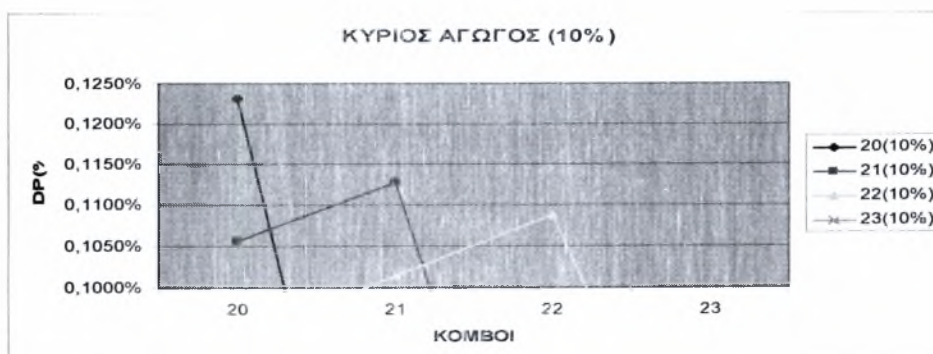
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.29:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στον κύριο αγωγό(1-5)



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.30:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στον κύριο αγωγό(20-35)



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.31:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 10% στον κύριο αγωγό(1-5)



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.32:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 10% στον κύριο αγωγό(20-35)



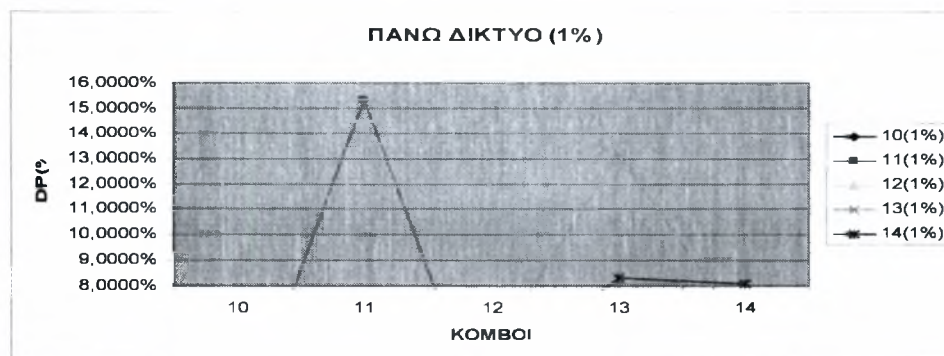
Στο πρώτο τμήμα του κύριου αγωγού που αποτελείται από τους κόμβους 1, 2, 3, 4 και 5 για διαρροή 1% παίρνουμε υπόψη μας τους κόμβους στους οποίους η εκατοστιαία διαφορά πίεσης (DP(%)) είναι μεγαλύτερη από 0,005%. Οι κόμβοι που εμφανίζονται είναι οι 2, 3 και 4. Για διαρροή 2% η ελάχιστη τιμή της DP(%) είναι 0,01% και οι κόμβοι που ικανοποιούν τον περιορισμό της συγκεκριμένης τιμής είναι οι 2 και 3. Οι κόμβοι 2 και 3 εμφανίζονται επίσης και για τις διαρροές 5% και 10% όπου οι τιμές είναι 0,025% και 0,05% αντίστοιχα. Στο δεύτερο τμήμα, αποτελούμενο από τους κόμβους 20, 21, 22, 23 και 35 για διαρροή 1% η ελάχιστη τιμή της DP(%) είναι 0,01%, για 2% είναι 0,02%, για 5% είναι 0,06% και για 10% είναι 0,1%. Οι κόμβοι οι οποίοι εμφανίζονται για ποσοστό διαρροής 1% είναι 20, 21, 22, και 23, για 2% είναι 20, 21 και 22, για 5% οι 20 και 22 και τέλος για 10% εμφανίζονται οι 20, 21 και 22. Στον πίνακα 5.2 φαίνεται η συχνότητα με την οποία εμφανίζονται οι κόμβοι του κύριου αγωγού και από εκεί θα εξαχθεί το συμπέρασμα για την τοποθέτηση των μετρητικών σταθμών σε αυτόν.

ΚΟΜΒΟΙ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
<b>2</b>	4
<b>3</b>	4
<b>4</b>	1
<b>20</b>	4
<b>21</b>	3
<b>22</b>	4
<b>23</b>	1

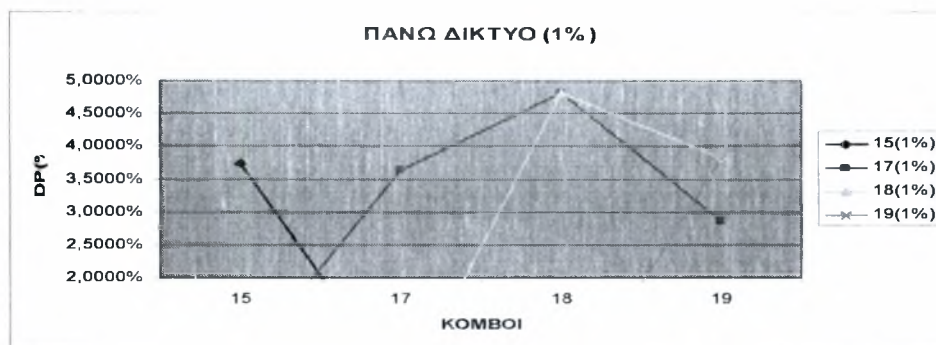
**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: Συχνότητα εμφάνισης κόμβων κύριου αγωγού**

Συνεπώς οι κόμβοι στους οποίους θα τοποθετηθούν οι σταθμοί μέτρησης πίεσης και παροχής είναι οι 2, 3, 20 και 22 οι οποίοι εμφανίζουν τη μεγαλύτερη συχνότητα.

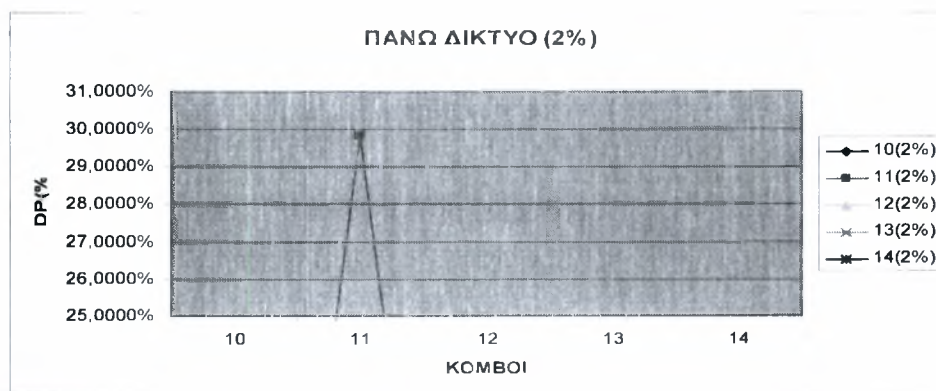




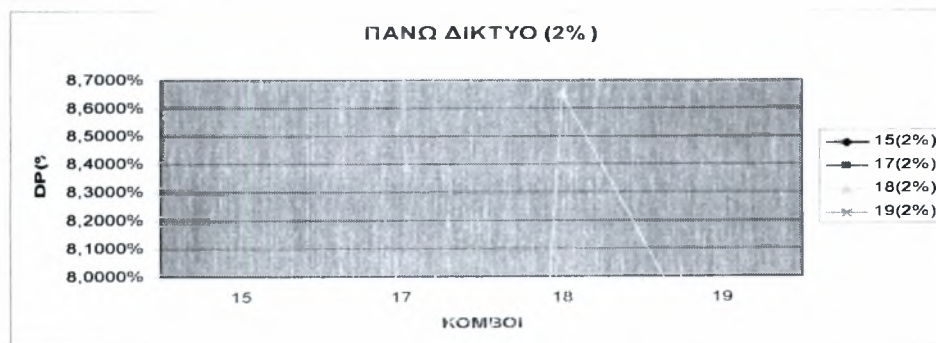
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.33:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στο πάνω δίκτυο(10-14)



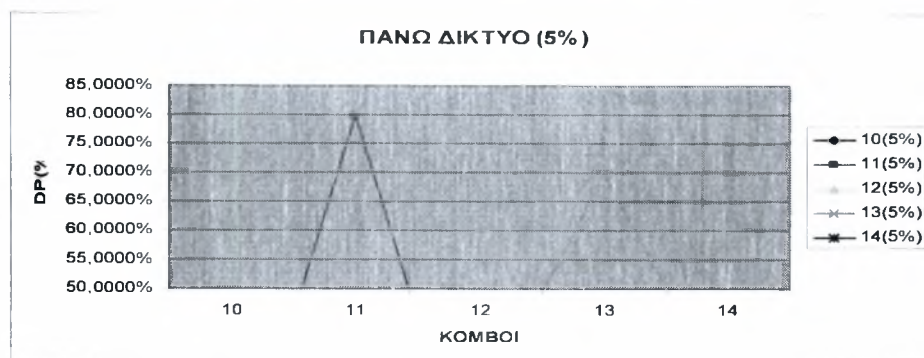
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.34:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στο πάνω δίκτυο(15-19)



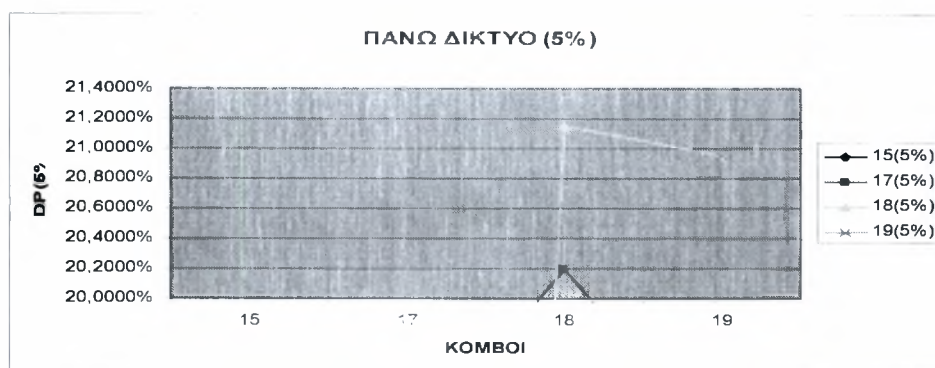
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.35:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στο πάνω δίκτυο(10-14)



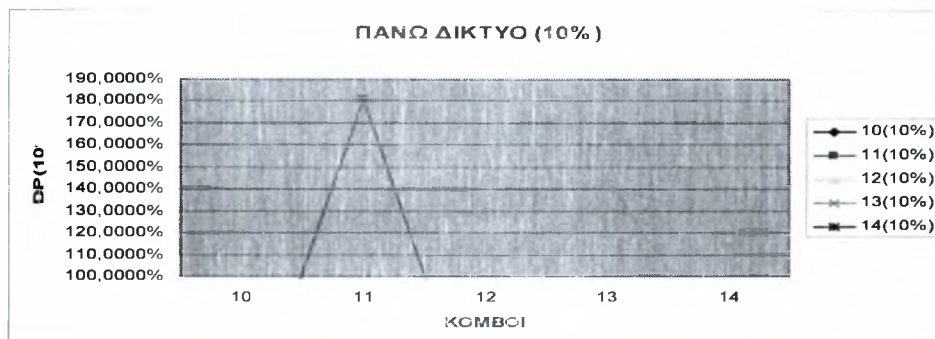
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.36:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στο πάνω δίκτυο(15-19)



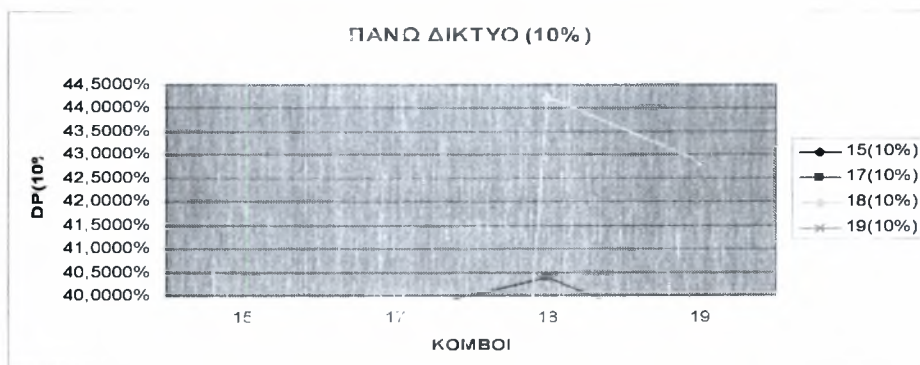
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.37:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στο πάνω δίκτυο(10-14)



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.38:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στο πάνω δίκτυο(15-19)



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.39:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 10% στο πάνω δίκτυο(10-14)



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.40:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 10% στο πάνω δίκτυο(15-19)

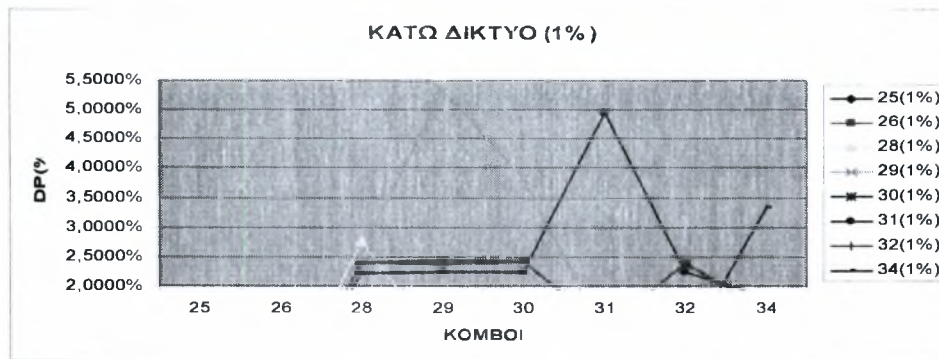
Στο πρώτο τμήμα του πάνω δικτύου αποτελούμενο από τους κόμβους 10, 11, 12, 13 και 14 για ποσοστό διαρροής 1% όσοι κόμβοι έχουν τιμή εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης (DP(%)) μεγαλύτερη από 8% είναι αυτοί που μας ενδιαφέρουν. Οι κόμβοι αυτοί είναι οι 11, 13 και 14. Για διαρροή 2% η ελάχιστη τιμή της DP(%) είναι 25% και οι κόμβοι που ικανοποιούν τον περιορισμό της συγκεκριμένης τιμής είναι οι 11 και 13. Οι κόμβοι 11 και 13 εμφανίζονται επίσης και για τις διαρροές 5% και 10%, όπου οι τιμές είναι 50% και 100% αντίστοιχα. Στο δεύτερο τμήμα, αποτελούμενο από τους κόμβους 15, 16, 17, 18 και 19 για ποσοστό διαρροής 1% η ελάχιστη τιμή της DP(%) είναι 2%, για 2% διαρροή είναι 8%, για 5% διαρροή είναι 20% και για διαρροή 10% είναι 40%. Οι κόμβοι οι οποίοι εμφανίζονται για ποσοστό διαρροής 1% είναι 15, 17, 18, και 19, για 2% είναι μόνο ο 18, για 5% οι 18 και 19, τέλος για διαρροή 10% εμφανίζονται οι 18 και 19. Στον πίνακα 5.3 φαίνεται η συχνότητα με την οποία εμφανίζονται οι κόμβοι του κύριου αγωγού και από εκεί θα εξαχθεί το συμπέρασμα για την τοποθέτηση των μετρητικών σταθμών σε αυτόν.

ΚΟΜΒΟΙ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
<b>11</b>	<b>4</b>
<b>13</b>	<b>4</b>
14	1
15	1
17	1
<b>18</b>	<b>4</b>
19	3

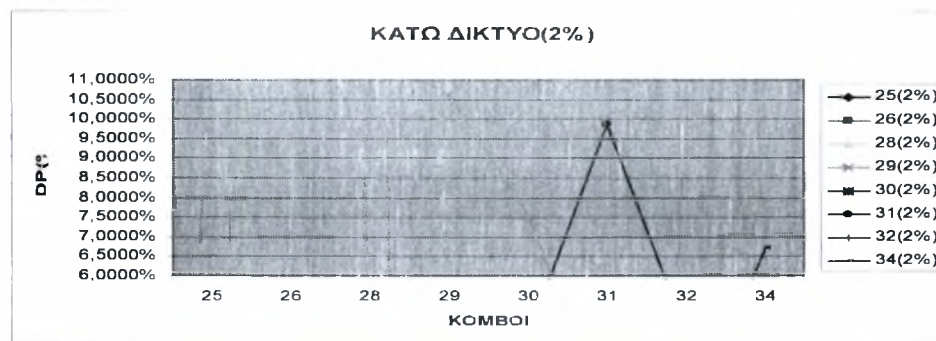
**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: Συχνότητα εμφάνισης κόμβων πάνω δικτύου**

Οι κόμβοι που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης είναι οι 11, 13 και 18. Άρα σε αυτούς θα τοποθετηθούν οι μετρητικοί σταθμοί.

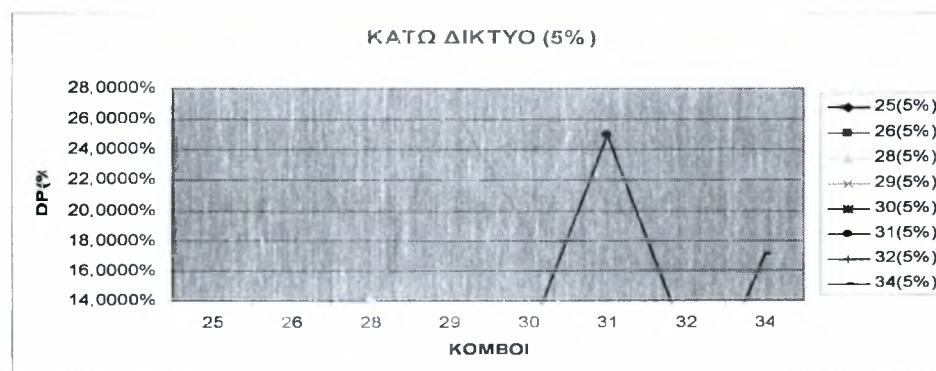




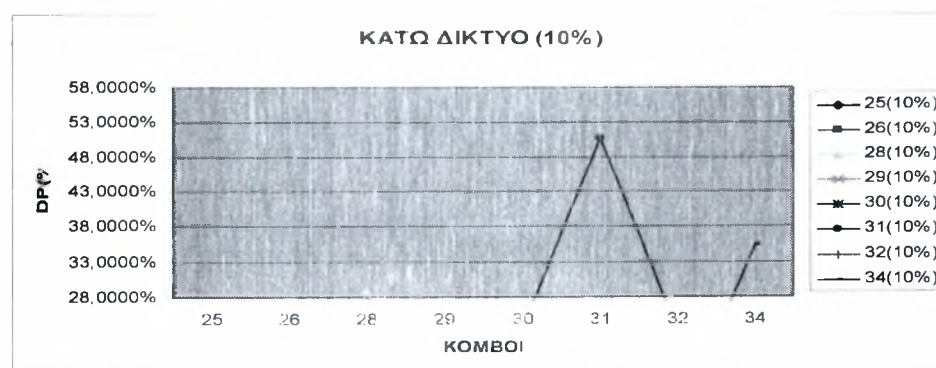
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.41:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στο κάτω δίκτυο



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.42:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στο κάτω δίκτυο



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.43:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στο κάτω δίκτυο



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.44:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 10% στο κάτω δίκτυο



Τέλος στο κάτω δίκτυο για ποσοστό διαρροής 1% ως μικρότερη τιμή της DP% λαμβάνεται η 2%, για 2% η τιμή 6%, για 5% η τιμή 14% και για 10% η τιμή 28% είναι η τιμή πάνω από την οποία λαμβάνονται υπόψη οι κόμβοι. Οι κόμβοι 28, 29, 30, 31, 32 και 34 εμφανίζονται όταν η διαρροή είναι 1%, οι 29, 30, 31 και 34 όταν η διαρροή είναι 2%, όταν η διαρροή είναι 5% οι κόμβοι που εμφανίζονται είναι οι 28, 29, 30, 31 και 34, ενώ για 10% οι 28, 29, 31 και 34. Ομοίως με τον κύριο αγωγό και το πάνω δίκτυο στον πίνακα 5.4 παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης των κόμβων.

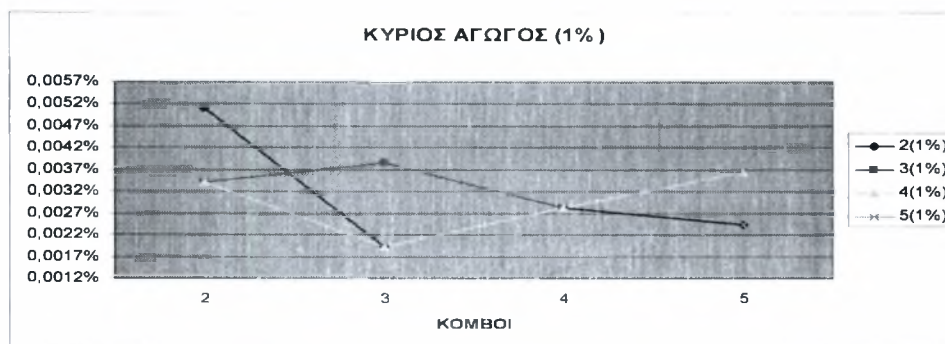
ΚΟΜΒΟΙ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
28	3
<b>29</b>	4
30	3
<b>31</b>	4
32	1
<b>34</b>	4

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4: Συχνότητα εμφάνισης κόμβων κάτω δικτύου**

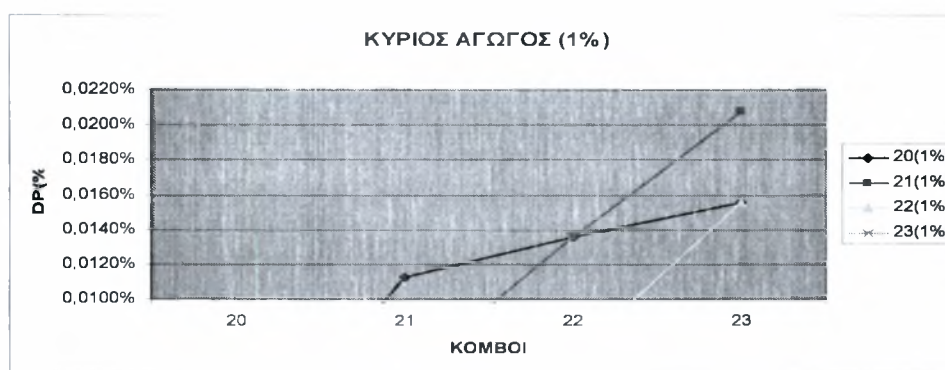
Συμπεραίνουμε πως οι κόμβοι στους οποίους θα τοποθετηθούν οι σταθμοί είναι οι 29, 31 και 34.



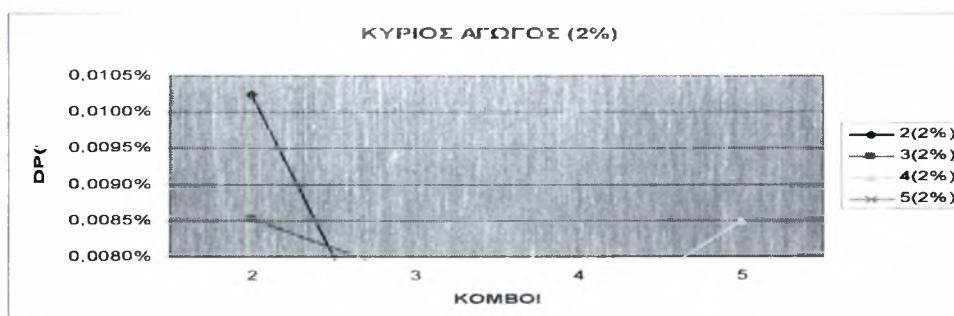
## ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β



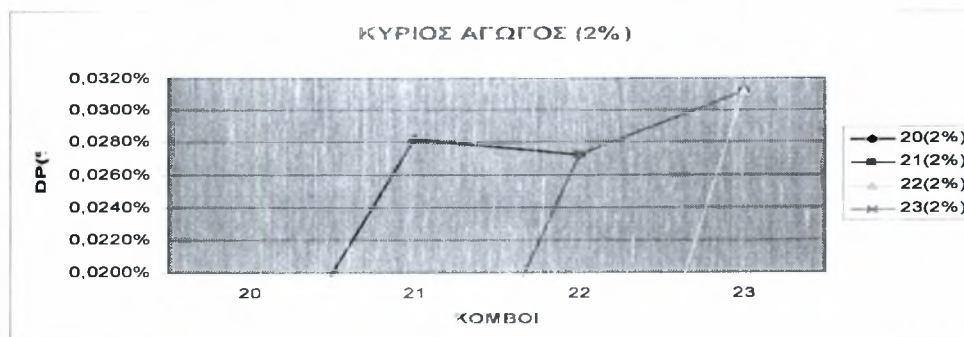
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.45:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στον κύριο αγωγό(1-5)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.46:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στον κύριο αγωγό(20-35)

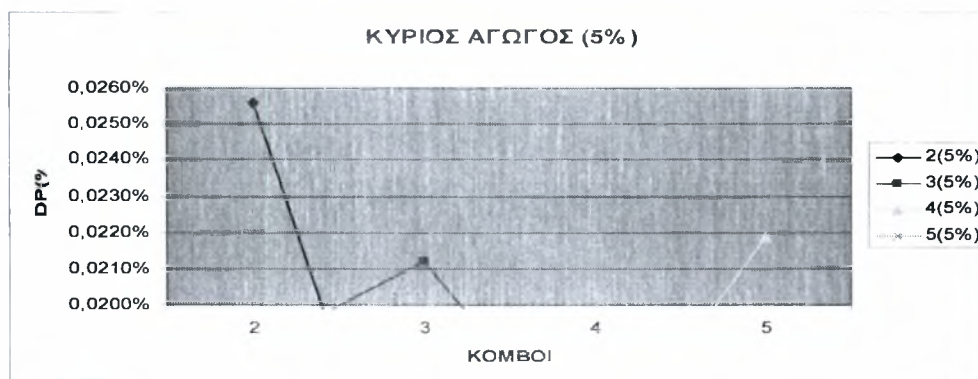


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.47:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στον κύριο αγωγό(1-5)

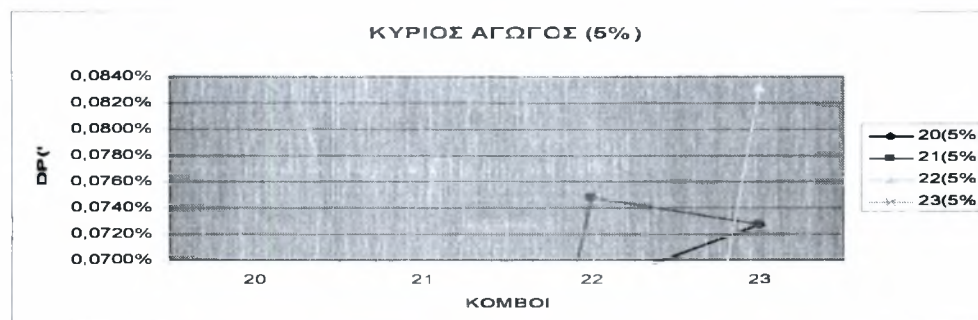


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.48:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στον κύριο αγωγό(20-35)

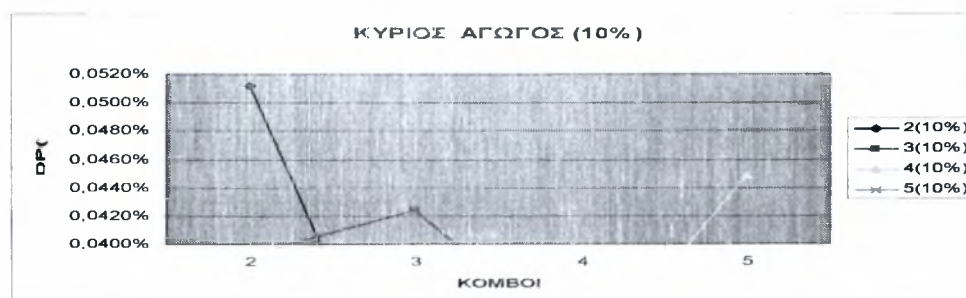




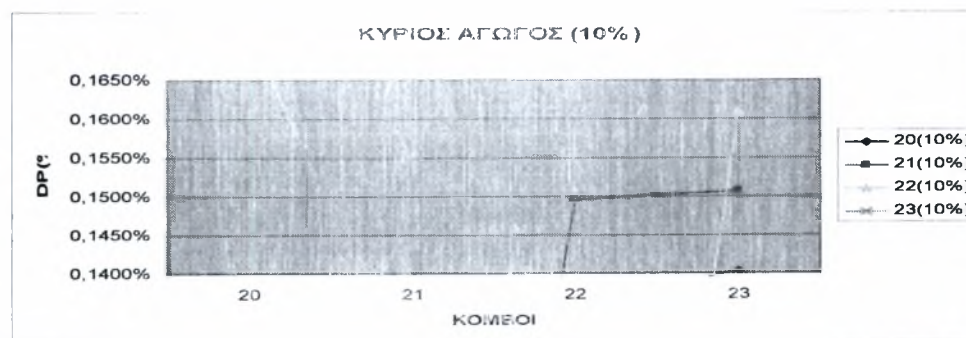
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.49:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στον κύριο αγωγό(1-5)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.50:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στον κύριο αγωγό(20-35)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.51:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 10% στον κύριο αγωγό(1-5)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.52:  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 10% στον κύριο αγωγό(20-35)



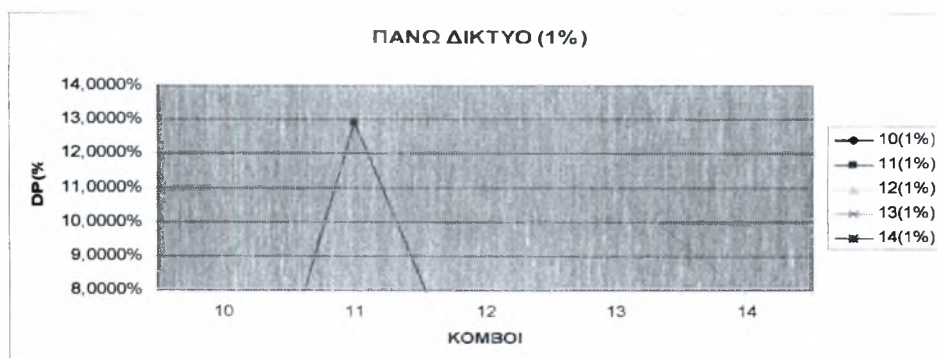


Στο πρώτο τμήμα του κύριου αγωγού για ποσοστό διαρροής 1% παίρνουμε υπόψη μας τους κόμβους στους οποίους η εκατοστιαία διαφορά πίεσης (DP(%)) είναι μεγαλύτερη από 0,0012%. Οι κόμβοι που εμφανίζονται είναι οι 2, 3, 4 και 5 . Για διαρροή 2% η ελάχιστη τιμή της DP(%) είναι 0,008% και οι κόμβοι που ικανοποιούν τον περιορισμό της συγκεκριμένης τιμής είναι οι 2 και 5. Οι κόμβοι 2, 3 και 5 εμφανίζονται επίσης και για τις διαρροές 5% και 10% όπου οι τιμές είναι 0,02% και 0,04% αντίστοιχα. Στο δεύτερο τμήμα, για διαρροή 1% η ελάχιστη τιμή της DP(%) είναι 0,01%, για 2% είναι 0,02%, για 5% είναι 0,07% και για 10% είναι 0,14%. Οι κόμβοι οι οποίοι εμφανίζονται για 1% και 2% είναι 21, 22, και 23, για 5% και 10% οι 22 και 23. Στον πίνακα 5.5 φαίνεται η συχνότητα με την οποία εμφανίζονται οι κόμβοι του κύριου αγωγού και από εκεί θα εξαχθεί το συμπέρασμα για την τοποθέτηση των μετρητικών σταθμών σε αυτόν.

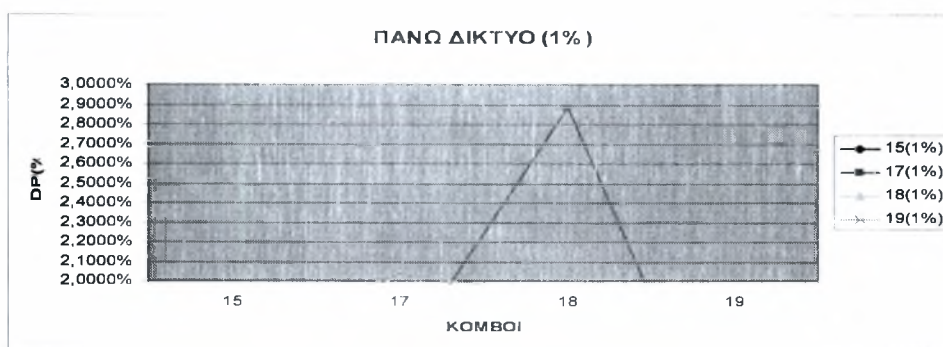
ΚΟΜΒΟΙ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
2	4
3	3
4	1
5	4
21	2
22	4
23	4

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5: Συχνότητα εμφάνισης κόμβων κύριου αγωγού**

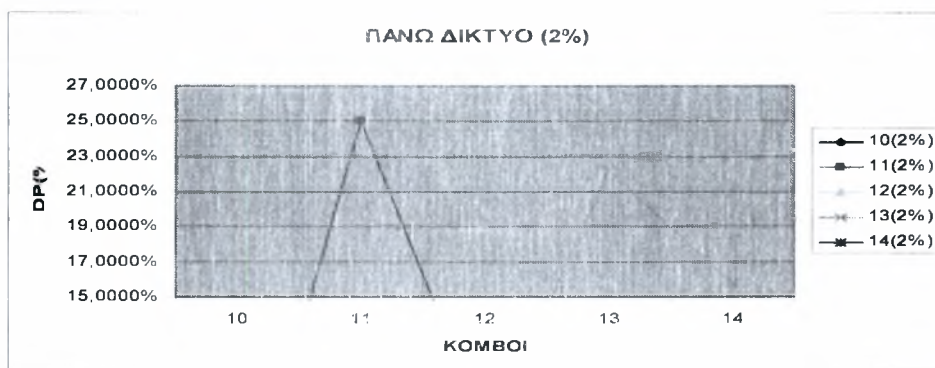
Συνεπώς οι κόμβοι στους οποίους θα τοποθετηθούν οι σταθμοί μέτρησης πίεσης και παροχής είναι οι 2, 5, 22 και 23 οι οποίοι εμφανίζουν τη μεγαλύτερη συχνότητα.



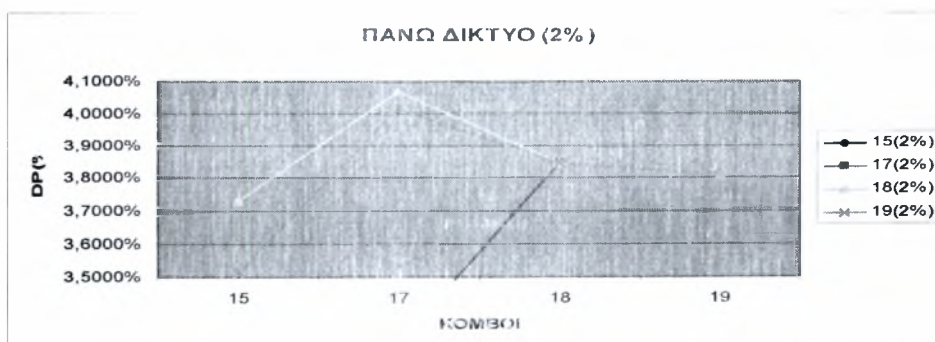
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.53:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στο πάνω δίκτυο(10-14)



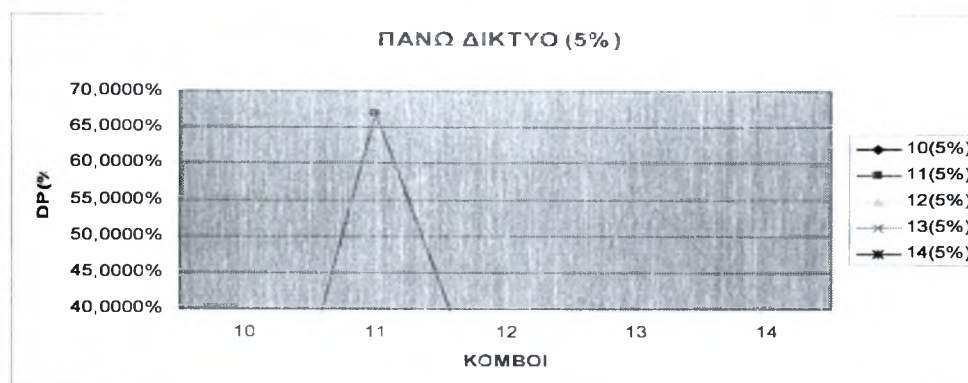
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.54:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 1% στο πάνω δίκτυο(15-19)



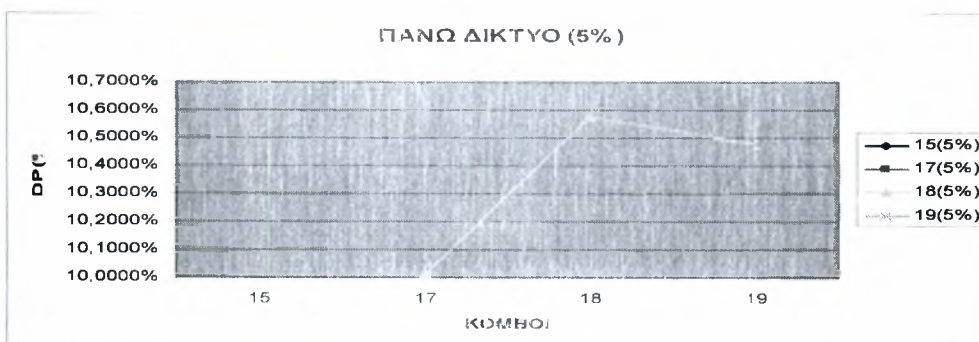
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.55:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στο πάνω δίκτυο(10-14)



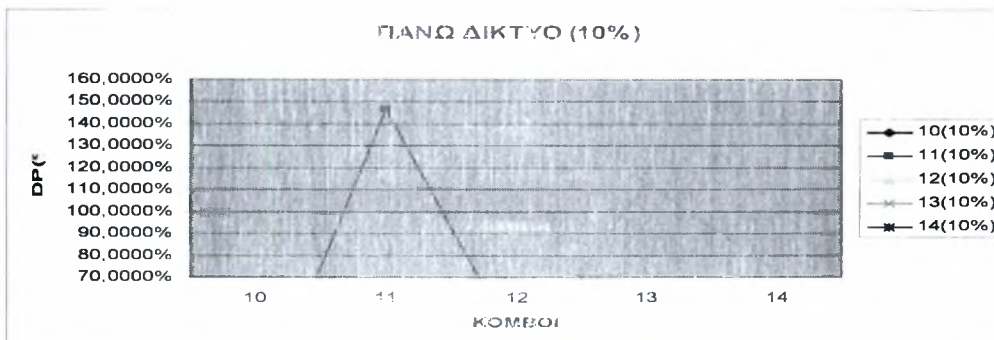
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.56:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 2% στο πάνω δίκτυο(15-19)



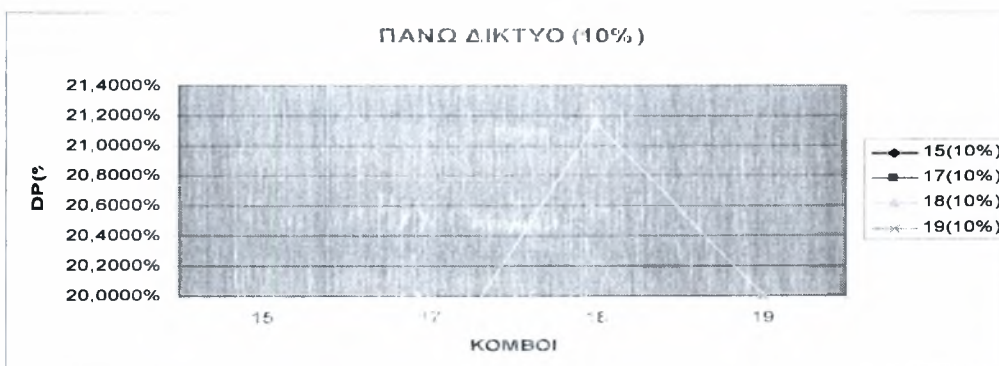
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.57:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στο πάνω δίκτυο(10-14)



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.58:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 5% στο πάνω δίκτυο(15-19)



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.59:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 10% στο πάνω δίκτυο(10-14)



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.60:**  $\Delta P(\%)$  για διαρροή 10% στο πάνω δίκτυο(15-19)



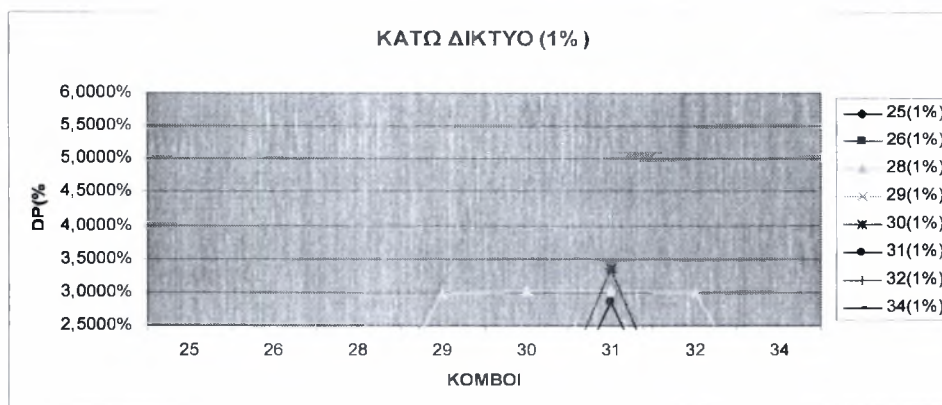
Στο πρώτο τμήμα για διαρροή 1% όσοι κόμβοι έχουν τιμή εκατοστιαίας διαφοράς πίεσης (DP(%)) μεγαλύτερη από 8% είναι αυτοί που μας ενδιαφέρουν. Οι κόμβοι αυτοί είναι οι 11 και 13. Για ποσοστό διαρροής 2% η ελάχιστη τιμή της DP(%) είναι 15% και οι κόμβοι που ικανοποιούν τον περιορισμό της συγκεκριμένης τιμής είναι οι 11, 13 και 14. Οι κόμβοι 11 και 13 εμφανίζονται όταν η διαρροή είναι 5% για τιμή DP% 40%, ενώ για διαρροή 10% εμφανίζονται οι 11, 13 και 14 όταν η εκατοστιαία πτώση πίεσης είναι 70%. Στο δεύτερο τμήμα, για διαρροή 1% η ελάχιστη τιμή της DP(%) είναι 2%, για 2% διαρροή είναι 3,5%, για 5% διαρροή είναι 10% και για 10% διαρροή είναι 20%. Οι κόμβοι οι οποίοι εμφανίζονται για 1% είναι 17 και 18, για 2% είναι οι 15, 17, 18 και 19, για 5% οι 17, 18 και 19, τέλος για διαρροή 10% εμφανίζονται οι 18 και 19. Στον πίνακα 5.6 φαίνεται η συχνότητα με την οποία εμφανίζονται οι κόμβοι του κύριου αγωγού και από εκεί θα εξαχθεί το συμπέρασμα για την τοποθέτηση των μετρητικών σταθμών σε αυτόν.

ΚΟΜΒΟΙ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
11	4
13	4
14	2
15	1
17	3
18	4
19	3

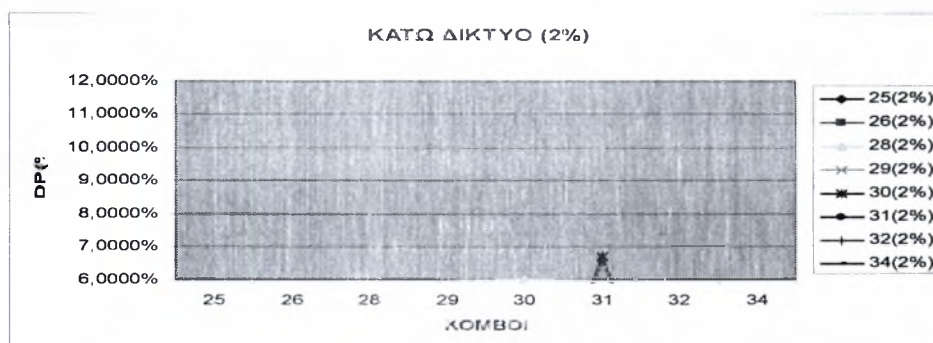
**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6: Συχνότητα εμφάνισης κόμβων πάνω δικτύου**

Οι κόμβοι που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης είναι οι 11, 13 και 18. Άρα σε αυτούς θα τοποθετηθούν οι μετρητικοί σταθμοί. Όπως παρατηρούμε οι ίδιοι κόμβοι ήταν και αυτοί που προέκυψαν και για την Ά Περίπτωση.

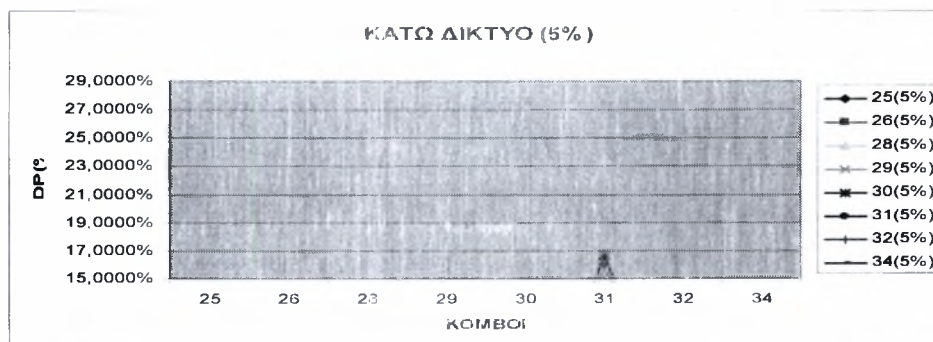




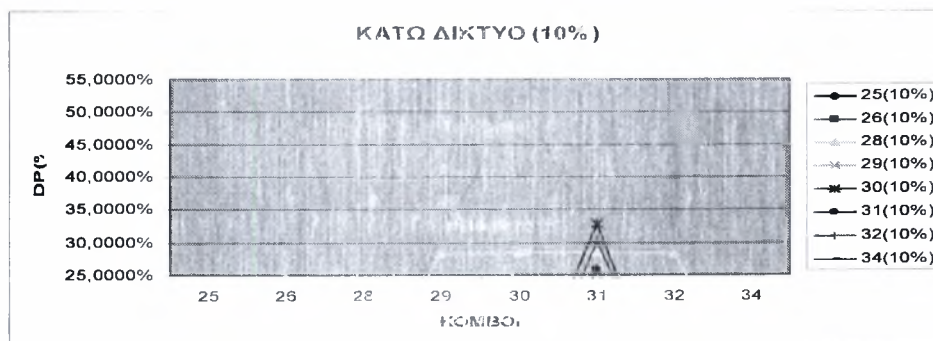
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.41:**  $DP(\%)$  για διαρροή 1% στο κάτω δίκτυο



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.42:**  $DP(\%)$  για διαρροή 2% στο κάτω δίκτυο



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.43:**  $DP(\%)$  για διαρροή 5% στο κάτω δίκτυο



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.44:**  $DP(\%)$  για διαρροή 10% στο κάτω δίκτυο





Τέλος στο κάτω δίκτυο για ποσοστό διαρροής 1% ως μικρότερη τιμή της DP% λαμβάνεται η 2,5%, για διαρροή 2% η τιμή 6%, για 5% διαρροή η τιμή 15% και για 10% η τιμή 25% είναι η τιμή πάνω από την οποία λαμβάνονται υπόψη οι κόμβοι. Οι κόμβοι 29, 30, 31 και 32 εμφανίζονται όταν η διαρροή είναι 1%, οι 30 και 31 όταν η διαρροή είναι 2%, όταν η διαρροή είναι 5% οι κόμβοι που εμφανίζονται είναι επίσης οι 30 και 31, ενώ για 10% οι 29, 30, 31 και 32. Ομοίως με τον κύριο αγωγό και το πάνω δίκτυο στον πίνακα 5.7 παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης των κόμβων.

ΚΟΜΒΟΙ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
29	1
<b>30</b>	4
<b>31</b>	4
32	2

***ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7: Συχνότητα εμφάνισης κόμβων κάτω δικτύου***

Συμπεραίνουμε πως οι κόμβοι στους οποίους θα τοποθετηθούν οι σταθμοί είναι οι 30 και 31. Στην Ά Περίπτωση, οι κόμβοι που είχαν προκύψει ήταν οι 29, 31 και 34. Συνεπώς υπάρχει μια διαφορά ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις, ως προς την ευαισθησία των κόμβων στις διαρροές, του κάτω δικτύου.



### 5.3.2 Μέθοδος Ιδιοτιμών

Υπάρχει και μια δεύτερη μέθοδος εύρεσης των κόμβων στους οποίους θα τοποθετηθούν οι μετρητικοί σταθμοί. Από τη γραμμικοποίηση των εξισώσεων προκύπτει η σχέση πινάκων:

$$(\Delta y) = C (\Delta x) \quad (5.1)$$

Όπου  $\Delta y$  είναι το διάνυσμα των ποσοστιαίων διαφορών πίεσης. Η στήλη του διανύσματος, απεικονίζει τις ποσοστιαίες διαφορές πίεσης όταν η διαρροή παρατηρείται σε κάποιο συγκεκριμένο κόμβο, για κάθε κόμβο. Ο πίνακας  $\Delta x$  είναι το διάνυσμα, των διαρροών. Κάνοντας χρήση του υπολογιστικού πακέτου Mathematica, υπολογίζουμε τις 10 μεγαλύτερες ιδιοτιμές του πίνακα  $C$ . Σε κάθε ιδιοτιμή αντιστοιχεί ένα ιδιοδιάνυσμα, του οποίου επιλέγουμε τις 5 μεγαλύτερες συνιστώσες. Οι πίνακες  $C$  εμφανίζονται στο παράρτημα. Η κάθε συνιστώσα του ιδιοδιανύσματος αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο κόμβο. Οι κόμβοι που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης είναι και αυτοί στους οποίους θα τοποθετηθούν οι μετρητικοί σταθμοί. Για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται πίνακες με τις τιμές των συνιστωσών των ιδιοδιανυσμάτων κάθε ιδιοτιμής, τη συνιστώσα κάθε ιδιοδιανύσματος, καθώς και τον αντίστοιχο κόμβο.



## ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α

**ΙΔΙΟΤΙΜΗ:23,4216**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,8079	8	11
0,3247	10	13
0,3115	9	12
0,2309	12	15
0,2210	11	14

***ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8:Τιμές 1<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής***

**ΙΔΙΟΤΙΜΗ:15,2187**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,9666	8	11
0,1691	7	10
0,1193	9	12
0,098	14	18
0,0750	10	13

***ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9:Τιμές 2<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής***

**ΙΔΙΟΤΙΜΗ:11,925**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,5065	23	29
0,4552	22	28
0,4430	24	30
0,3605	27	34
0,3367	25	31

***ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10:Τιμές 3<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής***

**ΙΔΙΟΤΙΜΗ:6,7506**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,6914	15	19
0,5698	7	10
0,3686	14	18
0,1950	9	12
0,1339	8	11

***ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11:Τιμές 4<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής***

**ΙΔΙΟΤΙΜΗ:4,2417(4,2326+0,2779i)**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,6356	15	19
0,5205(0,52055-0,0037i)	7	10
0,3106(-0,029-0,3092i)	9	12
0,2823(0,2798+0,03794i)	10	13
0,2736(-0,2730+0,019i)	12	15

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12:Τιμές 5<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής****ΙΔΙΟΤΙΜΗ:4,2417(4,2326-0,2779i)**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,6356	15	19
0,5205(0,52055-0,0037i)	7	10
0,3106(-0,029-0,3092i)	9	12
0,2823(0,2798+0,03794i)	10	13
0,2736(-0,2730+0,019i)	12	15

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13:Τιμές 6<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής****ΙΔΙΟΤΙΜΗ:3,4632**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,7069	25	31
0,5562	23	29
0,3164	24	30
0,2394	22	28
0,1821	26	32

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.14:Τιμές 7<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής****ΙΔΙΟΤΙΜΗ:3,1130**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,6808	7	10
0,4586	9	12
0,3928	15	19
0,2556	12	15
0,2022	8	11

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.15:Τιμές 8<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής**

**ΙΔΙΟΤΙΜΗ:2,5763**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,9396	27	34
0,3391	25	31
0,0335	22	28
0,0253	24	30
0,0158	23	29

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.16:Τιμές 9<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής****ΙΔΙΟΤΙΜΗ:2,3042(2,2996+0,1451i)**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,8579	7	10
0,3269(-0,3266-0,9421i)	14	18
0,2773(0,2696+0,065i)	15	19
0,2182(-0,2165-0,026i)	9	12
0,1454(0,1451+0,01054i)	12	15

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.17:Τιμές 10<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής**

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας με τη συχνότητα εμφάνισης των κόμβων. Ο συγκεκριμένος πίνακας αναφέρεται σε ολόκληρο το δίκτυο. Όπως αναμενόταν, λόγω της χαμηλής διαφοράς πτώσης πίεσης, που παρατηρείται στους κόμβους του κυρίου αγωγού, κόμβοι αυτού του τμήματος δεν εμφανίζονται. Αντίθετα εμφανίζονται κόμβοι του πάνω και του κάτω δικτύου. Οι κόμβοι 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18 και 19 αναφέρονται στο πάνω δίκτυο, ενώ οι υπόλοιποι στο κάτω δίκτυο.





ΚΟΜΒΟΙ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
10	6
11	4
12	7
13	4
14	1
15	5
18	3
19	5
28	3
29	3
30	3
31	3
32	1
34	2

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.18:** Συχνότητα εμφάνισης κόμβων

Συνεπώς οι κόμβοι στους οποίους θα τοποθετηθούν οι σταθμοί μέτρησης της πίεσης και της παροχής είναι οι 10, 12 και 19 για το πάνω δίκτυο και οι 28, 29 και 31 για το κάτω. Με την μέθοδο της παραμετρικής μελέτης είχαν προκύψει οι κόμβοι 11, 13 και 18 για το πάνω δίκτυο, που είναι γειτονικοί των κόμβων που προέκυψαν με τη μέθοδο των ιδιοτιμών. Στο κάτω δίκτυο με την παραμετρική μελέτη είχαν προκύψει οι κόμβοι 29, 31 και 34, που είναι επίσης γειτονικοί των κόμβων που προέκυψαν με την μέθοδο των ιδιοτιμών. Παρατηρούμε λοιπόν πως υπάρχει συνέπεια μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.



## ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β

**ΙΔΙΟΤΙΜΗ:25,4964**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,5323	8	11
0,4546	12	15
0,4225	10	13
0,3779	11	14
0,3124	9	12

***ΠΙΝΑΚΑΣ 5.18:Τιμές 1<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής***

**ΙΔΙΟΤΙΜΗ:10,0865**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,8274	8	11
0,3817	12	15
0,3208	10	13
0,2215	11	14
0,1239	9	12

***ΠΙΝΑΚΑΣ 5.19:Τιμές 2<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής***

**ΙΔΙΟΤΙΜΗ:6,4148**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,8644	25	31
0,3564	24	30
0,2583	23	29
0,1768	26	32
0,1266	27	34

***ΠΙΝΑΚΑΣ 5.20:Τιμές 3<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής***

**ΙΔΙΟΤΙΜΗ:4,2994**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,5554	14	18
0,3899	9	12
0,3875	10	13
0,3826	13	17
0,3339	8	11

***ΠΙΝΑΚΑΣ 5.21:Τιμές 4<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής***

**ΙΔΙΟΤΙΜΗ:1,36545**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,9048	25	31
0,3948	24	30
0,1308	23	29
0,0557	27	34
0,0556	26	32

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.22:Τιμές 5<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής****ΙΔΙΟΤΙΜΗ:1,30693**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,7365	9	12
0,592	14	18
0,1838	7	10
0,1623	8	11
0,1219	13	17

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.23:Τιμές 6<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής****ΙΔΙΟΤΙΜΗ:1,30562(0,5482+1,1849i)**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,7907	12	15
0,4659(-0,4267+0,187i)	14	18
0,2977(0,0391-0,2951i)	15	19
0,1565(-0,1164-0,1046i)	13	17
0,1417(-0,1310+0,054i)	9	12

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.24:Τιμές 7<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής****ΙΔΙΟΤΙΜΗ:1,30562(0,5482-1,1849i)**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,7907	12	15
0,4659(-0,4267+0,187i)	14	18
0,2977(0,0391-0,2951i)	15	19
0,1565(-0,1164-0,1046i)	13	17
0,1417(-0,1310+0,054i)	9	12

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.25:Τιμές 8<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής**



**ΙΔΙΟΤΙΜΗ:0,9865**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,7828	25	31
0,5644	24	30
0,1677	26	32
0,1551	23	29
0,0980	27	34

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.26:Τιμές 9<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής**

**ΙΔΙΟΤΙΜΗ:0,3996**

ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΚΟΜΒΟΣ
0,7178	14	18
0,621	15	19
0,2255	12	15
0,2158	13	17
0,0282	7	10

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.27:Τιμές 10<sup>ης</sup> Ιδιοτιμής**

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας με τη συχνότητα εμφάνισης των κόμβων. Όπως και προηγουμένως οι κόμβοι 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18 και 19 αναφέρονται στο πάνω δίκτυο, ενώ οι υπόλοιποι στο κάτω δίκτυο.

ΚΟΜΒΟΙ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
10	2
11	4
<b>12</b>	6
13	3
14	2
<b>15</b>	5
17	5
<b>18</b>	5
19	3
<b>29</b>	3
30	3
<b>31</b>	3
32	3
<b>34</b>	3

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.28: Συχνότητα εμφάνισης κόμβων**



Συνεπώς οι κόμβοι στους οποίους θα τοποθετηθούν οι σταθμοί μέτρησης της πίεσης και της παροχής είναι οι 12, 15 και 18 για το πάνω δίκτυο και οι 29, 31, και 34 για το κάτω. Με την μέθοδο της παραμετρικής μελέτης είχαν προκύψει οι κόμβοι 11, 13 και 18 για το πάνω δίκτυο. Οι κόμβοι 11 και 13 είναι γειτονικοί του κόμβου 12, ενώ ο κόμβος 18 εμφανίστηκε και με τις δύο μεθόδους. Με τη μέθοδο των ιδιοτιμών εμφανίζεται και ο κόμβος 15, που με την μέθοδο της παραμετρικής μελέτης δεν έδειχνε να είναι ευαίσθητος στις διαρροές. Στο κάτω δίκτυο με την παραμετρική μελέτη είχαν προκύψει οι κόμβοι 30 και 31, που είναι επίσης γειτονικοί των κόμβων που προέκυψαν με την μέθοδο των ιδιοτιμών. Παρατηρούμε λοιπόν πως υπάρχει συνέπεια μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων και για την 'Β Περίπτωση.

#### 5.4 Εύρεση περιοχής διαρροών

Όπως προαναφέρθηκε είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, σε ένα πραγματικό δίκτυο μεταφοράς φυσικού αερίου να γίνουν μετρήσεις των πιέσεων και των παροχών σε όλα τα σημεία του δικτύου. Για αυτό έγινε και η τοποθέτηση των μετρητικών σταθμών σε ορισμένους κόμβους. Γνωρίζοντας τις πιέσεις στους συγκεκριμένους κόμβους, μπορούμε να συμπεράνουμε σε ποια περιοχή του δικτύου συμβαίνει η διαρροή. Σε προηγούμενες παραγράφους του 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου, αναφέρθηκε ότι μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις. Η Α Περίπτωση, στην οποία η ζήτηση, στους κόμβους στους οποίους υπήρχε αρχικά, παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την τιμή και τη θέση που συμβαίνει η διαρροή και η 'Β Περίπτωση στην οποία η ζήτηση μεταβάλλεται. Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα μελετήσουμε την Α Περίπτωση, η οποία συμβαίνει στην πραγματικότητα. Επίσης θα μελετηθεί ενδεικτικά το ποσοστό διαρροής 2%, γιατί όπως είδαμε δεν υπάρχει σημαντική διαφορά όταν μεταβάλλεται το ποσοστό της διαρροής.





Υποθέσαμε διαρροή σε κάθε κόμβο του πάνω δικτύου ξεχωριστά και στη συνέχεια του κάτω. Αρχικά έγινε χρήση ενός μετρητικού σταθμού σε κάθε δίκτυο. Στους πίνακες 5.29, 5.30 και 5.31 παρουσιάζονται οι τιμές της εκατοστιαίας διαφοράς πτώσης πίεσης, όταν η διαρροή συμβαίνει σε κάθε κόμβο του πάνω δικτύου ξεχωριστά. Ο μετρητικός σταθμός έχει τοποθετηθεί στον κόμβο 11, 13 και 18 αντίστοιχα. Στους πίνακες 5.32, 5.33 και 5.34 παρουσιάζονται οι τιμές της DP(%), όταν γίνεται χρήση δύο μετρητικών σταθμών, με σκοπό την εύρεση συγκεκριμένης περιοχής του δικτύου που συμβαίνει η διαρροή. Παρουσιάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί μετρητικών σταθμών.

ΔΙΑΡΡΟΗ 10		ΔΙΑΡΡΟΗ 11		ΔΙΑΡΡΟΗ 12	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	0,8065%	11	29,8387%	11	13,7097%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

ΔΙΑΡΡΟΗ 13		ΔΙΑΡΡΟΗ 14		ΔΙΑΡΡΟΗ 15	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	12,0968%	11	9,6774%	11	8,8710%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

ΔΙΑΡΡΟΗ 17		ΔΙΑΡΡΟΗ 18		ΔΙΑΡΡΟΗ 19	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	0,8065%	11	0,0000%	11	0,0000%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.29: Τιμές DP(%) για χρήση μετρητικού σταθμού στον κόμβο 11**



ΔΙΑΡΡΟΗ 10		ΔΙΑΡΡΟΗ 11		ΔΙΑΡΡΟΗ 12	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
13	0,0000%	13	0,4386%	13	2,4123%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

ΔΙΑΡΡΟΗ 13		ΔΙΑΡΡΟΗ 14		ΔΙΑΡΡΟΗ 15	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
13	26,5351%	13	16,6667%	13	7,2368%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

ΔΙΑΡΡΟΗ 17		ΔΙΑΡΡΟΗ 18		ΔΙΑΡΡΟΗ 19	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
13	0,6579%	13	0,2193%	13	0,2193%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.30: Τιμές DP(%) για χρήση μετρητικού σταθμού στον κόμβο 13**

ΔΙΑΡΡΟΗ 10		ΔΙΑΡΡΟΗ 11		ΔΙΑΡΡΟΗ 12	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
18	0,9615%	18	0,0000%	18	0,9615%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

ΔΙΑΡΡΟΗ 13		ΔΙΑΡΡΟΗ 14		ΔΙΑΡΡΟΗ 15	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
18	0,9615%	18	0,9615%	18	0,9615%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

ΔΙΑΡΡΟΗ 17		ΔΙΑΡΡΟΗ 18		ΔΙΑΡΡΟΗ 19	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
18	7,6923%	18	8,6538%	18	0,9615%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.31: Τιμές DP(%) για χρήση μετρητικού σταθμού στον κόμβο 18**

Τα παραπάνω διαγράμματα αναφέρονται σε διαρροές που συμβαίνουν στο πάνω δίκτυο. Συνεπώς υπάρχει μεταβολή της πίεσης μόνο στους κόμβους του πάνω δικτύου και όχι του κάτω. Για το λόγω αυτό η τιμή της DP(%) στους κόμβους του



δικτύου που δεν συμβαίνει διαρροή, στη συγκεκριμένη περίπτωση στους κόμβους του κάτω δικτύου είναι ίση με 0%. Άρα μπορούμε εύκολα με χρήση ενός και μόνο μετρητικού σταθμού, να συμπεράνουμε σε ποιο δίκτυο συμβαίνει η διαρροή. Πρόβλημα υπάρχει, όταν η διαρροή συμβαίνει στους κόμβους 18 και 19 και ο μετρητικός σταθμός έχει τοποθετηθεί στον κόμβο 11. Επίσης το ίδιο πρόβλημα συναντάται όταν η διαρροή συμβαίνει στο κόμβο 10 και ο μετρητικός σταθμός έχει τοποθετηθεί στον κόμβο 13. Τέλος όταν η διαρροή συναντάται στον κόμβο 11 και ο μετρητικός σταθμός έχει τοποθετηθεί στον κόμβο 18. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν παρατηρείται διαρροή στους συγκεκριμένους κόμβους και οι μετρήσεις γίνονται σε συγκεκριμένους κόμβους, η πίεση παραμένει σταθερή και η τιμή της DP(%) είναι επίσης ίση με 0%.

ΔΙΑΡΡΟΗ 10		ΔΙΑΡΡΟΗ 11		ΔΙΑΡΡΟΗ 12	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	0,8065%	11	29,8387%	11	13,7097%
18	0,9615%	18	0,0000%	18	0,9615%
29	0,0000%	29	0,0000%	29	0,0000%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

ΔΙΑΡΡΟΗ 13		ΔΙΑΡΡΟΗ 14		ΔΙΑΡΡΟΗ 15	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	12,0968%	11	9,6774%	11	8,8710%
18	0,9615%	18	0,9615%	18	0,9615%
29	0,0000%	29	0,0000%	29	0,0000%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

ΔΙΑΡΡΟΗ 17		ΔΙΑΡΡΟΗ 18		ΔΙΑΡΡΟΗ 19	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	0,8065%	11	0,0000%	11	0,0000%
18	7,6923%	18	8,6538%	18	0,9615%
29	0,0000%	29	0,0000%	29	0,0000%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.32: Τιμές DP(%) για χρήση μετρητικού σταθμού στον κόμβο 11 & 18**



ΔΙΑΡΡΟΗ 10		ΔΙΑΡΡΟΗ 11		ΔΙΑΡΡΟΗ 12	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
13	0,0000%	13	0,4386%	13	2,4123%
18	0,9615%	18	0,0000%	18	0,9615%
29	0,0000%	29	0,0000%	29	0,0000%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

ΔΙΑΡΡΟΗ 13		ΔΙΑΡΡΟΗ 14		ΔΙΑΡΡΟΗ 15	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
13	26,5351%	13	16,6667%	13	7,2368%
18	0,9615%	18	0,9615%	18	0,9615%
29	0,0000%	29	0,0000%	29	0,0000%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

ΔΙΑΡΡΟΗ 17		ΔΙΑΡΡΟΗ 18		ΔΙΑΡΡΟΗ 19	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
13	0,6579%	13	0,2193%	13	0,2193%
18	7,6923%	18	8,6538%	18	0,9615%
29	0,0000%	29	0,0000%	29	0,0000%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.33: Τιμές DP(%) για χρήση μετρητικού σταθμού στον κόμβο 13 &amp; 18

ΔΙΑΡΡΟΗ 10		ΔΙΑΡΡΟΗ 11		ΔΙΑΡΡΟΗ 12	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	0,8065%	11	29,8387%	11	13,7097%
13	0,0000%	13	0,4386%	13	2,4123%
29	0,0000%	29	0,0000%	29	0,0000%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

ΔΙΑΡΡΟΗ 13		ΔΙΑΡΡΟΗ 14		ΔΙΑΡΡΟΗ 15	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	12,0968%	11	9,6774%	11	8,8710%
13	26,5351%	13	16,6667%	13	7,2368%
29	0,0000%	29	0,0000%	29	0,0000%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

ΔΙΑΡΡΟΗ 17		ΔΙΑΡΡΟΗ 18		ΔΙΑΡΡΟΗ 19	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	0,8065%	11	0,0000%	11	0,0000%
13	0,6579%	13	0,2193%	13	0,2193%
29	0,0000%	29	0,0000%	29	0,0000%
34	0,0000%	34	0,0000%	34	0,0000%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.34: Τιμές DP(%) για χρήση μετρητικού σταθμού στον κόμβο 11 &amp; 13



Στους πίνακες 5.32, 5.33 και 5.34 παρουσιάζονται οι τιμές της εκατοστιαίας διαφοράς πτώσης πίεσης, όταν οι μετρήσεις γίνονται σε δύο κόμβους του πάνω και δύο κόμβους του κάτω δικτύου. Αντίθετα με τη χρήση ενός μετρητικού σταθμού, τώρα γίνεται αντιληπτό, σε όποιο κόμβο και αν συμβαίνει η διαρροή σε ποιο από τα δύο δίκτυα συμβαίνει η διαρροή. Επίσης με τη χρήση δύο σταθμών είμαστε σε θέση να συμπεράνουμε και σε ποιες συγκεκριμένες περιοχές του δικτύου συμβαίνει η διαρροή. Με γκρι χρώμα παρουσιάζονται στους παραπάνω πίνακες οι μέγιστες τιμές σε κάθε περίπτωση διαρροής, που απεικονίζουν και τις περιοχές του δικτύου που συμβαίνει η διαρροή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα για τις περιπτώσεις που η διαρροή συμβαίνει σε κόμβους του κάτω δικτύου.

ΔΙΑΡΡΟΗ 28		ΔΙΑΡΡΟΗ 29		ΔΙΑΡΡΟΗ 30	
ΚΟΜΒΟΙ	DP(%)	ΚΟΜΒΟΙ	DP(%)	ΚΟΜΒΟΙ	DP(%)
18	0,0000%	18	0,0000%	18	0,0000%
29	1,9393%	29	10,5917%	29	4,9727%

ΔΙΑΡΡΟΗ 31		ΔΙΑΡΡΟΗ 32		ΔΙΑΡΡΟΗ 34	
ΚΟΜΒΟΙ	DP(%)	ΚΟΜΒΟΙ	DP(%)	ΚΟΜΒΟΙ	DP(%)
18	0,0000%	18	0,0000%	18	0,0000%
29	4,5251%	29	4,8732%	29	1,8399%

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.35: Τιμές DP(%) για χρήση μετρητικού σταθμού στον κόμβο 29**

ΔΙΑΡΡΟΗ 28		ΔΙΑΡΡΟΗ 29		ΔΙΑΡΡΟΗ 30	
ΚΟΜΒΟΙ	DP(%)	ΚΟΜΒΟΙ	DP(%)	ΚΟΜΒΟΙ	DP(%)
18	0,0000%	18	0,0000%	18	0,0000%
31	1,9259%	31	2,3210%	31	2,6667%

ΔΙΑΡΡΟΗ 31		ΔΙΑΡΡΟΗ 32		ΔΙΑΡΡΟΗ 34	
ΚΟΜΒΟΙ	DP(%)	ΚΟΜΒΟΙ	DP(%)	ΚΟΜΒΟΙ	DP(%)
18	0,0000%	18	0,0000%	18	0,0000%
31	9,8765%	31	2,5679%	31	1,8765%

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.36: Τιμές DP(%) για χρήση μετρητικού σταθμού στον κόμβο 31**





ΔΙΑΡΡΟΗ 28		ΔΙΑΡΡΟΗ 29		ΔΙΑΡΡΟΗ 30	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
18	0,0000%	18	0,0000%	18	0,0000%
34	2,4269%	34	2,8429%	34	3,2590%

ΔΙΑΡΡΟΗ 31		ΔΙΑΡΡΟΗ 32		ΔΙΑΡΡΟΗ 34	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
18	0,0000%	18	0,0000%	18	0,0000%
34	3,6750%	34	3,2590%	34	6,7144%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.37: Τιμές DP(%) για χρήση μετρητικού σταθμού στον κόμβο 34

ΔΙΑΡΡΟΗ 28		ΔΙΑΡΡΟΗ 29		ΔΙΑΡΡΟΗ 30	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	0,0000%	11	0,0000%	11	0,0000%
18	0,0000%	18	0,0000%	18	0,0000%
29	1,9393%	29	10,5917%	29	4,9727%
34	2,4269%	34	2,8429%	34	3,2590%

ΔΙΑΡΡΟΗ 31		ΔΙΑΡΡΟΗ 32		ΔΙΑΡΡΟΗ 34	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	0,0000%	11	0,0000%	11	0,0000%
18	0,0000%	18	0,0000%	18	0,0000%
29	4,5251%	29	4,8732%	29	1,8399%
34	3,6750%	34	3,2590%	34	6,7144%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.38: Τιμές DP(%) για χρήση μετρητικού σταθμού στον κόμβο 29 &amp; 34

ΔΙΑΡΡΟΗ 28		ΔΙΑΡΡΟΗ 29		ΔΙΑΡΡΟΗ 30	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	0,0000%	11	0,0000%	11	0,0000%
18	0,0000%	18	0,0000%	18	0,0000%
29	1,9393%	29	10,5917%	29	4,9727%
31	1,9259%	31	2,3210%	31	2,6667%

ΔΙΑΡΡΟΗ 31		ΔΙΑΡΡΟΗ 32		ΔΙΑΡΡΟΗ 34	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	0,0000%	11	0,0000%	11	0,0000%
18	0,0000%	18	0,0000%	18	0,0000%
29	4,5251%	29	4,8732%	29	1,8399%
31	9,8765%	31	2,5679%	31	1,8765%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.39: Τιμές DP(%) για χρήση μετρητικού σταθμού στον κόμβο 29 &amp; 31



ΔΙΑΡΡΟΗ 28		ΔΙΑΡΡΟΗ 29		ΔΙΑΡΡΟΗ 30	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	0,0000%	11	0,0000%	11	0,0000%
18	0,0000%	18	0,0000%	18	0,0000%
31	1,9259%	31	2,3210%	31	2,6667%
34	2,4269%	34	2,8429%	34	3,2590%

ΔΙΑΡΡΟΗ 31		ΔΙΑΡΡΟΗ 32		ΔΙΑΡΡΟΗ 34	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	0,0000%	11	0,0000%	11	0,0000%
18	0,0000%	18	0,0000%	18	0,0000%
31	9,8765%	31	2,5679%	31	1,8765%
34	3,6750%	34	3,2590%	34	6,7144%

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.40: Τιμές DP(%) για χρήση μετρητικού σταθμού στον κόμβο 31 & 34**

ΔΙΑΡΡΟΗ 28		ΔΙΑΡΡΟΗ 29		ΔΙΑΡΡΟΗ 30	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	0,0000%	11	0,0000%	11	0,0000%
13	0,0000%	13	0,0000%	13	0,0000%
18	0,0000%	18	0,0000%	18	0,0000%
29	1,9393%	29	10,5917%	29	4,9727%
31	1,9259%	31	2,3210%	31	2,6667%
34	2,4269%	34	2,8429%	34	3,2590%

ΔΙΑΡΡΟΗ 31		ΔΙΑΡΡΟΗ 32		ΔΙΑΡΡΟΗ 34	
KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)	KOMBOI	DP(%)
11	0,0000%	11	0,0000%	11	0,0000%
13	0,0000%	13	0,0000%	13	0,0000%
18	0,0000%	18	0,0000%	18	0,0000%
29	4,5251%	29	4,8732%	29	1,8399%
31	9,8765%	31	2,5679%	31	1,8765%
34	3,6750%	34	3,2590%	34	6,7144%

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.41: Τιμές DP(%) για χρήση μετρητικού σταθμού στον κόμβο 29, 31 & 34**

Στα προηγούμενα διαγράμματα παρουσιάζονται πίνακες με τιμές της DP(%) για διαρροή σε κάθε κόμβο του κάτω δικτύου ξεχωριστά. Αρχικά γίνεται χρήση ενός



μετρητικού σταθμού, από όπου γίνεται αντιληπτό σε ποιο από τα δύο δίκτυα συμβαίνει η διαρροή, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση που η διαρροή παρατηρείται σε κόμβους του πάνω δικτύου. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται και δεύτερος σταθμός, με σκοπό την εύρεση συγκεκριμένης περιοχής στην οποία συμβαίνει η διαρροή. Με γκρι χρώμα παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές σε κάθε περίπτωση διαρροής, που απεικονίζουν και τις περιοχές του δικτύου που συμβαίνει η διαρροή. Όμως αυτό δεν είναι εμφανές σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των κόμβων ανά δύο. Για αυτό έγινε και χρήση τρίτου μετρητικού σταθμού σε κάθε δίκτυο.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

### 6.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκαν δύο μέθοδοι, με σκοπό την τοποθέτηση μετρητικών σταθμών. Η τοποθέτηση των σταθμών αυτών, αποσκοπούσε στην εύρεση της περιοχής, όπου συμβαίνει η διαρροή. Οι μέθοδοι αυτοί απαιτούν μεγάλο χρόνο, για την εύρεση των ευαίσθητων κόμβων στις διαρροές, στους οποίους θα τοποθετηθούν οι μετρητικοί σταθμοί. Για αυτό το λόγο κρίθηκε απαραίτητη, η ανάπτυξη ενός κώδικα κατάλληλου στην εύρεση της περιοχής που συμβαίνει η διαρροή, σε μικρό χρονικό διάστημα.

Ο συγκεκριμένος κώδικας για δεδομένες τιμές πιέσεων, θα μας δίνει τη θέση και την τιμή της ζήτησης ή της διαρροής. Κατά το σχεδιασμό ενός δικτύου σωληνώσεων, δίνονται ορισμένα μεγέθη του δικτύου και υπολογίζονται οι πιέσεις και οι παροχές. Έτσι έγινε και στα προηγούμενα κεφάλαια. Δινόταν τα χαρακτηριστικά μεγέθη του δικτύου, δηλαδή το μήκος του κάθε αγωγού, η διάμετρός του και η τραχύτητά του. Επιπλέον δινόταν η ισχύς του συμπιεστή, καθώς και η θέση και οι τιμές των διαρροών και των ζητήσεων. Άγνωστες ποσότητες, των οποίων τις τιμές υπολογίζουμε ήταν οι πιέσεις στους κόμβους και οι παροχές στους αγωγούς. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο εξετάζεται το αντίστροφο πρόβλημα. Μία από τις γνωστές μεταβλητές, στην περίπτωσή μας οι ζητήσεις και οι διαρροές, γίνονται άγνωστες και μία από τις άγνωστες (η πίεση), γίνεται γνωστή. Δημιουργούνται όπως και προηγουμένως δύο συστήματα. Το πρώτο απαρτίζεται από τις εξισώσεις πτώσεις πίεσης και το δεύτερο από τις εξισώσεις συνέχειας. Επιλύοντας το δύο συστήματα, θα προκύψουν οι τιμές των άγνωστων μεταβλητών.



## 6.2 Εφαρμογή και Αποτελέσματα

Υποθέτουμε ζήτηση ίση με 10 lb/hr στους κόμβους 16, 33 και 35. Η τιμή της πίεσης σε κάθε κόμβο φαίνεται στον Πίνακα 6.1.

ΚΟΜΒΟΙ	ΖΗΤΗΣΗ	ΠΙΕΣΗ
1	0,000E+00	7,25000E+02
2	0,000E+00	6,66391E+02
3	0,000E+00	6,14520E+02
4	0,000E+00	5,43668E+02
5	0,000E+00	4,61262E+02
6	0,000E+00	2,75000E+02
7	0,000E+00	2,29948E+02
8	0,000E+00	1,72238E+02
9	0,000E+00	5,80000E+01
10	0,000E+00	5,79702E+01
11	0,000E+00	5,79578E+01
12	0,000E+00	5,78926E+01
13	0,000E+00	5,78470E+01
14	0,000E+00	5,78013E+01
15	0,000E+00	5,77557E+01
16	1,000E+01	5,67500E+01
17	0,000E+00	5,77675E+01
18	0,000E+00	5,79493E+01
19	0,000E+00	5,79597E+01
20	0,000E+00	4,44213E+02
21	0,000E+00	4,26463E+02
22	0,000E+00	4,11752E+02
23	0,000E+00	3,92503E+02
24	0,000E+00	2,75000E+02
25	0,000E+00	2,29948E+02
26	0,000E+00	1,72238E+02
27	0,000E+00	5,80000E+01
28	0,000E+00	5,68393E+01
29	0,000E+00	5,66382E+01
30	0,000E+00	5,64363E+01
31	0,000E+00	5,62338E+01
32	0,000E+00	5,64363E+01
33	1,000E+01	5,60305E+01
34	0,000E+00	5,71347E+01
35	1,000E+01	3,92502E+02

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1:** Τιμή πίεσης σε κάθε κόμβο του δικτύου



Όπως προαναφέρθηκε, στον κώδικα του αντίστροφου σχεδιασμού, μία γνωστή μεταβλητή, η τιμή της ζήτησης και της διαρροής σε κάθε κόμβο, γίνεται άγνωστη. Επίσης μία άγνωστη μεταβλητή, η τιμή της πίεσης σε κάθε κόμβο, γίνεται γνωστή. Στον πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι τιμές των ζητήσεων και διαρροών με γνωστές τις τιμές των πιέσεων.

ΚΟΜΒΟΙ	ΠΙΕΣΗ	ΖΗΤΗΣΗ
1	7,25000E+02	0,000E+00
2	6,66391E+02	1,073E+00
3	6,14520E+02	-1,229E+00
4	5,43668E+02	-3,307E+00
5	4,61262E+02	-1,492E+00
6	2,75000E+02	0,000E+00
7	2,29948E+02	-7,140E-01
8	1,72238E+02	-1,343E+00
9	5,80000E+01	0,000E+00
10	5,79702E+01	-1,774E-03
11	5,79578E+01	-3,031E-03
12	5,78926E+01	7,809E-05
13	5,78470E+01	-7,490E-04
14	5,78013E+01	1,593E-03
15	5,77557E+01	-1,016E-03
16	5,67500E+01	1,000E+01
17	5,77675E+01	9,978E-04
18	5,79493E+01	-1,810E-02
19	5,79597E+01	2,445E-02
20	4,44213E+02	-3,541E-01
21	4,26463E+02	-1,974E-01
22	4,11752E+02	-1,390E-01
23	3,92503E+02	2,834E+00
24	2,75000E+02	0,000E+00
25	2,29948E+02	-7,140E-01
26	1,72238E+02	-1,343E+00
27	5,80000E+01	0,000E+00
28	5,68393E+01	5,983E-04
29	5,66382E+01	-4,537E-04
30	5,64363E+01	6,909E-04
31	5,62338E+01	-3,670E-04
32	5,64363E+01	4,021E-04
33	5,60305E+01	9,998E+00
34	5,71347E+01	7,019E-04
35	3,92502E+02	8,398E+00

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2:Τιμή ζήτησης σε κάθε κόμβο του δικτύου**





Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε με σκοπό τον έλεγχο των αποτελεσμάτων. Αρχικά έγινε επίλυση του δικτύου με γνωστές τις τιμές των ζητήσεων και των διαρροών, από όπου προέκυψαν οι άγνωστες τιμές των πιέσεων, που εμφανίζονται στον πίνακα 6.1. Στη συνέχεια με δεδομένες τις τιμές των πιέσεων που προέκυψαν, υπολογίζονται οι τιμές των ζητήσεων και των διαρροών, που εμφανίζονται στον πίνακα 6.2. Οι τιμές των ζητήσεων και διαρροών που θα έπρεπε να εμφανιστούν στον πίνακα 6.2 είναι αυτές που εμφανίζονται στον πίνακα 6.1. Συνεπώς τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον κώδικα αντίστροφου σχεδιασμού δεν είναι ορθά. Παρατηρούμε πως στους κόμβους που υπήρχε αρχικά η ζήτηση, δηλαδή στους 16, 33 και 35 και ήταν ίση με 10 lb/hr, προέκυψαν τιμές 10 lb/hr, 9,998 lb/hr και 8,398 lb/hr, αντίστοιχα. Η τιμή στον κόμβο 35 απέχει πολύ από την πραγματική τιμή. Στους υπόλοιπους κόμβους η διαρροή ήταν ίση με 0 lb/hr. Οι τιμές που προέκυψαν, από τον κώδικα αντίστροφου σχεδιασμού, ήταν στην πλειοψηφία πολύ μικρές της τάξης  $10^{-3}$  και  $10^{-4}$  (περίπου 0 lb/hr) και αρνητικές. Αρνητικές τιμές εμφανίζονται στους κόμβους, που απαιτούν εισροή αερίου. Επιπλέον εμφανίζονται σε ορισμένους κόμβους συγκεκριμένες τιμές. Στον κόμβο 2 η ζήτηση που προέκυψε είναι 1,073 lb/hr, στον κόμβο 19 ίση με  $2,44 \cdot 10^{-2}$  lb/hr και στον κόμβο 23 ίση με 2,834 lb/hr. Τέλος στους κόμβους που είναι τοποθετημένες οι δεξαμενές, οι τιμές διαρροών που προέκυψαν είναι 0 lb/hr και είναι αυτές που θα έπρεπε να προκύψουν.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή μεθοδολογίας κατάλληλης για τον εντοπισμό διαρροών σε δίκτυο σωληνώσεων μεταφοράς φυσικού αερίου. Διαρροές συμβαίνουν σε περίπτωση αστοχίας των αγωγών, όπως είναι η θραύση τους.

Το δίκτυο σωληνώσεων που σχεδιάστηκε για την παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τρία μέρη. Τον κύριο αγωγό υψηλής πίεσης 50 bar και διαμέτρου 36'', τα ενδιάμεσα δίκτυα, πίεσης 19 bar και διαμέτρου 24'' και τέλος τα δύο δίκτυα πόλης (πάνω δίκτυο και κάτω δίκτυο), χαμηλής πίεσης 4 bar και διαμέτρου από 8'' έως 24''. Κατά το σχεδιασμό αποφασίστηκε η επιλογή δύο δικτύων πόλης, για να είναι το πρόβλημα πιο κοντά στην πραγματικότητα και ταυτόχρονα πιο πολύπλοκο, σε σχέση με ένα δίκτυο που θα περιείχε ένα δίκτυο πόλης. Η επίλυση του δικτύου γίνεται με την επίλυση δύο συστημάτων. Το πρώτο απαρτίζεται από τις εξισώσεις πτώσεις πίεσης για κάθε στοιχείο του δικτύου και το δεύτερο από τις εξισώσεις συνέχειας για κάθε κόμβο του δικτύου. Η εξίσωση πτώσης πίεσης αποτελείται από τρεις όρους. Ο πρώτος προκαλεί πτώση πίεσης λόγω τριβών, ο δεύτερος λόγω εξαρτημάτων και ο τρίτος προκαλεί αύξηση της πτώσης πίεσης και οφείλεται στον συμπιεστή. Ο πρώτος όρος είναι ανάλογος του μήκους του αγωγού και αντιστρόφως ανάλογος της διαμέτρου του. Για αυτό το λόγο και η πτώση πίεσης στον κύριο αγωγό, διαμέτρου 36'' και τα ενδιάμεσα δίκτυα, διαμέτρου 24'', είναι μικρή.

Αρχικά υπάρχουν ζητήσεις σε τρεις κόμβους του δικτύου. Ο ένας ανήκει στον κύριο αγωγό, ο δεύτερος στο ένα από τα δύο δίκτυα πόλης (πάνω δίκτυο) και ο τρίτος στο άλλο δίκτυο (κάτω δίκτυο). Υποθέσαμε διαρροή σε κάθε κόμβο του δικτύου ξεχωριστά και για κάθε διαρροή υπολογίσαμε τιμές των πιέσεων.



Υπολογίσαμε τιμές για δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση η ζήτηση στους κόμβους που προαναφέρθηκαν παρέμενε σταθερή, ενώ στη δεύτερη, η ζήτηση μεταβαλλόταν ανάλογα με το σημείο που προκαλούνταν η διαρροή και το ποσοστό της διαρροής. Τα ποσοστά διαρροής, που υποθέσαμε ήταν 1%, 2%, 5% και 10% της ζήτησης. Από τα διαγράμματα που προέκυψαν συμπεραίνουμε, πως με την αύξηση της διαρροής αυξάνει η τιμή της ποσοστιαίας διαφοράς πίεσης ( $DP(\%)$ ) και για τις δύο περιπτώσεις. Επιπλέον παρατηρούμε πως δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στις τιμές της  $DP(\%)$ , ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις που μελετήσαμε.

Η τοποθέτηση των μετρητικών σταθμών έγινε με δύο μεθόδους. Η πρώτη με παραμετρική μελέτη των διαγραμμάτων που προαναφέρθηκαν και η δεύτερη με τη μέθοδο των ιδιοτιμών. Παρατηρούμε με την πρώτη μέθοδο, ότι προέκυψαν οι ίδιοι ή γειτονικοί κόμβοι και για τις δύο περιπτώσεις. Με τη δεύτερη μέθοδο, δηλαδή τη μέθοδο των ιδιοτιμών, προέκυψαν κόμβοι που είναι ίδιοι ή γειτονικοί με αυτούς που προέκυψαν με την πρώτη μέθοδο.

Τέλος τοποθετώντας από ένα μετρητικό σταθμό σε κάθε δίκτυο πόλης, είμαστε σε θέση να καταλάβουμε σε ποιο από τα δύο δίκτυα συμβαίνει η διαρροή, γιατί στο δίκτυο που δεν συμβαίνει, οι τιμές που υπολογίζονται παραμένουν σταθερές και δε μεταβάλλονται. Με τοποθέτηση και δεύτερου σταθμού, παίρνουμε περισσότερες πληροφορίες για το σημείο διαρροής. Το σημείο αυτό βρίσκεται πιο κοντά στο μετρητικό σταθμό που αποκτά τη μεγαλύτερη τιμή της  $DP(\%)$ . Στην περίπτωση του κάτω δικτύου γίνεται και χρήση τρίτου μετρητικού σταθμού, γιατί δε φθάνουμε με δύο σταθμούς στα επιθυμητά αποτελέσματα.

Στο μέλλον θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένας κώδικας βελτιστοποίησης για το συγκεκριμένο κώδικα, κατά το σχεδιασμό του δικτύου. Το κριτήριο για τον βέλτιστο σχεδιασμό, θα πρέπει να είναι το συνολικό κόστος του δικτύου που περιλαμβάνει τα



κόστη εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης του δικτύου. Θα πρέπει να ακολουθηθεί μια διαδικασία ελαχιστοποίησης του κόστους με μεταβλητές τις διαμέτρους, τα μήκη των αγωγών και τις ισχύεις των συμπιεστών. Είναι φανερό πως τα μεγάλα μήκη των αγωγών και οι μεγάλες διάμετροι αυξάνουν το κόστος εγκατάστασης. Όμως οι μεγάλες διάμετροι οδηγούν σε μειωμένες τριβές με αποτέλεσμα να απαιτούνται συμπιεστές με μικρότερη ισχύ. Συνεπώς στόχος θα πρέπει να είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ικανοποιώντας ταυτόχρονα όλες τις απαιτήσεις των προδιαγραφών.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6, έγινε προσπάθεια ανάπτυξης κώδικα αντίστροφου σχεδιασμού. Έχοντας γνωστές τις πιέσεις σε διάφορους κόμβους θα έπρεπε να υπολογίσουμε τιμές των διαρροών. Οι τιμές που θα προέκυπταν έπρεπε να είναι αυτές που ήταν δεδομένες από το σχεδιασμό του δικτύου. Τα αποτελέσματα που πήραμε δεν ήταν ορθά, για αυτό στο μέλλον θα μπορούσε να γίνει προσπάθεια πιστοποίησης του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Εάν αυτό γίνει δυνατό, τότε θα μπορούμε γνωρίζοντας τις πιέσεις σε ορισμένους κόμβους, να υπολογίσουμε τιμές διαρροών και σε πολύ μικρό χρόνο να είμαστε σε θέση να ανιχνεύσουμε την περιοχή διαρροής.



## Βιβλιογραφία

- [1] Παπαϊωάννου, Α., “Μηχανική των Ρευστών”, Β’ Έκδοση, Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1993.
- [2] Potter, M., and Wiggert, D., “Mechanics of Fluids”, 2<sup>nd</sup> Edition, Prentice Hall, 1997.
- [3] Shapiro, A., “The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow”, John Wiley & Sons, 1953.
- [4] Βαρούτης, Σ., “Αντίστροφος Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση Δικτύων Ασυμπίεστων και Συμπιεστών Ρευστών”, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2000.
- [5] Cengel, Y. A., and Boles, M. A., “Θερμοδυναμική για Μηχανικούς”, 3<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, pp 1169-1220, 1998.
- [6] Baehr, H., “Θερμοδυναμική Εισαγωγή στα Θεμελιώδη και στις Τεχνικές Εφαρμογές”, 3<sup>rd</sup> Edition, Springer-Verlag New York Heidelberg, Berlin.
- [7] Biran, A., and Breiner, M., “Matlab 6 for Engineers”, 3<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2002.
- [8] Παπαδάκης, Κ., “Εισαγωγή στο Mathematica”, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2003.
- [9] Billmann, L., and Isermann, R., “Leak Detection Methods for Pipelines”, Automatica, Vol. 23, No. 3, pp 381-385, 1987.
- [10] Verde, C., “Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines”, Control Engineering Practice 9, 673-682, 2001.



- [11] Fukushima, K., Maeshima, R., Kinoshita, A., Shiraishi, H., and Koshijima, I., “Gas pipeline leak detection system using the online simulation method”, *Computers and Chemical Engineering* 24, 453-456, 2000.
- [12] Mc Cabe, W., Smith, J., and Harriott, P., “Βασικές Φυσικές Διεργασίες Μηχανικής”, 6<sup>η</sup> Έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2001.
- [13] Gerhart, P., Gross, R., and Hochstein, J., “Fundamentals of Mechanics”, 2<sup>nd</sup> Edition, Addison-Wesley Publishing.
- [14] Παπανίκας, Δ., “Τεχνολογία Φυσικού Αερίου”, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2000.
- [15] Ακρίβης, Γ., και Δουγαλής, Β., “Εισαγωγή στην αριθμητική ανάλυση”, 4<sup>η</sup> Έκδοση, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2002.
- [16] Καραπάνος, Χ., “Τεχνολογία Φυσικού Αερίου”, Εκδόσεις Ιων, Αθήνα, 2000.





# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Α. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΤΩΣΗΣ  
ΠΙΕΣΗΣ ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗ ΖΗΤΗΣΗ

Β. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΤΩΣΗΣ  
ΠΙΕΣΗΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΖΗΤΗΣΗΣ

Γ. ΠΙΝΑΚΕΣ C

Δ. ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ ΠΟΥ  
ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟ ΚΕΙΜΕΝΟ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

## 1% ΣΤΑΘΕΡΗ ΖΗΤΗΣΗ

## ΚΥΡΙΟΣ ΑΓΩΓΟΣ

	2	3	4	5	20	21	22	23
2	0,0068%	0,0051%	0,0034%	0,0034%	0,0017%	0,0017%	0,0017%	0,0017%
3	0,0019%	0,0058%	0,0039%	0,0019%	0,0019%	0,0019%	0,0019%	0,0000%
4	0,0000%	0,0014%	0,0056%	0,0028%	0,0028%	0,0028%	0,0014%	0,0028%
5	0,0012%	0,0012%	0,0024%	0,0036%	0,0036%	0,0024%	0,0036%	0,0024%
20	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0059%	0,0117%	0,0117%	0,0059%	0,0059%
21	0,0000%	0,0056%	0,0056%	0,0000%	0,0056%	0,0113%	0,0113%	0,0056%
22	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0068%	0,0000%	0,0068%	0,0136%	0,0136%
23	0,0052%	0,0052%	0,0052%	0,0052%	0,0052%	0,0052%	0,0104%	0,0052%

## ΠΑΝΩ ΔΙΚΤΥΟ

	7	8	10	11	12	13	14	15	17	18	19
7	0,0244%	0,0133%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
8	0,0052%	0,0173%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
10	0,0000%	0,0000%	2,3490%	2,0134%	1,3423%	1,3423%	1,6779%	1,6779%	2,3490%	2,3490%	2,3490%
11	0,0000%	0,0000%	0,0000%	15,3226%	7,2581%	6,4516%	4,8387%	4,8387%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
12	0,0000%	0,0000%	0,4601%	1,8405%	6,2883%	5,5215%	4,7546%	3,8344%	0,0000%	0,3067%	0,3067%
13	0,0000%	0,0000%	0,2193%	0,2193%	1,3158%	13,1579%	8,3333%	3,7281%	0,4386%	0,0000%	0,0000%
14	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,2188%	1,3129%	6,1269%	8,0963%	3,5011%	0,2188%	0,0000%	0,0000%
15	0,0000%	0,0000%	0,2193%	0,0000%	1,0965%	5,7018%	10,3070%	3,7281%	0,6579%	0,2193%	0,2193%
17	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,1100%	0,2200%	0,2750%	0,3300%	3,6304%	0,1100%	0,0550%
18	0,0000%	0,0000%	0,9615%	0,9615%	0,9615%	0,9615%	0,9615%	0,9615%	4,8077%	4,8077%	0,0000%
19	0,0000%	0,0000%	0,9524%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	2,8571%	3,8095%	3,8095%

## ΚΑΤΩ ΔΙΚΤΥΟ

	25	26	28	29	30	31	32	34
25	0,0244%	0,0133%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
26	0,0052%	0,0173%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
28	0,0000%	0,0000%	2,7483%	2,5674%	2,3951%	2,2142%	2,3951%	0,9046%
29	0,0000%	0,0000%	0,9448%	5,3207%	2,4366%	2,2377%	2,3869%	0,9448%
30	0,0000%	0,0000%	0,9906%	3,8138%	2,4269%	2,2288%	2,4269%	0,8915%
31	0,0000%	0,0000%	0,9877%	1,1358%	1,3333%	4,9383%	1,2840%	0,9383%
32	0,0000%	0,0000%	0,9677%	0,7444%	2,3821%	2,2333%	2,4069%	0,9181%
34	0,0000%	0,0000%	1,2019%	1,4099%	1,6179%	1,8260%	1,6179%	3,3399%

2% ΣΤΑΘΕΡΗ ΖΗΤΗΣΗ

ΚΥΡΙΟΣ ΑΓΓΟΣ

	2	3	4	5	20	21	22	23
2	0,0136%	0,0102%	0,0085%	0,0051%	0,0051%	0,0034%	0,0034%	0,0034%
3	0,0039%	0,0116%	0,0077%	0,0039%	0,0039%	0,0039%	0,0039%	0,0019%
4	0,0014%	0,0028%	0,0099%	0,0071%	0,0056%	0,0056%	0,0042%	0,0042%
5	0,0012%	0,0024%	0,0049%	0,0073%	0,0061%	0,0061%	0,0049%	0,0036%
20	0,0000%	0,0059%	0,0059%	0,0059%	0,0235%	0,0176%	0,0176%	0,0176%
21	0,0056%	0,0056%	0,0056%	0,0113%	0,0056%	0,0225%	0,0225%	0,0169%
22	0,0000%	0,0000%	0,0068%	0,0068%	0,0068%	0,0068%	0,0204%	0,0204%
23	0,0000%	0,0052%	0,0052%	0,0052%	0,0156%	0,0156%	0,0156%	0,0156%

ΠΑΝΩ ΔΙΚΤΥΟ

	7	8	10	11	12	13	14	15	17	18	19
7	0,0488%	0,0244%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
8	0,0104%	0,0364%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
10	0,0000%	0,0000%	4,6980%	4,3624%	2,6846%	3,0201%	3,3557%	3,3557%	4,3624%	4,6980%	4,6980%
11	0,0000%	0,0000%	0,8065%	29,8387%	13,7097%	12,0968%	9,6774%	8,8710%	0,8065%	0,0000%	0,0000%
12	0,0000%	0,0000%	0,6135%	3,6810%	12,8834%	11,1963%	9,5092%	7,9755%	0,1534%	0,7669%	0,7669%
13	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,4386%	2,4123%	26,5351%	16,6667%	7,2368%	0,6579%	0,2193%	0,2193%
14	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,4376%	2,8446%	12,0350%	16,1926%	7,2210%	0,6565%	0,2188%	0,0000%
15	0,0000%	0,0000%	0,4386%	0,2193%	2,4123%	11,8421%	20,1754%	7,4561%	1,0965%	0,2193%	0,4386%
17	0,0000%	0,0000%	0,0550%	0,0550%	0,2750%	0,4400%	0,6051%	0,7151%	7,4257%	0,1100%	0,1100%
18	0,0000%	0,0000%	0,9615%	0,0000%	0,9615%	0,9615%	0,9615%	0,9615%	7,6923%	8,6538%	0,9615%
19	0,0000%	0,0000%	0,9524%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,9524%	7,6190%	7,6190%	7,6190%

ΚΑΤΩ ΔΙΚΤΥΟ

	25	26	28	29	30	31	32	34
25	0,0488%	0,0244%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
26	0,0104%	0,0364%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
28	0,0000%	0,0000%	5,5311%	5,1693%	4,8074%	4,4456%	4,8074%	1,8265%
29	0,0000%	0,0000%	1,9393%	10,5917%	4,9727%	4,5251%	4,8732%	1,8399%
30	0,0000%	0,0000%	1,9812%	7,5285%	4,9034%	4,5072%	4,8044%	1,8326%
31	0,0000%	0,0000%	1,9259%	2,3210%	2,6667%	9,8765%	2,5679%	1,8765%
32	0,0000%	0,0000%	1,9603%	1,4640%	4,8139%	4,4913%	4,8883%	1,8362%
34	0,0000%	0,0000%	2,4269%	2,8429%	3,2590%	3,6750%	3,2590%	6,7144%

5% ΣΤΑΘΕΡΗ ΖΗΤΗΣΗ

ΚΥΡΙΟΣ ΑΓΩΓΟΣ

	2	3	4	5	20	21	22	23
2	0,0324%	0,0256%	0,0188%	0,0119%	0,0102%	0,0102%	0,0085%	0,0068%
3	0,0058%	0,0289%	0,0212%	0,0135%	0,0116%	0,0077%	0,0077%	0,0077%
4	0,0028%	0,0071%	0,0240%	0,0141%	0,0141%	0,0127%	0,0113%	0,0085%
5	0,0036%	0,0073%	0,0121%	0,0194%	0,0158%	0,0146%	0,0121%	0,0109%
20	0,0059%	0,0059%	0,0117%	0,0176%	0,0645%	0,0528%	0,0528%	0,0411%
21	0,0056%	0,0113%	0,0113%	0,0225%	0,0225%	0,0563%	0,0451%	0,0394%
22	0,0068%	0,0068%	0,0136%	0,0136%	0,0204%	0,0272%	0,0612%	0,0476%
23	0,0052%	0,0104%	0,0156%	0,0208%	0,0260%	0,0260%	0,0364%	0,0468%

ΠΑΝΩ ΔΙΚΤΥΟ

	7	8	10	11	12	13	14	15	17	18	19
7	0,1221%	0,0622%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
8	0,0260%	0,0884%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
10	0,0000%	0,0000%	11,7450%	11,0738%	7,0470%	7,7181%	8,3893%	8,7248%	11,4094%	11,7450%	11,7450%
11	0,0000%	0,0000%	0,8065%	79,8387%	34,6774%	29,0323%	25,0000%	20,9677%	0,8065%	0,8065%	0,8065%
12	0,0000%	0,0000%	1,8405%	9,8160%	33,4356%	28,5276%	24,2331%	20,5521%	0,3067%	1,5337%	1,6871%
13	0,0000%	0,0000%	0,4386%	0,8772%	6,5789%	69,7368%	41,0088%	18,8596%	1,9737%	0,4386%	0,4386%
14	0,0000%	0,0000%	0,2188%	1,0941%	6,7834%	30,6346%	40,9190%	18,5996%	1,9694%	0,4376%	0,2188%
15	0,0000%	0,0000%	0,4386%	0,6579%	6,5789%	30,2632%	48,0263%	19,0789%	2,1930%	0,6579%	0,6579%
17	0,0000%	0,0000%	0,0550%	0,1100%	0,7701%	1,1551%	1,4851%	1,8702%	18,9769%	0,2200%	0,1100%
18	0,0000%	0,0000%	0,9615%	0,9615%	0,9615%	1,9231%	2,8846%	2,8846%	20,1923%	21,1538%	0,0000%
19	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,9524%	0,9524%	0,9524%	0,9524%	1,9048%	19,0476%	20,9524%	20,9524%

ΚΑΤΩ ΔΙΚΤΥΟ

	25	26	28	29	30	31	32	34
25	0,1221%	0,0622%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
26	0,0260%	0,0884%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
28	0,0000%	0,0000%	14,0691%	13,1042%	12,2082%	11,2691%	12,2082%	4,6782%
29	0,0000%	0,0000%	4,8732%	27,1009%	12,8294%	11,4868%	12,1333%	4,7737%
30	0,0000%	0,0000%	4,9529%	18,6726%	12,8281%	11,5404%	12,0852%	4,7053%
31	0,0000%	0,0000%	4,9383%	5,8765%	6,9630%	24,9383%	6,2716%	4,7901%
32	0,0000%	0,0000%	4,9132%	3,9206%	12,0099%	11,3151%	12,5310%	4,7395%
34	0,0000%	0,0000%	6,2059%	7,2807%	8,2861%	9,3609%	8,2861%	17,1270%



10% ΣΤΑΘΕΡΗ ΖΗΤΗΣΗ

ΚΥΡΙΩΣ ΑΓΩΓΟΣ

	2	3	4	5	20	21	22	23
2	0,0648%	0,0529%	0,0375%	0,0239%	0,0205%	0,0188%	0,0171%	0,0136%
3	0,0096%	0,0578%	0,0424%	0,0251%	0,0231%	0,0193%	0,0174%	0,0154%
4	0,0071%	0,0155%	0,0480%	0,0311%	0,0268%	0,0240%	0,0198%	0,0169%
5	0,0085%	0,0146%	0,0231%	0,0364%	0,0340%	0,0291%	0,0267%	0,0218%
20	0,0117%	0,0176%	0,0293%	0,0352%	0,1232%	0,1056%	0,0938%	0,0821%
21	0,0113%	0,0169%	0,0282%	0,0338%	0,0451%	0,1127%	0,1014%	0,0789%
22	0,0068%	0,0204%	0,0272%	0,0340%	0,0476%	0,0544%	0,1088%	0,0952%
23	0,0104%	0,0156%	0,0260%	0,0416%	0,0468%	0,0571%	0,0675%	0,0935%

ΠΑΝΩ ΔΙΚΤΥΟ

	7	8	10	11	12	13	14	15	17	18	19
7	0,2442%	0,1243%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
8	0,0520%	0,1785%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
10	0,0000%	0,0000%	24,4966%	22,1477%	14,7651%	16,1074%	17,1141%	18,1208%	23,8255%	24,1611%	24,4966%
11	0,0000%	0,0000%	3,2258%	180,6452%	70,9677%	59,6774%	50,8065%	43,5484%	0,8065%	2,4194%	3,2258%
12	0,0000%	0,0000%	3,6810%	21,3190%	70,5521%	58,5890%	49,3865%	42,6380%	0,6135%	3,2209%	3,3742%
13	0,0000%	0,0000%	0,8772%	2,1930%	13,5965%	145,3947%	80,4825%	39,0351%	4,3860%	1,0965%	0,8772%
14	0,0000%	0,0000%	0,4376%	2,1882%	13,7856%	60,1751%	80,0875%	38,9497%	4,1575%	1,0941%	0,8753%
15	0,0000%	0,0000%	0,8772%	1,9737%	13,5965%	60,3070%	83,3333%	39,2544%	4,3860%	1,3158%	1,0965%
17	0,0000%	0,0000%	0,1100%	0,2750%	1,5952%	2,5303%	3,3003%	3,9054%	39,6040%	0,4400%	0,2750%
18	0,0000%	0,0000%	0,9615%	0,9615%	2,8846%	2,8846%	3,8462%	4,8077%	40,3846%	44,2308%	0,0000%
19	0,0000%	0,0000%	0,9524%	0,0000%	0,9524%	2,8571%	3,8095%	3,8095%	39,0476%	42,8571%	42,8571%

ΚΑΤΩ ΔΙΚΤΥΟ

	25	26	28	29	30	31	32	34
25	0,2442%	0,1243%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
26	0,0520%	0,1785%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
28	0,0000%	0,0000%	28,9050%	26,8114%	25,0194%	23,0292%	25,0194%	9,7441%
29	0,0000%	0,0000%	9,8458%	55,8926%	27,1507%	23,7195%	24,4157%	9,8458%
30	0,0000%	0,0000%	9,9059%	36,5032%	27,1917%	23,7741%	24,4676%	9,8564%
31	0,0000%	0,0000%	9,9259%	12,0988%	14,7160%	50,6667%	12,0000%	9,9753%
32	0,0000%	0,0000%	9,8759%	8,6104%	24,1191%	23,0769%	26,0298%	9,8511%
34	0,0000%	0,0000%	12,8279%	15,0930%	17,0692%	19,2997%	17,0692%	35,3288%

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β  
1% ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΖΗΤΗΣΗΣ  
ΚΥΡΙΩΣ ΑΓΩΓΟΣ

	2	3	4	5	20	21	22	23
2	0,0051%	0,0034%	0,0034%	0,0017%	0,0017%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
3	0,0019%	0,0039%	0,0019%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
4	0,0028%	0,0028%	0,0028%	0,0014%	0,0000%	0,0014%	0,0000%	0,0000%
5	0,0024%	0,0036%	0,0036%	0,0024%	0,0024%	0,0012%	0,0000%	0,0000%
20	0,0117%	0,0059%	0,0117%	0,0176%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
21	0,0113%	0,0113%	0,0169%	0,0113%	0,0113%	0,0056%	0,0000%	0,0000%
22	0,0068%	0,0136%	0,0068%	0,0136%	0,0136%	0,0136%	0,0068%	0,0000%
23	0,0104%	0,0104%	0,0156%	0,0104%	0,0156%	0,0208%	0,0156%	0,0000%

ΠΑΝΩ ΔΙΚΤΥΟ

	7	8	10	11	12	13	14	15	17	18	19
7	0,0244%	0,0133%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
8	0,0052%	0,0173%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
10	2,0134%	2,0134%	0,3356%	0,0000%	0,6711%	0,6711%	0,3356%	0,3356%	0,3356%	0,3356%	0,3356%
11	1,6129%	1,6129%	2,4194%	12,9032%	4,8387%	4,0323%	3,2258%	2,4194%	1,6129%	2,4194%	2,4194%
12	1,9939%	1,9939%	2,3006%	3,8344%	4,2945%	3,5276%	2,6074%	1,9939%	1,9939%	2,3006%	2,3006%
13	1,9737%	1,9737%	1,9737%	2,1930%	3,2895%	10,9649%	6,1404%	1,5351%	1,5351%	1,7544%	1,7544%
14	2,1882%	2,1882%	1,9694%	2,1882%	3,2823%	7,8775%	6,1269%	1,5317%	1,7505%	2,1882%	2,1882%
15	1,7544%	1,7544%	1,7544%	1,9737%	3,0702%	7,8947%	12,0614%	1,7544%	1,5351%	1,5351%	1,7544%
17	2,0352%	2,0352%	2,0352%	2,0352%	1,8702%	1,8152%	1,7602%	1,6502%	1,5952%	2,0352%	2,0352%
18	1,9231%	1,9231%	0,9615%	0,9615%	0,9615%	0,9615%	0,9615%	0,9615%	2,8846%	1,9231%	1,9231%
19	1,9048%	1,9048%	2,8571%	1,9048%	1,9048%	1,9048%	1,9048%	1,9048%	0,9524%	1,9048%	1,9048%

ΚΑΤΩ ΔΙΚΤΥΟ

	25	26	28	29	30	31	32	34
25	0,0244%	0,0133%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
26	0,0052%	0,0173%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
28	2,0160%	2,0160%	0,7065%	0,5255%	0,3532%	0,1723%	0,3532%	1,1200%
29	2,0388%	2,0388%	2,9836%	3,1825%	0,3978%	0,1989%	0,3481%	1,0940%
30	2,0802%	2,0802%	3,0213%	5,7949%	0,3467%	0,1486%	0,3467%	1,1887%
31	1,9753%	1,9753%	3,0123%	3,1605%	3,3580%	2,8642%	3,3580%	1,0864%
32	2,0596%	2,0596%	3,0025%	1,3151%	0,3226%	0,1737%	0,3474%	1,1414%
34	2,0109%	2,0109%	0,8205%	0,6125%	0,4160%	0,2080%	0,4160%	1,2943%



2% ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΖΗΤΗΣΗΣ

ΚΥΡΙΩΣ ΑΓΩΓΟΣ

	2	3	4	5	20	21	22	23
2	0,0102%	0,0085%	0,0051%	0,0017%	0,0017%	0,0017%	0,0000%	0,0000%
3	0,0058%	0,0077%	0,0039%	0,0019%	0,0019%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
4	0,0042%	0,0071%	0,0071%	0,0028%	0,0014%	0,0014%	0,0014%	0,0000%
5	0,0061%	0,0061%	0,0085%	0,0036%	0,0024%	0,0012%	0,0012%	0,0000%
20	0,0176%	0,0235%	0,0235%	0,0235%	0,0117%	0,0059%	0,0000%	0,0000%
21	0,0169%	0,0225%	0,0225%	0,0282%	0,0282%	0,0056%	0,0056%	0,0000%
22	0,0204%	0,0204%	0,0204%	0,0204%	0,0272%	0,0272%	0,0000%	0,0000%
23	0,0260%	0,0208%	0,0260%	0,0260%	0,0312%	0,0312%	0,0312%	0,0000%

ΠΑΝΩ ΔΙΚΤΥΟ

	7	8	10	11	12	13	14	15	17	18	19
7	0,0488%	0,0244%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
8	0,0104%	0,0364%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
10	4,0268%	4,0268%	0,6711%	0,3356%	1,3423%	1,0067%	0,6711%	0,6711%	0,3356%	0,6711%	0,6711%
11	3,2258%	3,2258%	4,0323%	25,0000%	9,6774%	7,2581%	5,6452%	4,8387%	3,2258%	4,0323%	4,0323%
12	3,9877%	3,9877%	4,7546%	7,5153%	8,7423%	7,0552%	5,3681%	3,8344%	3,8344%	4,6012%	4,7546%
13	3,9474%	3,9474%	3,7281%	4,3860%	6,5789%	22,1491%	12,2807%	3,2895%	3,2895%	3,7281%	3,7281%
14	4,1575%	4,1575%	3,9387%	4,3764%	6,5646%	15,7549%	12,0350%	3,0635%	3,2823%	3,9387%	3,9387%
15	3,9474%	3,9474%	3,7281%	4,1667%	6,3596%	15,5702%	23,9035%	3,2895%	3,0702%	3,7281%	3,5088%
17	3,9604%	3,9604%	4,0154%	3,9604%	3,6854%	3,5754%	3,4103%	3,3003%	3,3003%	4,0704%	4,0154%
18	3,8462%	3,8462%	2,8846%	2,8846%	2,8846%	2,8846%	2,8846%	2,8846%	3,8462%	3,8462%	3,8462%
19	3,8095%	3,8095%	4,7619%	4,7619%	3,8095%	3,8095%	3,8095%	2,8571%	3,8095%	3,8095%	3,8095%

ΚΑΤΩ ΔΙΚΤΥΟ

	25	26	28	29	30	31	32	34
25	0,0488%	0,0244%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
26	0,0104%	0,0364%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
28	4,0148%	4,0148%	1,4129%	1,0511%	0,6979%	0,3446%	0,6979%	2,2228%
29	4,0278%	4,0278%	5,9672%	6,3650%	0,7956%	0,3978%	0,6962%	2,2377%
30	4,0614%	4,0614%	5,9931%	11,4908%	0,7925%	0,2972%	0,6439%	2,2784%
31	4,0494%	4,0494%	5,9753%	6,3210%	6,7160%	5,6296%	6,5679%	2,2222%
32	4,0447%	4,0447%	5,9801%	2,6055%	0,6452%	0,3226%	0,7444%	2,2581%
34	3,9986%	3,9986%	1,6179%	1,2135%	0,8090%	0,4045%	0,8090%	2,5887%

5% ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΖΗΤΗΣΗΣ

ΚΥΡΙΟΣ ΑΓΩΓΟΣ

	2	3	4	5	20	21	22	23
2	0,0256%	0,0188%	0,0119%	0,0051%	0,0034%	0,0034%	0,0017%	0,0000%
3	0,0116%	0,0212%	0,0135%	0,0058%	0,0039%	0,0019%	0,0000%	0,0000%
4	0,0127%	0,0155%	0,0155%	0,0056%	0,0056%	0,0028%	0,0028%	0,0000%
5	0,0146%	0,0182%	0,0218%	0,0085%	0,0061%	0,0036%	0,0024%	0,0000%
20	0,0469%	0,0469%	0,0587%	0,0587%	0,0176%	0,0117%	0,0059%	0,0000%
21	0,0507%	0,0507%	0,0563%	0,0620%	0,0620%	0,0169%	0,0056%	0,0000%
22	0,0476%	0,0544%	0,0544%	0,0612%	0,0680%	0,0748%	0,0136%	0,0000%
23	0,0520%	0,0571%	0,0623%	0,0675%	0,0727%	0,0727%	0,0831%	0,0000%

ΠΑΝΩ ΔΙΚΤΥΟ

	7	8	10	11	12	13	14	15	17	18	19
7	0,1221%	0,0622%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
8	0,0260%	0,0884%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
10	9,7315%	9,7315%	1,6779%	0,6711%	3,0201%	2,3490%	1,6779%	1,3423%	1,3423%	1,3423%	1,3423%
11	9,6774%	9,6774%	11,2903%	66,9355%	22,5806%	17,7419%	13,7097%	10,4839%	9,6774%	10,4839%	10,4839%
12	9,8160%	9,8160%	11,5031%	19,1718%	22,2393%	17,4847%	13,1902%	9,8160%	9,3558%	11,1963%	11,3497%
13	9,6491%	9,6491%	9,4298%	10,5263%	16,2281%	56,3596%	29,3860%	7,8947%	7,8947%	9,2105%	9,4298%
14	9,8468%	9,8468%	9,4092%	10,7221%	16,1926%	38,7309%	29,1028%	8,0963%	7,8775%	9,4092%	9,4092%
15	9,6491%	9,6491%	9,4298%	10,5263%	15,7895%	38,5965%	55,2632%	8,1140%	7,6754%	9,2105%	9,2105%
17	9,7910%	9,7910%	9,7910%	9,6810%	9,0759%	8,6359%	8,3058%	8,0308%	8,3058%	10,0110%	9,9010%
18	8,6538%	8,6538%	9,6154%	9,6154%	8,6538%	8,6538%	7,6923%	6,7308%	9,6154%	10,5769%	9,6154%
19	10,4762%	10,4762%	10,4762%	9,5238%	8,5714%	8,5714%	8,5714%	8,5714%	7,6190%	10,4762%	10,4762%

ΚΑΤΩ ΔΙΚΤΥΟ

	25	26	28	29	30	31	32	34
25	0,1221%	0,0622%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
26	0,0260%	0,0884%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
28	9,8647%	9,8647%	3,4807%	2,5674%	1,7145%	0,8185%	1,7145%	5,4191%
29	9,9453%	9,9453%	14,5699%	15,7136%	2,2377%	0,9945%	1,5415%	5,4699%
30	10,0050%	10,0050%	14,7103%	27,6374%	2,1793%	0,8915%	1,4364%	5,4978%
31	9,9753%	9,9753%	14,6667%	15,6543%	16,6420%	13,6296%	15,9506%	5,4815%
32	9,9752%	9,9752%	14,6402%	6,2531%	1,4144%	0,7692%	1,9107%	5,4839%
34	9,8347%	9,8347%	3,9408%	2,9238%	1,9646%	0,9476%	1,9646%	6,4371%

10% ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΖΗΤΗΣΗΣ

ΚΥΡΙΟΣ ΑΓΩΓΟΣ

	2	3	4	5	20	21	22	23
2	0,0512%	0,0392%	0,0239%	0,0102%	0,0068%	0,0051%	0,0034%	0,0000%
3	0,0251%	0,0424%	0,0270%	0,0096%	0,0077%	0,0039%	0,0019%	0,0000%
4	0,0240%	0,0325%	0,0311%	0,0141%	0,0099%	0,0071%	0,0028%	0,0000%
5	0,0303%	0,0364%	0,0449%	0,0158%	0,0121%	0,0073%	0,0049%	0,0000%
20	0,0880%	0,0997%	0,1056%	0,1173%	0,0411%	0,0293%	0,0117%	0,0000%
21	0,0958%	0,1014%	0,1127%	0,1239%	0,1296%	0,0282%	0,0169%	0,0000%
22	0,1020%	0,1088%	0,1224%	0,1224%	0,1360%	0,1495%	0,0204%	0,0000%
23	0,1039%	0,1091%	0,1195%	0,1351%	0,1403%	0,1507%	0,1610%	0,0000%

ΠΑΝΩ ΔΙΚΤΥΟ

	7	8	10	11	12	13	14	15	17	18	19
7	0,2442%	0,1243%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
8	0,0520%	0,1785%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
10	19,1275%	19,1275%	3,0201%	1,0067%	5,7047%	4,3624%	3,3557%	2,6846%	2,3490%	3,0201%	3,0201%
11	18,5484%	18,5484%	21,7742%	146,7742%	45,9677%	34,6774%	26,6129%	20,1613%	17,7419%	21,7742%	21,7742%
12	19,0184%	19,0184%	22,2393%	38,3436%	45,0920%	33,8957%	25,6135%	19,7853%	18,4049%	21,7791%	22,0859%
13	19,0789%	19,0789%	18,4211%	21,0526%	31,3596%	112,5000%	52,6316%	16,4474%	15,1316%	17,9825%	18,2018%
14	19,0372%	19,0372%	18,3807%	21,2254%	31,5098%	72,6477%	52,5164%	16,1926%	15,3173%	18,1619%	18,1619%
15	18,8596%	18,8596%	18,4211%	20,8333%	31,3596%	72,8070%	91,2281%	16,4474%	14,9123%	17,9825%	18,2018%
17	19,0869%	19,0869%	19,1419%	18,8669%	17,5468%	16,7217%	16,0066%	15,4565%	16,8867%	19,4719%	19,3069%
18	18,2692%	18,2692%	18,2692%	18,2692%	17,3077%	15,3846%	15,3846%	15,3846%	17,3077%	21,1538%	18,2692%
19	19,0476%	19,0476%	19,0476%	18,0952%	17,1429%	17,1429%	16,1905%	15,2381%	17,1429%	20,0000%	20,0000%

ΚΑΤΩ ΔΙΚΤΥΟ

	25	26	28	29	30	31	32	34
25	0,2442%	0,1243%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
26	0,0520%	0,1785%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
28	19,2039%	19,2039%	6,8149%	4,9108%	3,3083%	1,5077%	3,3083%	10,4075%
29	19,3436%	19,3436%	28,2447%	30,8802%	5,1218%	1,9393%	2,4863%	10,4426%
30	19,4156%	19,4156%	28,3804%	51,9564%	5,1015%	1,8821%	2,3774%	10,5498%
31	19,4074%	19,4074%	28,3951%	30,4691%	32,8395%	25,7778%	30,1728%	10,5185%
32	19,3797%	19,3797%	28,3127%	11,6377%	2,1092%	1,2655%	4,0199%	10,4963%
34	19,1494%	19,1494%	7,5696%	5,5125%	3,7559%	1,7335%	3,7559%	12,7124%







{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.9524, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 2.8571, 3.8095, 3.8095, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0059, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0117, 0.0117, 0.0059, 0.0059, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000},  
{0.0000, 0.0056, 0.0056, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0056, 0.0113, 0.0113, 0.0056, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0068, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0068, 0.0136, 0.0136, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000},  
{0.0052, 0.0052, 0.0052, 0.0052, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0052, 0.0052, 0.0104, 0.0052, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0244, 0.0133, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0052, 0.0173, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 2.7483,  
2.5674, 2.3951, 2.2142, 2.3951, 0.9046},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.9448,  
5.3207, 2.4366, 2.2377, 2.3869, 0.9448},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.9906,  
3.8138, 2.4269, 2.2288, 2.4269, 0.8915},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.9877,  
1.1358, 1.3333, 4.9383, 1.2840, 0.9383},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.9677,  
0.7444, 2.3821, 2.2333, 2.4069, 0.9181},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,  
0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 1.2019,  
1.4099, 1.6179, 1.8260, 1.6179, 3.3399}};



## C(1%) ΜΕΤΑΒΟΛΗ

[illegible]



{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 1.9048, 1.9048, 2.8571, 1.9048, 1.9048, 1.9048, 1.9048, 1.9048, 0.9524, 1.9048, 1.9048, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000},  
{0.0117, 0.0059, 0.0117, 0.0176, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000},  
{0.0113, 0.0113, 0.0169, 0.0113, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000},  
{0.0068, 0.0136, 0.0068, 0.0136, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0136, 0.0136, 0.0068, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000},  
{0.0104, 0.0104, 0.0156, 0.0104, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0156, 0.0208, 0.0156, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0244, 0.0133, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000},  
{0.0000, 0.0000},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0052, 0.0173, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 2.0160, 2.0160, 0.7065, 0.5255, 0.3532, 0.1723, 0.3532, 1.1200},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 2.0388, 2.0388, 2.9836, 3.1825, 0.3978, 0.1989, 0.3481, 1.0940},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 2.0802, 2.0802, 3.0213, 5.7949, 0.3467, 0.1486, 0.3467, 1.1887},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 1.9753, 1.9753, 3.0123, 3.1605, 3.3580, 2.8642, 3.3580, 1.0864},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 2.0596, 2.0596, 3.0025, 1.3151, 0.3226, 0.1737, 0.3474, 1.1414},  
{0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 2.0109, 2.0109, 0.8205, 0.6125, 0.4160, 0.2080, 0.4160, 1.2943}};



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΣΗΜΑΣΙΑ
Re	Αριθμός Reynolds
u	Τοπική ταχύτητα ρευστού
l	Μήκος αγωγού
v	Κινηματικό ιξώδες
d	Εσωτερική διάμετρος αγωγού
M	Αριθμός Mach
$\alpha$	Ταχύτητα ήχου
$\rho$	Πυκνότητα
$\rho_m$	Μέση τιμή πυκνότητας στον αγωγό
A	Επιφάνεια διατομής αγωγού
$\dot{m}$	Ρυθμός ροής μάζας
Q	Ρυθμός ροής μάζας
F	Γραμμική ορμή
h	Ειδική ενθαλπία
p	Πίεση
$R^*$	Ειδική σταθερά αερίου
R	Σταθερά ιδανικών αερίων
MB	Μοριακό βάρος
T	Απόλυτη θερμοκρασία
$\gamma$	Λόγος ειδικών θερμοτήτων
f	Συντελεστής τριβής
e	Τραχύτητα αγωγού
$K_m$	Συντελεστής πτώσης πίεσης κάθε εξαρτήματος
W	Ισχύς συμπίεστή
g	Επιτάχυνση βαρύτητας
z	Υψομετρική διαφορά
$C_p$	Ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση
$C_v$	Ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο
$P_L$	Πτώση πίεσης λόγω τριβών
$P_m$	Πτώση πίεσης λόγω εξαρτημάτων
$P_p$	Αύξηση πίεσης λόγω συμπίεστή
D	Ζήτηση



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000089109

