



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τίτλος Εργασίας

**ΟΜΟΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ
ΣΤΟ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**



Φοιτήτρια

Όνοματεπώνυμο: Καλάνδρια Δήμητρα
Α.Μ: 04078

Επιβλέπων Καθηγητής
Σαρρής Ιωάννης

Αθήνα, Μάρτιος 2022

(ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ)



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

Title

**SIMILARITIES AND DIFFERENCES
BETWEEN ELECTRIC AND HYDRAULIC
URBAN NETWORKS**



Student

Name and Surname: Kalandria Dimitra
Registration Number: 04078

Supervisor

Sarris Ioannis, Professor

Athens, March 2022

(ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ)

**ΟΜΟΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ
ΣΤΟ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

1.	Σαρρής Ιωάννης, Καθηγητής	
2.	Τσεκούρας Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής	
3.	Ευάγγελος Σακελαρίου, Καθηγητής	

(ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ)

Copyright © - All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Καλάνδρια Δήμητρα, Μάρτιος, 2022.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη ΚΑΛΑΝΔΡΙΑ ΔΗΜΗΤΡΑ του ΜΑΡΚΟΥ, με αριθμό μητρώου 04078 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα,

Καλάνδρια Δήμητρα

(Υπογραφή)

.....

(ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι προπτυχιακές μου σπουδές στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Ιωάννη Σαρρή, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και μου ανέθεσε αυτό το ιδιαίτερος ενδιαφέρον θέμα, την υπομονή του, και την προθυμία του για άμεση ανταπόκριση σε ερωτήματα όπου προέκυπταν, τη συμπαράστασή του και την επιμονή του για την περάτωση της εργασίας αυτής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος, τον κύριο Τσεκούρα Γεώργιο, επίκουρο καθηγητή, για την πολύτιμη βοήθειά του και την επιστημονική του καθοδήγηση στα ηλεκτρολογικά τμήματα που περιείχε η διπλωματική, για το πλούσιο βιβλιογραφικό υλικό που μου διέθεσε, καθώς επίσης και για την αμέριστη υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής της διπλωματικής.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά όλα τα μέλη εξεταστικής επιτροπής, που δέχτηκαν να με εξετάσουν τη διπλωματική μου εργασία.

Ακόμη ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στη συμφοιτήριά μου και φίλη μου Παναγιώτα Δεληγιάννη καθώς επίσης και τον Τράϊκο Ιωάννη για τη διαρκή στήριξη και βοήθεια που μου προσέφεραν απλόχερα κατά τη συγγραφή της διπλωματικής μου.

Τέλος, θα πρέπει να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου, τόσο για την υπομονή που επέδειξαν, όσο και για την ηθική υποστήριξη που μου παρείχαν, καθώς επίσης και την οικονομική τους στήριξη, όχι μόνο κατά τη διάρκεια συγγραφής της διπλωματικής εργασίας, αλλά καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, δίνοντάς μου τη δυνατότητα να τις ολοκληρώσω με επιτυχία.

(ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε ένα αστικό περιβάλλον είναι βασική η εξασφάλιση ηλεκτρικής ενέργειας και καθαρού νερού σε όλο το σύνολο της περιοχής. Τόσο η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, όσο και η ζήτηση νερού έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Σε αυτό έχει συντελέσει η ραγδαία αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού καθώς και η ανάπτυξη του βιοτικού επιπέδου σε αρκετές χώρες, η οποία έχει δημιουργήσει νέες ανάγκες. Η κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται μέσω των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, και ιδιαίτερα του Δικτύου Διανομής, το οποίο τροφοδοτεί το σύνολο των καταναλωτών των πόλεων και της υπαίθρου. Αντίστοιχα, ανάγκες για νερό ικανοποιούνται από τα Δίκτυα Ύδρευσης, τα οποία μεταφέρουν και διανέμουν συνεχώς το νερό στους τελικούς καταναλωτές.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται κάποια γενικά στοιχεία των δικτύων ύδρευσης και ηλεκτρικών δικτύων (1^ο Κεφάλαιο). Στη συνέχεια πραγματοποιείται μία ανάπτυξη ως προς το θεωρητικό υπόβαθρο των ηλεκτρικών κυκλωμάτων (2^ο Κεφάλαιο) και της μηχανικής των ρευστών (3^ο Κεφάλαιο), μελετώντας θεμελιώδη στοιχεία, σχέσεις και νόμους. Έπειτα παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας, σχεδιασμού και διαμόρφωσης των Ηλεκτρικών Δικτύων (4^ο Κεφάλαιο) και Δικτύων Ύδρευσης (5^ο Κεφάλαιο), με απώτερο σκοπό την επίτευξη σύγκρισης και παραλληλισμού των δύο δικτύων και τον εντοπισμό τόσο των ομοιοτήτων, όσο και των διαφορών που αυτά παρουσιάζουν (6^ο Κεφάλαιο). Επίσης, πραγματοποιείται υπολογιστική προσομοίωση, μέσω του προγράμματος Matlab, ενός ακτινικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (7^ο Κεφάλαιο) και ενός ακτινικού δικτύου ύδρευσης (8^ο Κεφάλαιο). Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας (9^ο Κεφάλαιο) καταγράφονται τα γενικά συμπεράσματα της εργασίας και αναφέρονται πεδία για περαιτέρω έρευνα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Δίκτυα Κοινής Ωφέλειας, Ηλεκτροτεχνία, Μηχανική των Ρευστών, Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Δίκτυα ύδρευσης, Προσομοίωση δικτύων

ABSTRACT

In urban regions, electrical power and clean water must be provided throughout the whole area. The demand for both goods has increased significantly in recent years. This phenomenon is mainly due to the rapid growth of the human population as well as the development of living standards in several countries, resulting in the emergence of new human needs. The electricity needs are met through the Electricity Systems, and especially the Distribution Network, which supplies the total sum of the city consumers as a whole. Similarly, water needs are met by Water Supply Networks, which are in charge of the constant transportation and distribution of water to the consumers.

This diploma thesis plots some general elements of water supply and electricity networks (1st Chapter). Then, a discussion is made in the theoretical background of electrical circuits (2nd Chapter) and fluid mechanics (3rd Chapter) follows, analyzing fundamental elements, concepts and equations. Additionally, the basic aspects of Electricity Distribution Network (4th Chapter) and Water Supply Network (5th Chapter) operation, design, and configuration are presented, with the ultimate goal of achieving comparison and parallelism of the two networks, so that their similarities and the differences could be identified (6th Chapter). Also, a computer simulation is performed, through the Matlab program, of a radial electricity distribution network (7th Chapter) and a radial water supply network (8th Chapter). Finally, the last chapter of the thesis (9th Chapter) records the general conclusions of the thesis and suggests fields for further research.

KEY WORDS

Utility Networks, Electrical Engineering, Fluid Mechanics, Electricity Networks, Water Supply Networks, Network Simulation

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Αντικείμενο εργασίας.....	1
1.2 Δομή της εργασίας.....	1
1.3 Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και δίκτυα διανομής.....	2
1.4 Σύστημα και δίκτυο ύδρευσης.....	3
1.5 Προβλήματα προς επίλυση στα δίκτυα.....	5
1.5.1 Ανάπτυξη βάσεων δεδομένων.....	5
1.5.2 Στοιχεία λειτουργίας.....	5
1.5.3 Καταναλώσεις.....	6
1.5.4 Υπολογισμοί δικτύων.....	6
1.5.5 Βέλτιστη λειτουργία.....	6
1.5.6 Βέλτιστη ανάπτυξη.....	6
1.6 Περιβαλλοντική σημασία των δικτύων.....	6
1.7 Συμπεράσματα.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ.....	9
2.1 Ηλεκτρισμός και ηλεκτρικό φορτίο.....	9
2.1.1 Εισαγωγή.....	9
2.1.2 Ηλεκτρικά φορτία.....	11
2.1.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες της ύλης.....	12
2.2 Βασικές έννοιες ηλεκτροτεχνίας.....	13
2.2.1 Ηλεκτρική δύναμη Coulomb.....	13
2.2.2 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου.....	14
2.2.3 Ηλεκτρικό δυναμικό και ηλεκτρική τάση.....	18
2.2.4 Επίδραση ηλεκτροστατικού πεδίου στην ύλη.....	20
2.2.4.1 Πόλωση.....	20
2.2.4.2 Διηλεκτρική μετατόπιση.....	20
2.2.4.3 Ηλεκτρική ροή.....	21
2.2.4.4 Νόμος του Gauss στο ηλεκτρικό πεδίο.....	22
2.2.5 Το ηλεκτρικό στοιχείο του πυκνωτή.....	23
2.2.5.1 Ορισμός πυκνωτή.....	23
2.2.5.2 Χωρητικότητα πυκνωτή.....	24
2.2.5.3 Συνδεσμολογίες πυκνωτών.....	26

2.2.6	Ενέργεια και δυνάμεις ηλεκτροστατικού πεδίου.....	28
2.2.7	Ηλεκτρικό ρεύμα.....	30
2.2.7.1	Ορισμός ηλεκτρικού ρεύματος.....	30
2.2.7.2	Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος.....	31
2.2.7.3	Πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος.....	32
2.2.8	Το ηλεκτρικό στοιχείο του αντιστάτη.....	32
2.2.8.1	Αντιστάτης.....	32
2.2.8.2	Νόμος Joule.....	34
2.2.8.3	Συνδεσμολογίες αντιστατών.....	34
2.2.9	Αρχή διατήρησης φορτίου - 1 ^{ος} νόμος εντάσεων Kirchhoff.....	36
2.2.10	Αρχή διατήρησης ενέργειας - 2 ^{ος} νόμος εντάσεων Kirchhoff.....	37
2.2.11	Μαγνητικό πεδίο.....	40
2.2.11.1	Ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου – ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων.....	40
2.2.11.2	Δημιουργία μαγνητικού πεδίου.....	42
2.2.11.3	Νόμοι του μαγνητοστατικού πεδίου.....	43
2.2.12	Επίδραση μαγνητικού πεδίου στην ύλη.....	44
2.2.12.1	Μαγνήτιση υλικών.....	44
2.2.12.2	Ένταση μαγνητικού πεδίου.....	45
2.2.12.3	Μαγνητικά υλικά.....	45
2.2.12.4	Μαγνητική ροή και νόμος του Gauss.....	47
2.2.12.5	Γενικευμένη μορφή του νόμου Ampere.....	47
2.2.13	Πηνίο και αυτεπαγωγή.....	48
2.2.13.1	Νόμος της επαγωγής.....	48
2.2.13.2	Πηνίο και αυτεπαγωγή.....	51
2.2.13.3	Συνδεσμολογίες πηνίων.....	51
2.2.14	Ενέργεια μαγνητικού πεδίου.....	53
2.3	Συστηματική διατύπωση των νόμων των τάσεων και των εντάσεων.....	54
2.3.1	Ηλεκτρικό στοιχείο – συνδεδεμένη φορά τάσεως.....	54
2.3.2	Σύνοψη ηλεκτρικών στοιχείων.....	55
2.3.3	Έννοιες ηλεκτρικών δικτύων.....	55
2.3.4	Διατύπωση νόμου ρευμάτων.....	56
2.3.5	Διατύπωση νόμου τάσεων.....	57
2.4	Μόνιμη και μεταβατική κατάσταση.....	57
2.4.1	Διάκριση.....	57
2.4.2	Επίλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων σε μεταβατική κατάσταση.....	57

2.4.3	Επίλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων συνεχούς ρεύματος σε μόνιμη κατάσταση.....	57
2.4.4	Επίλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων ημιτονοειδούς εναλλασσόμενου ρεύματος σε μόνιμη κατάσταση.....	58
2.5	Ισχύς.....	60
2.5.1	Ισχύς στο συνεχές ρεύμα.....	60
2.5.2	Ισχύς στο εναλλασσόμενο ρεύμα.....	61
2.6	Συμπεράσματα.....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ.....		63
3.1	Βασικά χαρακτηριστικά ρευστών.....	63
3.1.1	Ορισμός ρευστού.....	63
3.1.2	Έννοια του ρευστού σωματιδίου και του ρευστού ως συνεχούς μέσου..	63
3.1.3	Πυκνότητα και ειδικό βάρος.....	64
3.1.4	Πίεση.....	64
3.1.5	Συμπιεστότητα – μέτρο ελαστικότητας.....	65
3.1.6	Συνεκτικότητα.....	66
3.1.7	Επιφανειακή τάση.....	67
3.1.8	Φυσικές ιδιότητες του νερού.....	68
3.2	Θεμελιώδεις νόμοι και γενικές εξισώσεις.....	69
3.2.1	Είδη δυνάμεων.....	69
3.2.2	Εντατική κατάσταση σε σημείο ρευστού που ισορροπεί.....	70
3.2.3	Ισορροπία ρευστών σε πεδίο καθολικών δυνάμεων.....	71
3.2.4	Περιγραφή της κίνησης του ρευστού.....	72
	3.2.4.1 Μέθοδοι περιγραφής.....	72
	3.2.4.2 Κινηματικός χαρακτηρισμός της ροής.....	75
3.2.5	Θεμελιώδης νόμος της αρχής διατήρησης της μάζας.....	76
3.2.6	Θεμελιώδης νόμος της ποσότητας κίνησης – 2 ^{ος} νόμος του Νεύτωνα....	77
3.2.7	Θεμελιώδες αξίωμα/ αρχή διατήρησης της ενέργειας.....	77
3.2.8	Εξίσωση συνέχειας.....	79
3.2.9	Εξισώσεις κίνησης.....	82
3.3	Μονοδιάστατη ανάλυση.....	82
3.3.1	Εισαγωγή.....	82
3.3.2	Μονοδιάστατη εξίσωση συνέχειας.....	85
3.3.3	Μονοδιάστατη εξίσωση ποσότητας κίνησης.....	88
3.3.4	Μονοδιάστατη εξίσωση ενέργειας.....	89
3.3.5	Γραμμή ενέργειας και πιεζομετρική γραμμή.....	90
3.4	Ροή σε κλειστούς αγωγούς.....	93

3.4.1	Εισαγωγή.....	93
3.4.1.1	<i>Σωληνοειδής (μονοδιάστατη) ροή.....</i>	93
3.4.1.2	<i>Ροή σε κλειστούς (υπό πίεση) αγωγούς.....</i>	94
3.4.2	Χαρακτηρισμός ροής.....	94
3.4.3	Ανάπτυξη τυρβώδους οριακού στρώματος.....	95
3.4.4	Μόνιμη ομοιόμορφη ροή σε σωλήνες.....	96
3.4.5	Συντελεστής τριβών σε τυρβώδη ροή.....	99
3.4.6	Επίλυση τυπικών προβλημάτων σε αγωγούς υπό πίεση.....	100
3.4.7	Μόνιμη ομοιόμορφη ροή.....	102
3.4.8	Σύστημα σωλήνων.....	102
3.4.9	Δεξαμενές.....	104
3.4.10	Υδροδυναμικές μηχανές.....	106
3.5	Ροή σε ανοικτούς αγωγούς.....	107
3.5.1	Εισαγωγή.....	107
3.5.2	Χαρακτηριστικά αγωγών.....	108
3.5.3	Κατηγορίες ροής αγωγών ελεύθερης επιφάνειας.....	109
3.5.4	Ταχύτητα μετάδοσης κύματος ανοικτού αγωγού.....	110
3.5.5	Μεθοδολογία ανάλυσης ροής.....	110
3.5.5.1	<i>Ειδική ενέργεια.....</i>	111
3.5.5.2	<i>Διάγραμμα παροχής.....</i>	112
3.5.5.3	<i>Εξίσωση ορμής.....</i>	113
3.5.5.4	<i>Διάγραμμα ειδικής δύναμης.....</i>	113
3.5.5.5	<i>Υπολογισμός του κρίσιμου βάθους.....</i>	114
3.5.6	Ομοιόμορφη ροή σε απλές διατομές.....	115
3.5.7	Τεχνικά στοιχεία διωρύγων ομοιόμορφης ροής.....	116
3.5.8	Εφαρμογές της θεωρίας κρίσιμου βάθους.....	116
3.5.9	Υπολογιστική διαδικασία μεταβαλλόμενης ροής.....	119
3.6	Συμπεράσματα.....	120
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....		123
4.1	Διαμόρφωση δικτύων διανομής.....	123
4.1.1	Εισαγωγή.....	123
4.1.2	Δομή δικτύων διανομής.....	123
4.1.2.1	<i>Εναέρια δίκτυα μέσης τάσης.....</i>	125
4.1.2.2	<i>Υπόγεια δίκτυα μέσης τάσης.....</i>	128
4.1.2.3	<i>Δικτυωτά δίκτυα χαμηλής τάσης.....</i>	131
4.1.2.4	<i>Υπόγεια δίκτυα χαμηλής τάσης.....</i>	133

4.1.2.5	<i>Εναέρια δίκτυα χαμηλής τάσης</i>	134
4.1.3	Υποσταθμοί υψηλής / μέσης τάσης.....	135
4.2	Ανάλυση και εκτίμηση ανάπτυξης φορτίου.....	139
4.2.1	Γενικά.....	139
4.2.2	Καμπύλες φορτίου.....	140
4.2.3	Εκτίμηση φόρτισης δικτύων χαμηλής τάσης.....	143
4.2.4	Εκτίμηση φόρτισης δικτύων μέσης τάσης.....	147
4.3	Ποιότητα εξυπηρέτησης.....	148
4.3.1	Γενικά.....	148
4.3.2	Αξιοπιστία.....	148
4.3.3	Σταθερότητα της τάσης τροφοδότησης.....	150
4.3.4	Παραμόρφωση τάσης τροφοδότησης.....	153
4.4	Ηλεκτρικοί υπολογισμοί δικτύων διανομής.....	156
4.4.1	Γενικά.....	156
4.4.2	Προσομοίωση φορτίων.....	156
4.4.3	Υπολογισμοί ροής φορτίων και τάσεων.....	158
4.4.3.1	<i>Παραδοχές</i>	158
4.4.3.2	<i>Κλασική μέθοδος ακτινικής διανομής</i>	158
4.4.3.3	<i>Μητρωειδής μέθοδος ακτινικής διανομής</i>	161
4.4.3.4	<i>Αντιστάθμιση αέργου ισχύος με πυκνωτές</i>	163
4.4.4	Υπολογισμοί απωλειών δικτύων διανομής.....	164
4.4.4.1	<i>Απώλειες γραμμών</i>	164
4.4.4.2	<i>Μείωση απωλειών με προσθήκη πυκνωτών</i>	165
4.4.5	Υπολογισμοί υπερτάσεων	166
4.4.5.1	<i>Ατμοσφαιρικές υπερτάσεις</i>	166
4.4.5.2	<i>Υπερτάσεις φυσικής συχνότητας</i>	166
4.5	Ρύθμιση τάσης δικτύων διανομής.....	167
4.5.1	Ρύθμιση τάσης.....	167
4.5.1.1	<i>Ρυθμιστές τάσης υπό φορτίο</i>	167
4.5.1.2	<i>Πυκνωτές</i>	168
4.5.2	Επιλογή θέσης εγκατάστασης.....	168
4.6	Προστασία δικτύων διανομής.....	168
4.6.1	Γενικά.....	168
4.6.2	Συμπεριφορά δικτύων διανομής υπό συνθήκες σφάλματος.....	168
4.6.3	Προστασία έναντι υπερεντάσεων	169
4.6.4	Προστασία έναντι υπερτάσεων	170

4.7	Βέλτιστη λειτουργία δικτύων διανομής.....	171
4.7.1	Γενικά.....	171
4.7.2	Έλεγχος ροής ισχύος με παράλληλους πυκνωτές.....	171
4.7.3	Βελτιστοποίηση της λειτουργίας.....	172
4.7.4	Έλεγχος της λειτουργίας – αυτόματος έλεγχος μέσω κέντρων ελέγχου...	172
4.8	Βέλτιστη ανάπτυξη δικτύων διανομής.....	174
4.8.1	Γενικά.....	174
4.8.2	Ανάλυση κόστους.....	174
4.8.3	Σχεδιασμός ανάπτυξης των δικτύων.....	175
4.9	Συμπεράσματα.....	176
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΔΙΚΤΥΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ.....		177
5.1	Διαμόρφωση δικτύων ύδρευσης.....	177
5.1.1	Εισαγωγή.....	177
5.1.2	Εξωτερικό υδραγωγείο.....	178
5.1.3	Εσωτερικό υδραγωγείο.....	179
5.2	Ανάλυση και εκτίμηση ζήτησης νερού.....	180
5.2.1	Γενικά περί υδατικών χρήσεων.....	180
5.2.2	Συνολική ζήτηση.....	181
5.2.3	Διακύμανση κατανάλωσης.....	181
5.2.4	Πρόβλεψη κατανάλωσης.....	182
5.2.5	Ειδικές μόνιμες φορτίσεις δικτύου	182
	5.2.5.1 Εισαγωγή.....	182
	5.2.5.2 Φυτά και αρδεύσεις.....	183
	5.2.5.3 Ανάγκες σε αρδευτικό νερό.....	183
	5.2.5.4 Παροχές σχεδιασμού αρδευτικών δικτύων.....	183
5.2.6	Ειδικές φορτίσεις ανάγκης δικτύου.....	184
5.3	Υδατικοί πόροι και ποιότητα υδρευτικού νερού.....	184
5.3.1	Γενικά περί υδάτινων πόρων.....	185
5.3.2	Ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού.....	185
5.3.3	Πρότυπα ποιότητας του φυσικού νερού.....	185
5.3.4	Λειτουργικές απαιτήσεις.....	186
5.3.5	Δείκτες αξιολόγησης δικτύου νερού.....	186
5.4	Υπολογισμοί δικτύων ύδρευσης.....	187
5.4.1	Ροή με ελεύθερη επιφάνεια.....	187
	5.4.1.1 Βασικές αρχές υπολογισμού ομοιόμορφης ροής.....	188

5.4.1.2	<i>Βασικές αρχές υπολογισμού μόνιμης βαθμιαίας μεταβαλλόμενης ροής.....</i>	189
5.4.2	Υπολογισμοί ροής υπό πίεση σε κλειστούς αγωγούς.....	189
5.4.2.1	<i>Απώλειες ενέργειας σε κλειστούς αγωγούς.....</i>	190
5.4.2.2	<i>Τοπικές απώλειες ενέργειας σε κλειστούς αγωγούς.....</i>	190
5.4.3	Υδραυλική ανάλυση δικτύων εσωτερικού υδραγωγείου.....	191
5.4.3.1	<i>Εισαγωγή.....</i>	191
5.4.3.2	<i>Σχέση πλήθους κόμβων, κλάδων και βρόχων δικτύου.....</i>	192
5.4.3.3	<i>Εκτίμηση φόρτισης.....</i>	192
5.4.3.4	<i>Υπολογισμοί παροχής.....</i>	194
5.4.3.5	<i>Περιορισμοί ταχύτητας και πίεσης.....</i>	194
5.4.3.6	<i>Επίλυση δικτύου.....</i>	194
5.5	Στοιχεία σχεδιασμού δικτύων ύδρευσης.....	195
5.5.1	Αγωγοί εξωτερικού υδραγωγείου	195
5.5.1.1	<i>Στοιχεία σχεδίασης ανοικτών αγωγών εξωτερικού υδραγωγείου.....</i>	195
5.5.1.2	<i>Στοιχεία σχεδίασης κλειστών αγωγών εξωτερικού υδραγωγείου.....</i>	196
5.5.2	Στοιχεία σχεδιασμού αγωγών εσωτερικού υδραγωγείου.....	196
5.5.3	Αντλίες.....	197
5.5.3.1	<i>Βασικά χαρακτηριστικά αντλιών.....</i>	197
5.5.3.2	<i>Τύποι αντλιών.....</i>	198
5.5.3.3	<i>Σύνδεση αντλίας με καταθλιπτικό αγωγό.....</i>	198
5.5.4	Δεξαμενές αποθήκευσης.....	199
5.5.5	Φρεάτια πιεζοθράυσεως.....	200
5.6	Μέθοδοι άρδευσης.....	200
5.6.1	Γενικά.....	200
5.6.2	Μέθοδοι επιφανειακής άρδευσης.....	201
5.6.3	Μέθοδοι καταιονισμού.....	201
5.6.4	Μικροάρδευση.....	202
5.6.5	Άρδευτική αποδοτικότητα.....	202
5.7	Προβλήματα δικτύων ύδρευσης.....	203
5.7.1	Γενικά.....	201
5.7.2	Αιτίες προβλημάτων.....	204
5.8	Βέλτιστη λειτουργία δικτύων ύδρευσης.....	205
5.8.1	Γενικά.....	205
5.8.2	Βελτίωση των φυσικών χαρακτηριστικών δικτύου ύδρευσης.....	205

5.8.3	Βελτίωση λειτουργίας και συντήρησης δικτύου ύδρευσης.....	205
5.9	Συμπεράσματα.....	206
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΠΑΡΑΛΛΗΛΙΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....		
6.1	Γενικά.....	207
6.2	Βασικά μεγέθη.....	207
6.2.1	Μέγεθος σθένους.....	207
6.2.2	Μέγεθος ροής.....	209
6.2.3	Μέγεθος γενικευμένης ορμής.....	209
6.2.4	Μέγεθος γενικευμένης μετατόπισης.....	209
6.2.5	Ισχύς.....	210
6.3	Βασικά στοιχεία.....	210
6.3.1	Πηγές.....	210
6.3.2	Στοιχείο γενικευμένης αντίστασης.....	211
6.3.3	Στοιχείο γενικευμένης αδράνειας.....	211
6.3.4	Στοιχείο γενικευμένης χωρητικότητας.....	213
6.2.5	Στοιχείο κατανάλωσης.....	214
6.4	Βασικοί νόμοι.....	214
6.4.1	Εξίσωση συνέχειας ροής.....	214
6.4.2	Εξίσωση συνέχειας σθένους.....	216
6.4.3	Εξίσωση συνέχειας ισχύος.....	216
6.5	Δίθυρα στοιχεία.....	218
6.5.1	Γενικά.....	218
6.5.2	Δίθυρα στοιχεία ηλεκτρικών δικτύων.....	218
6.5.3	Δίθυρα στοιχεία δικτύων ύδρευσης.....	221
6.5.4	Σωλήνες και αγωγοί.....	223
6.6	Διατάξεις ασφαλείας.....	225
6.6.1	Διατάξεις ασφαλείας ηλεκτρικών δικτύων.....	225
6.6.2	Διατάξεις ασφαλείας δικτύων ύδρευσης.....	228
6.7	Συμπεράσματα.....	230
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB.....		
7.1	Ανάπτυξη προγράμματος.....	231
7.2	Δεδομένα εκτέλεσης προγράμματος βασικού σεναρίου.....	237
7.3	Αποτελέσματα εκτέλεσης προγράμματος βασικού σεναρίου.....	238
7.4	Ανάλυση ευαισθησίας ως προς διαφορετικά επίπεδα φόρτισης.....	240
7.5	Συμπεράσματα.....	250

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB.....	251
8.1 Ανάπτυξη προγράμματος.....	251
8.2 Δεδομένα εκτέλεσης προγράμματος βασικού σεναρίου.....	257
8.3 Αποτελέσματα εκτέλεσης προγράμματος βασικού σεναρίου.....	257
8.4 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς διαφορετικά επίπεδα φόρτισης.....	259
8.5 Συμπεράσματα.....	268
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	269
9.1 Γενικά συμπεράσματα.....	269
9.2 Σύγκριση ηλεκτρικού δικτύου και δικτύου ύδρευσης.....	270
9.3 Περιοχές για περαιτέρω έρευνα.....	272
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....	275

(ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο εργασίας

Στο σύνολο ενός αστικού περιβάλλοντος, οι βασικές ανάγκες που πρέπει να εξυπηρετούνται σε βέλτιστο βαθμό είναι η ανάγκες ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και καθαρού νερού. Οι ανάγκες αυτές ικανοποιούνται αντίστοιχα από το Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας και το Δίκτυο Ύδρευσης. Τόσο η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, όσο και η ζήτηση για νερό έχουν αυξηθεί σημαντικά στην εποχή μας, λόγω απότομης αύξησης του ανθρώπινου πληθυσμού και της ανάπτυξης του βιοτικού επιπέδου σε αρκετές χώρες, η οποία έχει δημιουργήσει νέες ανάγκες. Τα δύο αυτά δίκτυα εξυπηρετούν τους ίδιους καταναλωτές, της ίδια περιοχής με παρόμοιο τρόπο και αυστηρές απαιτήσεις στον βαθμό εξυπηρέτησης. Στην παρούσα μελέτη, αρχικά αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά του Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας και του Δικτύου Ύδρευσης. Στη συνέχεια, σύμφωνα με αυτά γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των δύο δικτύων και παρουσιάζονται οι ομοιότητες κάποιων χαρακτηριστικών τους. Ακόμα, γίνεται μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας και ενός Δικτύου Ύδρευσης.

1.2 Δομή της εργασίας

Στα πλαίσια της εργασίας έχουν διαμορφωθεί τα ακόλουθα κεφάλαια:

- Κεφάλαιο 1: Πραγματοποιείται εισαγωγή στο αντικείμενο της εργασίας και γίνεται αναφορά στη σημασία των δικτύων στη ζωή των ανθρώπων.
- Κεφάλαιο 2: Παρουσιάζονται εισαγωγικά στοιχεία και ορισμοί που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά κυκλώματα.
- Κεφάλαιο 3: Παρουσιάζονται εισαγωγικά στοιχεία ρευστομηχανικής στα πλαίσια της υδραυλικής ανάλυσης.
- Κεφάλαιο 4: Παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα περιγράφεται η διαμόρφωση των δικτύων, τα προβλήματα που αναπτύσσονται καθώς και τα μέσα προστασίας και ρύθμισης που χρησιμοποιούνται. Ακόμα, γίνεται περιγραφή των υπολογισμών που λαμβάνουν χώρα στα δίκτυα διανομής και αναλύεται η ποιότητα εξυπηρέτησης του καταναλωτή.
- Κεφάλαιο 5: Παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά δικτύων ύδρευσης. Πιο αναλυτικά, γίνεται αναφορά στη διαμόρφωση εσωτερικού και εξωτερικού υδραγωγείου. Περιγράφεται ο βασικός εξοπλισμός των δικτύων ύδρευσης και παρατίθενται οι βασικές αρχές υδραυλικών υπολογισμών στα δίκτυα. Επίσης, παρουσιάζονται οι μέθοδοι άρδευσης.

- Κεφάλαιο 6: Συγκρίνονται τα δίκτυα ύδρευσης και ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να βρεθούν κοινά χαρακτηριστικά τους, όπως χαρακτηριστικά στον σχεδιασμό τους, στις μεθόδους υπολογισμού αλλά και την επιτακτική ανάγκη να λειτουργούν βέλτιστα έτσι ώστε να εξυπηρετείται ο πληθυσμός μιας πόλης.
- Κεφάλαιο 7: Προσομοιώνεται ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε περιβάλλον MATLAB.
- Κεφάλαιο 8: Προσομοιώνεται ένα δίκτυο ύδρευσης σε περιβάλλον MATLAB.
- Κεφάλαιο 9: Παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα μέσω σύγκρισης ομοιοτήτων και διαφορών των δύο δικτύων και αναφέρονται οι περιοχές για περαιτέρω έρευνα.

1.3 Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και δίκτυα διανομής

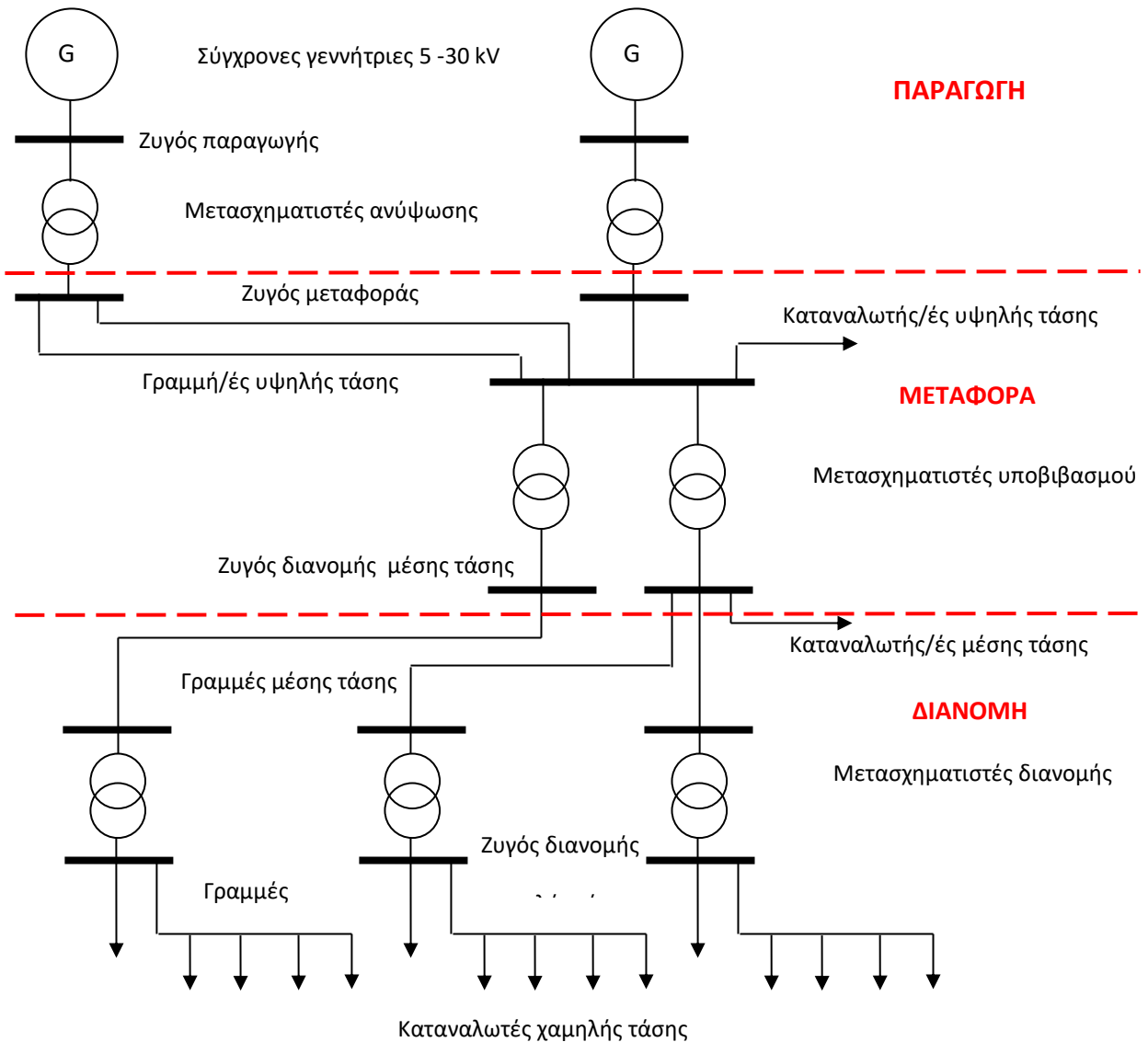
Στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) συμπεριλαμβάνονται οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα δίκτυα μεταφοράς που συνδέουν τους σταθμούς παραγωγής, μεταφέροντας την ηλεκτρική ενέργεια κοντά στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης (πόλεις ή βιομηχανικές περιοχές) και τα δίκτυα διανομής που παραλαμβάνουν την ηλεκτρική ενέργεια που έχει φτάσει κοντά στα κέντρα και τη διανέμουν στους τελικούς καταναλωτές.

Ένα τυπικό ΣΗΕ απεικονίζεται στο σχήμα 1.1. Η διαχείριση, η εκμετάλλευση και η συντήρηση των ΣΗΕ μπορεί να γίνονται, είτε από δημόσιες επιχειρήσεις, είτε από ιδιωτικές. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα, οι μονάδες παραγωγής ανήκουν σε μεγάλες εταιρείες όπως η ΔΕΗ, η Elpedison, η Protergeia κ.α ή σε μικρές όπως Ήρων. Το δίκτυο μεταφοράς ανήκει στον ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) και το δίκτυο διανομής ανήκει στον ΔΕΔΔΗΕ (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας). Ως προς τη λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι κατά κύριο λόγο υπεύθυνος ο Όμιλος Χρηματιστηρίου Ενέργειας, ενώ εποπτεύουσα αρχή είναι η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ).

Οι υποχρεώσεις και τα όρια των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού σταματούν εκεί όπου αρχίζει η ιδιοκτησία των καταναλωτών, όπου και αρχίζουν τα όρια των εσωτερικών συστημάτων διανομής, που καθορίζονται και κατασκευάζονται με βάση τις ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών και την κατανομή των συσκευών κατανάλωσης στο χώρο. Το εσωτερικό σύστημα διανομής μαζί με το σύνολο των συσκευών κατανάλωσης καλείται εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση.

Η κατασκευαστική δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας δέχεται μεγάλη επιρροή από την ποσότητα ζήτησης ενέργειας, καθώς επίσης και από τον τρόπο που διαμορφώνεται και μοιράζεται αυτή μέσα στη διάρκεια της ημέρας. Ωστόσο κάποια στοιχεία των ΣΗΕ παραμένουν ανεπηρεάστα από τα παραπάνω και είναι κοινά σε όλα τα δίκτυα, όπως το γεγονός ότι υπάρχει καθορισμένη τάση λειτουργίας. Επίσης οι γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στη μέση τάση διαθέτουν πάντα αγωγούς τριών φάσεων, ενώ οι γραμμές χαμηλής τάσης διαθέτουν επιπρόσθετα και έναν ουδέτερο αγωγό.

Η κατηγοριοποίηση των καταναλωτών και κατ' επέκταση η επιλογή της σύνδεσης αυτών πραγματοποιείται ανάλογα με την ανάγκη τους για απορρόφηση ισχύος από το σύστημα. Έτσι οι καταναλωτές χωρίζονται σε καταναλωτές υψηλής τάσης, μέσης τάσης και χαμηλής τάσης [1, §1.1].

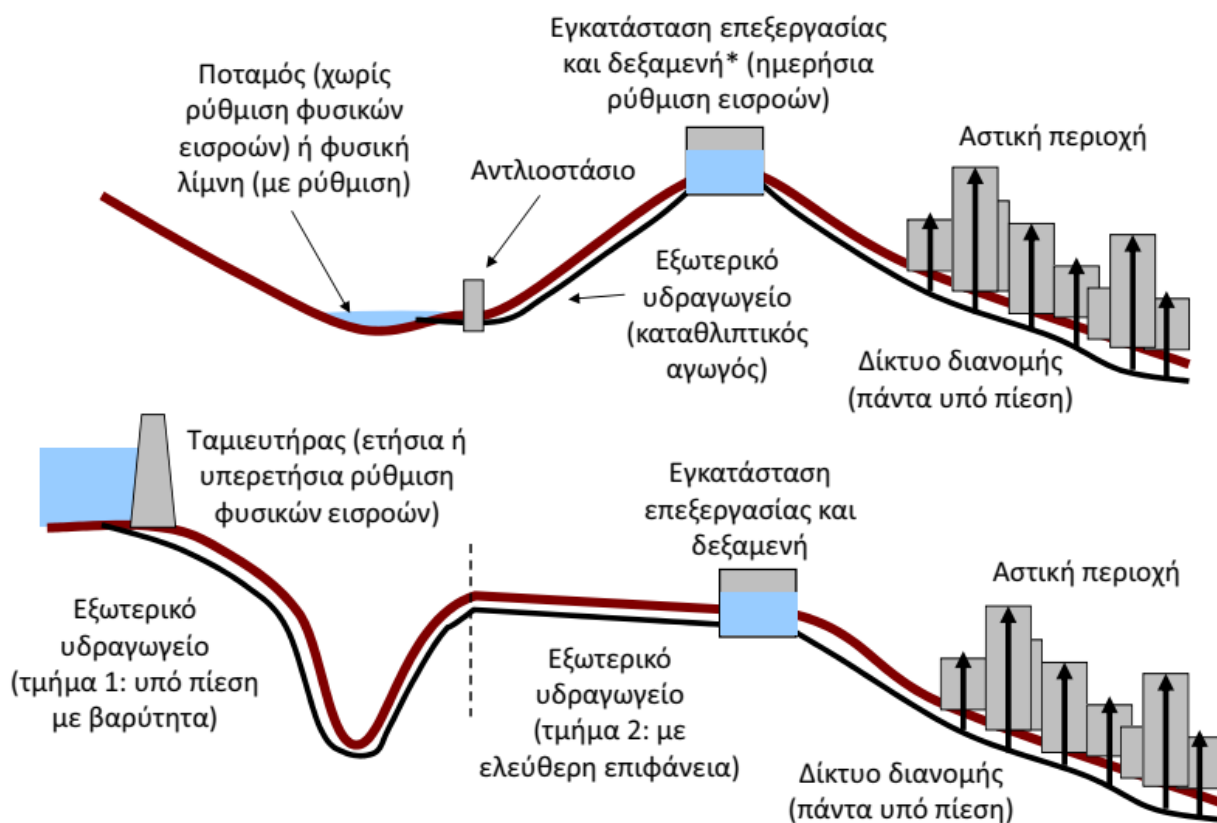


Σχήμα 1.1: Τυπικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας [4, σχ.1.1].

1.4 Σύστημα και δίκτυο ύδρευσης

Απαραίτητο αγαθό για τη διατήρηση της ανθρώπινης ζωής αποτελεί το νερό, γι' αυτό η εξασφάλιση της τροφοδότησης νερού σε οικίες, εγκαταστάσεις και περιοχές όπου κυριαρχεί η γεωργική δραστηριότητα, καθώς και η ποιότητα αυτού, αποτελούν βασικό αντικείμενο μελέτης από τα αρχαία χρόνια μέχρι και σήμερα. Η κυριαρχία του νερού σε κάθε είδους ανθρώπινη δραστηριότητα θέτει ως προϋπόθεση την κατασκευή ολοκληρωμένων συστημάτων ύδρευσης που περιλαμβάνουν έργα σύλληψης ύδατος από τις πηγές που είναι διαθέσιμο, έργα μεταφοράς αυτού, καθώς επίσης και κατάλληλης επεξεργασίας αυτού, έργα αποθήκευσης και τελικά ανάπτυξη δικτύων διανομής νερού, υψηλών προδιαγραφών και απαιτήσεων.

Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα ύδρευσης (σχήμα 1.2) αποτελούνται κυρίως από δύο νοητά χωρισμένα τμήματα. Έτσι διακρίνεται το εξωτερικό υδραγωγείο που περιλαμβάνει το σύνολο των έργων και των αγωγών μεταφοράς νερού ύδρευσης από τα σημεία υδροληψίας υδάτινων πόρων όπως ποτάμια, κοντά στα κέντρα κατανάλωσης, μαζί με τα έργα επεξεργασίας του νερού που συνήθως λαμβάνουν χώρα δίπλα στις δεξαμενές αποθήκευσης. Το τέλος των δεξαμενών αποθήκευσης σηματοδοτεί και την αφετηρία του δεύτερου τμήματος ενός συστήματος ύδρευσης που καλείται εσωτερικό υδραγωγείο και περιλαμβάνει τους αγωγούς διανομής του πόσιμου νερού στους καταναλωτές.



Σχήμα 1.2: Τυπικό σύστημα ύδρευσης [11, κεφ.6].

Πιο αναλυτικά, ένα εξωτερικό υδραγωγείο αποτελείται από:

- Τις πηγές υδροληψίας. Πηγές υδροληψίας αποτελούν τα ποτάμια, οι λίμνες ή σε ορισμένες περιπτώσεις η θάλασσα, αφού όμως υποστεί συγκεκριμένες διαδικασίες απομάκρυνσης του αλατιού. Ακόμη πηγές αποτελούν και τα υπόγεια ύδατα. Συνήθως η εκμετάλλευση αυτών προϋποθέτει τη δημιουργία υδατογεωτρήσεων, υπόγειων σηράγγων σε συνδυασμό με κάποια αντλητικά συστήματα.
- Τις σωληνώσεις και τα έργα μεταφοράς. Σε αυτό το τμήμα περιλαμβάνονται όλοι οι αγωγοί που μεταφέρουν το νερό από τις πηγές υδροληψίας μέχρι το δίκτυο διανομής. Ενδιάμεσα μπορεί να παρεμβάλλονται και ταμιευτήρες. Οι σωλίνες αυτοί μπορεί να είναι είτε ανοιχτοί, είτε κλειστοί, όπως αναλύονται στα κεφάλαια που έπονται. Όταν η υψομετρική διαφορά που έχουν να καλύψουν οι αγωγοί αυτοί, ξεκινάει από το υψηλότερο και καταλήγει στο

χαμηλότερο σημείο, τότε η όδευση του νερού πραγματοποιείται με φυσική ροή. Σε αντίθετη περίπτωση είναι απαραίτητη η χρήση αντλιών για να καλύψουν αυτή τη διαφορά υψομέτρου, οπότε γίνεται λόγος για καταθλιπτικούς αγωγούς μεταφοράς.

- Τις δεξαμενές. Δεξαμενές που σχετίζονται με αρκετές λειτουργίες, εκτός της αποθήκευσης, λόγω χάρη ενδιάμεσες δεξαμενές για ρύθμιση της πίεσης και εξισορρόπηση αυτής.
- Τα σημεία επεξεργασίας ύδατος ή διαφορετικά διυλιστήρια. Πρόκειται για τα μέρη όπου λαμβάνει χώρα η επεξεργασία του νερού και ο καθαρισμός του, με φυσικές ή με χημικές μεθόδους. Ενδεικτικές διαδικασίες είναι χλωρίωση που είναι χημική μέθοδος, ή ο αερισμός που γίνεται με φυσικό τρόπο.

Το εσωτερικό υδραγωγείο περιλαμβάνει ουσιαστικά όλο το δίκτυο διανομής από τις δεξαμενές μέχρι τον εκάστοτε καταναλωτή. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από πρωτεύοντες αγωγούς με μεγάλες διατομές και έπειτα από δευτερεύοντες και τριτεύοντες, ή αλλιώς ιδιωτικούς αγωγούς που είναι και αυτοί που σηματοδοτούν το όριο του εσωτερικού υδραγωγείου καθώς εκεί ξεκινούν τα μετρητικά όργανα κατανάλωσης κάθε καταναλωτή [2, §1.1, §7.1], [9, §1.5].

1.5 Προβλήματα προς επίλυση στα δίκτυα

Η κάλυψη της ζήτησης για ενέργεια, η οποία παρουσιάζει συνεχώς αυξητική τάση, αποτελεί διαρκή πρόκληση για τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας που δεσμεύονται σε θέματα αξιοπιστίας και ποιότητας. Επομένως κυρίαρχο ρόλο, εκτός από τη σωστή λειτουργία των ήδη υπαρχόντων εγκαταστάσεων, παίζει η διαρκής ανάπτυξη και η κατασκευή νέων ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και των δικτύων διανομής. Τα πολλαπλά κριτήρια, οι δεσμεύσεις και οι περιορισμοί που θέτει η σωστή ανάπτυξη και λειτουργία των δικτύων διανομής καθιστά υποχρεωτική τη μελέτη τους μέσω προγραμμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών [1, §1.2].

1.5.1 Ανάπτυξη βάσεων δεδομένων

Πρόκειται για βάσεις δεδομένων που εμπεριέχουν όλες τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες και αποτυπώσεις των δικτύων διανομής. Η χαρτογραφική αποτύπωση των δικτύων διανομής γίνεται είτε με τοπογραφική μορφή, είτε με συνδεσμολογική μορφή. Τα Συστήματα Πληροφοριακών Συστημάτων GIS αποτελούν μία ολοκληρωμένη βάση γεωγραφικών δεδομένων με απεικονίσεις δικτύων ύδρευσης, ηλεκτρικών δικτύων, δικτύων αποχέτευσης κ.ο.κ. [1, §1.2].

1.5.2 Στοιχεία λειτουργίας

Κάθε απαραίτητη πληροφορία που αφορά τη λειτουργία ενός δικτύου διανομής καταγράφεται σε αυτήν την κατηγορία προγραμμάτων. Έτσι στα στοιχεία λειτουργίας των δικτύων μπορεί να αναζητήσει κανείς το χρόνο απομόνωσης κάποιου μέρους ενός δικτύου για την επιδιόρθωση και την επισκευή πιθανής βλάβης, την πίεση λειτουργίας σε συγκεκριμένο σημείο ενός δικτύου ύδρευσης ή την τάση σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο διανομής [1, §1.2].

1.5.3 Καταναλώσεις

Ιδιαίτερα καθοριστικό ρόλο για τη σωστή ανάπτυξη ενός δικτύου διανομής διαδραματίζει η τελική ζήτηση από τον καταναλωτή. Η καταγραφή των φορτίων κάθε κατηγορίας καταναλωτή επιτυγχάνεται μέσω προγραμμάτων ανάπτυξης φορτίων που εκτός από τους αριθμούς καταγραφής καταναλώσεων παρέχουν τη δυνατότητα πρόβλεψης των καταναλώσεων και κατ' επέκταση τη δυνατότητα πρόβλεψης της κατασκευαστικής εξέλιξης των δικτύων, με τη βοήθεια στατιστικών μοντέλων [1, §1.2].

1.5.4 Υπολογισμοί δικτύων

Αρκετοί τεχνικοί υπολογισμοί είναι απαραίτητοι για τη σωστή λειτουργία των δικτύων διανομής, αλλά ακόμη περισσότερο για την αποτελεσματική ανάπτυξη αυτών. Ροή φορτίων, οι τάσεις στους ηλεκτρικούς αγωγούς, οι πιέσεις των αγωγών ύδρευσης, η παροχή, οι απώλειες, οι μεταβατικές συμπεριφορές σε ακραίες συνθήκες ζήτησης, οι δείκτες αξιοπιστίας είναι μόνο μερικά από τα μεγέθη που είναι αναγκαίο να υπολογίζονται, ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του κάθε δικτύου διανομής [1, §1.2].

1.5.5 Βέλτιστη λειτουργία

Όπως προαναφέρθηκε πολύ σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ανάπτυξη των δικτύων διανομής, πόσο μάλλον όταν αυτή επιτυγχάνεται με τον βέλτιστο τρόπο. Υπάρχουν προγράμματα στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές που φανερώνουν τη βέλτιστη λειτουργία των δικτύων διανομής, δηλαδή ποια είναι η καλύτερη δυνατή σύνδεση υπάρχοντων αγωγών, λοιπών εξαρτημάτων, είτε ηλεκτρικών, είτε ύδρευσης, ή ποια είναι τα κατάλληλα σημεία για διασταυρώσεις. Επίσης υπάρχουν προγράμματα που φανερώνουν την ενδεικνύμενη θέση για τοποθέτηση αντισταθμιστικών οργάνων όπως πυκνωτές, ρυθμιστές τάσης ή βαλβίδων αντεπιστροφής κ.τ.λ. [1, §1.2].

1.5.6 Βέλτιστη ανάπτυξη

Η ανάπτυξη των δικτύων που είναι και ο βασικότερος στόχος των ΣΗΕ είναι αποτέλεσμα συνδυασμού των υπολογισμών που προαναφέρθηκαν και της επιστήμης της επιχειρησιακής έρευνας, ώστε να προκύπτει πάντα τόσο η ιδανικότερη κατασκευαστική λύση, όσο όμως και η λιγότερο ακριβά. Προγράμματα βέλτιστης ανάπτυξης επομένως προβάλλουν την καλύτερη λύση με βάση οικονομοτεχνικά κριτήρια [1, §1.2].

1.6 Περιβαλλοντική σημασία των δικτύων

Η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια και νερό κάνει έντονη την παρουσία της στις περισσότερες ανθρώπινες δραστηριότητες, γεγονός που μετατρέπει τα δίκτυα μεταφοράς αυτών σε μείζονος σημασίας. Τα δίκτυα αυτά συμπεριλαμβάνονται στην ευρύτερη κατηγορία των δικτύων κοινής ωφέλειας, μαζί με τα έργα τηλεπικοινωνιών και αποχέτευσης και η σωστή ανάπτυξη αυτών υψηλή ποιότητα ζωής.

Στις μέρες μας υπάρχει ιδιαίτερη ευαισθητοποίηση σε περιβαλλοντικά ζητήματα και επομένως στα οικονομοτεχνικά κριτήρια που προαναφέρθηκαν, έρχονται να προστεθούν και περιβαλλοντικές παράμετροι που καθορίζουν την ανάπτυξη των δικτύων.

Με γνώμονα τις λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και όσον αφορά τα ηλεκτρικά δίκτυα γίνεται μία διαρκής προσπάθεια απαγκίστρωσης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις παλιές καθιερωμένες λιγνιτικές μονάδες σε ανανεώσιμες κυρίως πηγές όπως η αιολική ή ηλιακή.

Το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα δίκτυα ύδρευσης είναι από πλευράς απώλειας υδάτων. Αυτό μπορεί να συνδεθεί με περιβαλλοντικές επιπτώσεις ως εξής: Μεγάλες ποσότητες ύδατος που ξεκινούν από τις πηγές υδροληψίας με σκοπό να καταλήξουν στους καταναλωτές. Μεγάλη ποσότητα ενέργειας καταναλώνεται για την όδευση, την καθοδήγηση και τον καθαρισμό αυτού του νερού, που τελικά ποσοστό περίπου 50% δεν φτάνει στους καταναλωτές, αλλά χάνεται στη διαδρομή από σπασίματα αγωγών, διαρροές ή λάθος διαχείριση ταμιευτήρων. Η μείωση των απωλειών των δικτύων ύδρευσης και άρδευσης αποτελεί επομένως το βασικότερο στοίχημα για την προστασία του περιβάλλοντος από πλευράς υδάτων, καθώς επίσης και η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων μετά από κατάλληλη επεξεργασία σε άλλες χρήσεις όπως η γεωργία [3, §1.3].

1.7 Συμπεράσματα

Δεδομένο αποτελεί πως η αύξηση του πληθυσμού και η συγκέντρωσή του σε μεγάλα αστικά κέντρα, δημιουργεί διαφορετικές και μεγαλύτερες απαιτήσεις για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και νερού. Επομένως, η επέκταση και η ανάπτυξη των δικτύων κοινής ωφέλειας σε κατασκευαστικά πλαίσια και σε πλαίσια εκσυγχρονισμού του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού αποτελεί μεγάλο πρόβλημα στη σύγχρονη εποχή.

Σε προσπάθεια βέλτιστης λειτουργίας των δικτύων και ορθότερης εκμετάλλευσης των φυσικών πόρων, συμπεραίνεται πως η μελέτη των δικτύων ύδρευσης και ηλεκτρικών δικτύων θα απασχολήσει και στο μέλλον την κοινωνία μας.

Στα κεφάλαια που έπονται γίνεται μία εκτενής περιγραφή σε βασικές έννοιες που αφορούν τα ηλεκτρικά κυκλώματα και τη μηχανική των ρευστών. Μετέπειτα, πραγματοποιείται ανάλυση δικτύων νερού και ηλεκτρισμού με αναφορές τόσο σε θέματα δομής, όσο και σε θέματα διατάξεων για την προστασία και τη ρύθμιση αυτών, με απώτερο σκοπό τον παραλληλισμό αυτών και τον προσδιορισμό τόσο των ομοιοτήτων που αυτά παρουσιάζουν, όσο και των διαφορών.

(ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

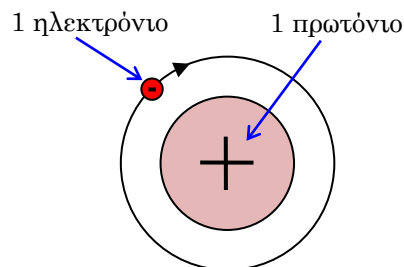
2.1 Ηλεκτρισμός και Ηλεκτρικό Φορτίο

2.1.1 Εισαγωγή

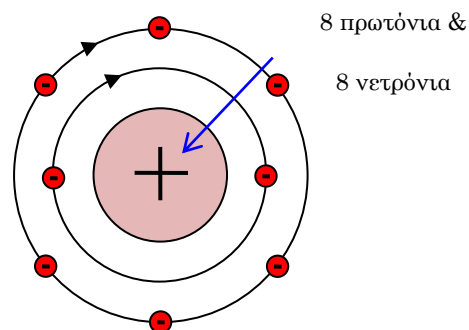
Πολλές μορφές ενέργειας συναντώνται στη σύγχρονη ζωή του ανθρώπου, όπως η ηλεκτρική, η μηχανική, η θερμική, η χημική, η ατομική κ.α. Προέχουσας σημασίας είναι η ηλεκτρική που είναι μια μορφή ενέργειας, η οποία συνδέεται με την παρουσία ή την κίνηση ηλεκτρικών φορτίων. Η ικανότητά της να μεταφέρεται εύκολα και αποδοτικά και να μετατρέπεται σε άλλες μορφές ενέργειας με ελάχιστες απώλειες την καθιστά την πιο χρήσιμη μορφή ενέργειας.

Βασικές έννοιες οι οποίες πρέπει να αποσαφηνιστούν είναι οι έννοιες της ύλης, του μορίου και του ατόμου. Ως ύλη ορίζεται οτιδήποτε καταλαμβάνει το χώρο. Δηλαδή είναι όλα αυτά που μπορεί να δει και να αισθανθεί κανείς. Αυτή αποτελείται από τα μόρια, τα οποία εν συνεχεία αποτελούνται από τα άτομα. Μόριο είναι το μικρότερο μέρος στο οποίο οποιοδήποτε υλικό μπορεί να διαιρεθεί και να διατηρήσει ακόμα τις ίδιες ιδιότητες με το αρχικό του μέγεθος. Αντίστοιχα, το κάθε μόριο αποτε-

λείται από άτομα, τα οποία όμως είναι αδιάσπαστα, καθώς για να διασπαστούν πρέπει να εφαρμοστεί σε αυτά πυρηνική σχάση. Κάθε άτομο αποτελείται από έναν πυρήνα, που απαρτίζεται από πρωτόνια (θετικά φορτισμένα σωματίδια) και νετρόνια (ουδέτερα φορτισμένα σωματίδια), και από τα ηλεκτρόνια που περιστρέφονται γύρω από αυτόν σε τροχιές μορφής έλλειψης με μεγάλη ταχύτητα. Το απλούστερο άτομο που υπάρχει στη φύση είναι αυτό του υδρογόνου H, που έχει ένα ηλεκτρόνιο και ένα πρωτόνιο (σχήμα 2.1), ενώ το άτομο οξυγόνου παρουσιάζει επίσης απλή δομή (σχήμα 2.2) και αποτελείται από οκτώ πρωτόνια και οκτώ νετρόνια στον πυρήνα του, και οκτώ ηλεκτρόνια σε δύο διαφορετικά επίπεδα τροχιών.



Σχήμα 2.1: Άτομο υδρογόνου.

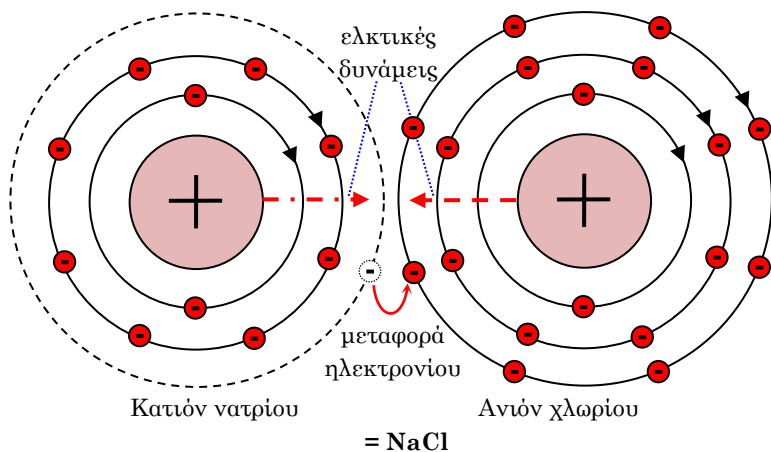


Σχήμα 2.2: Άτομο οξυγόνου.

Χημική ένωση είναι ένας χημικός συνδυασμός ενός ή περισσότερων διαφορετικών στοιχείων και η μικρότερη πιθανή μονάδα μίας ένωσης είναι ένα μόριο. Τα σώματα που αποτελούνται από ένα μόνο είδος ατόμων ονομάζονται χημικά στοιχεία, ενώ εκείνα που αποτελούνται από περισσότερα

του ενός στοιχείου καλούνται σύνθετα σώματα. Η σταθερότητα των ενώσεων και η ύπαρξή τους ως ανεξάρτητων μονάδων της ύλης οφείλεται στις ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των ατόμων που τις συγκροτούν. Οι ελκτικές δυνάμεις αυτές καθορίζουν το είδος των χημικών δεσμών που αναπτύσσονται μεταξύ των ατόμων των στοιχείων. Έπειτα από μελέτη προκύπτουν οι ακόλουθοι τύποι δεσμών:

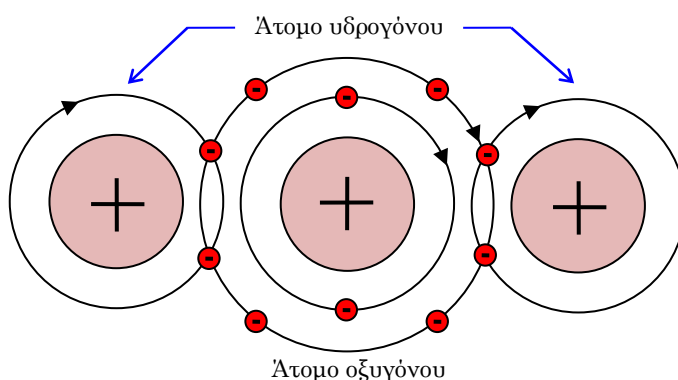
→ Ετεροπολικός δεσμός: Ο χημικός δεσμός αυτής της κατηγορίας είναι ηλεκτροστατικής φύσης, όπου κατά την κλασική θεώρηση το άτομο ενός στοιχείου που διαθέτει στην εξωτερική του στιβάδα λιγότερα από τέσσερα ηλεκτρόνια τείνει να αποβάλλει τα ηλεκτρόνια της εξώτατης στιβάδας του



και να απομείνει με συμπληρωμένη την αμέσως εσωτερική στιβάδα. Αντίστοιχα το άτομο ενός στοιχείου που έχει περισσότερα από τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξώτατη στιβάδα του τείνει να προσλάβει ηλεκτρόνια, ώστε να τη συμπληρώσει με 8 (σχήμα 2.3)

Σχήμα 2.3: Ετεροπολικός δεσμός

→ Ομοιοπολικός δεσμός: Σε αντίθεση με τον προηγούμενο τύπο, ο χημικός δεσμός αυτής της κατηγορίας είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσης, όπου κατά την κλασική θεώρηση είναι δυνατό δύο άτομα να ενωθούν μεταξύ τους με αμοιβαία συνεισφορά ηλεκτρονίων (σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Ομοιοπολικός δεσμός

→ Μεταλλικός δεσμός: Τα άτομα ενός μετάλλου, όπως ο σίδηρος Fe, ο χαλκός Cu κτλ., σχηματίζουν τα μεταλλικά κρυσταλλικά πλέγματα που συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός ιδιαίτερου χημικού δεσμού που καλείται μεταλλικός. Το σχηματιζόμενο πλέγμα επιτυγχάνει μία δομή μέγιστης πυκνότητας ή αλλιώς ελάχιστου όγκου που οδηγεί αναπόφευκτα σ' έναν

περιορισμένο αριθμό γεωμετρικών διατάξεων, όπως χωροκεντρωμένο κυβικό για το σίδηρο Fe (αν και ως δομή δεν είναι η βέλτιστη δυνατή), εξαγωνικό για το ψευδάργυρο Zn, εδροκεντρωμένο κυβικό για το χαλκό Cu [7, §1.1, 1.2].

2.1.2 Ηλεκτρικά φορτία

Υπάρχουν δύο είδη ηλεκτρικών φορτίων, το θετικό, με σύμβολο (+) και το αρνητικό, με σύμβολο (-). Τα φορτία που ανήκουν στο ίδιο είδος λέγονται ομώνυμα και απωθούνται μεταξύ τους, ενώ τα φορτία που ανήκουν σε διαφορετικά είδη λέγονται ετερόνυμα και έλκονται μεταξύ τους. Ηλεκτρικά φορτία είναι και τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια κάθε ατόμου, καθώς κάθε πρωτόνιο φέρει ένα θετικό φορτίο και κάθε ηλεκτρόνιο φέρει ένα αρνητικό. Το πρωτόνιο και το ηλεκτρόνιο είναι ίσα στο μέγεθος και αντίθετα στο πρόσημο, με αποτέλεσμα ένα άτομο που έχει ίσο αριθμό πρωτονίων και ηλεκτρονίων να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Η πιο ακραία τροχιά ενός ατόμου ονομάζεται εξωτερική στοιβάδα ή τροχιά σθένους και τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε αυτήν ονομάζονται ηλεκτρόνια σθένους, ενώ ισχύει η επιθυμία όλων των ατόμων να έχουν την εξωτερική τους στοιβάδα πλήρως συμπληρωμένη από πλευράς ηλεκτρονίων. Αν η τροχιά σθένους έχει λιγότερα ηλεκτρόνια από τα τέσσερα και η επόμενη εσωτερική στοιβάδα έχει οκτώ, τότε τα άτομα επιθυμούν να εκκενώσουν την εξωτερική στοιβάδα από ηλεκτρόνια, προκειμένου να φθάσουν σε πλήρη εξωτερική στοιβάδα. Αντίθετα, εάν έχουν από τέσσερα και πάνω στην εξωτερική στοιβάδα, τότε τείνουν να πάρουν τα υπολειπόμενα προκειμένου να τη συμπληρώσουν. Τα ηλεκτρόνια τα οποία δύνανται να αποσπαστούν ονομάζονται ελεύθερα ηλεκτρόνια. Ένα άτομο που έχει έλλειψη ηλεκτρονίων είναι θετικά φορτισμένο και ονομάζεται θετικό ιόν ή κατίον, ενώ αυτό που έχει περίσσεια ηλεκτρονίων είναι αρνητικά φορτισμένο και ονομάζεται αρνητικό ιόν ή ανιόν. Με σκοπό να μετρηθεί η ποσότητα ενός ηλεκτρικού φορτίου $[Q]$ και επειδή ο προσδιορισμός του πλήθους των ηλεκτρονίων θα έδινε τεράστιες τιμές που πρακτικά θα ήταν ασύμφορο, αναπτύχθηκε η μονάδα Coulomb [C], που συμβαδίζει και με το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (S.I.). Το 1 Coulomb κατά απόλυτη τιμή περιέχει ποσότητα ηλεκτρονίων ίση με $6,28 \cdot 10^{18}$ ηλεκτρονίων, δηλαδή 6,28 πεντάκις εκατομμύρια ηλεκτρόνια:

$$1 \text{ C} = 6,28 \cdot 10^{18} \text{ ηλεκτρόνια} \quad (2.1)$$

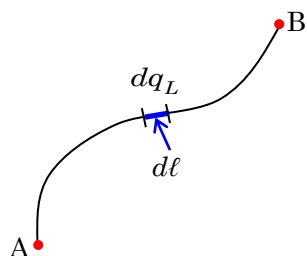
Επομένως το αρνητικό φορτίο ενός ηλεκτρονίου e είναι ίσο με:

$$e = -1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (2.2)$$

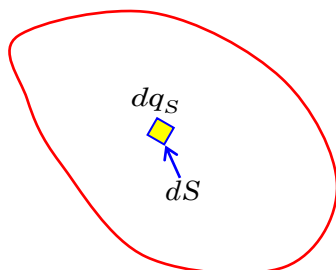
Το ηλεκτρικό φορτίο παρουσιάζει τρεις βασικές ιδιότητες. Αυτές είναι η κβάντωση του φορτίου, το αναλλοίωτο του φορτίου και η διατήρηση του φορτίου. Η κβάντωση αναφέρεται στην ιδιότητα της απόλυτης τιμής του φορτίου να είναι πάντα ακέραιο πολλαπλάσιο της απόλυτης τιμής του στοιχειώδους φορτίου ενός ηλεκτρονίου, ενώ η τελευταία είναι γνωστή και ως αρχή διατήρησης του φορτίου και σημαίνει πως σε ένα ηλεκτρικά απομονωμένο σύστημα το αλγεβρικό άθροισμα που φέρουν τα φορτία των σωμάτων του συστήματος είναι σταθερό ανεξάρτητα από τις τυχούσες ανταλλαγές φορτίων μεταξύ των σωμάτων.

Τα φορτία ανάλογα με τη μορφή μέσα στο χώρο διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

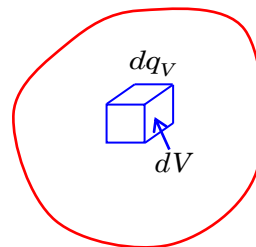
- Σημειακό ή κεντρικό. Είναι το φορτίο q σ' ένα σώμα με τόσο μικρές γεωμετρικές διαστάσεις σε σχέση με το χώρο που εξετάζεται, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι το φορτίο βρίσκεται συγκεντρωμένο σ' ένα μόνο σημείο.
- Κατανεμημένο. Είναι το φορτίο σ' ένα σώμα, του οποίου οι διαστάσεις του σώματος που βρίσκεται δεν μπορούν να αμεληθούν. Ανάλογα με τον αριθμό των πεπερασμένων διαστάσεων του φορτισμένου σώματος, διακρίνεται σε γραμμικό [Q_L] που έχει μονοδιάστατη κατανομή (σχήμα 2.5), σε επιφανειακό [Q_S] που έχει δισδιάστατη κατανομή (σχήμα 2.6) και σε χωρικό [Q_V] που έχει τρισδιάστατη κατανομή (σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.5: Γραμμική κατανομή φορτίου



Σχήμα 2.6: Επιφανειακή κατανομή φορτίου



Σχήμα 2.7: Χωρική κατανομή φορτίου

Η ποσότητα φορτίου μπορεί να εκφραστεί και μέσω της πυκνότητας φορτίου, που είναι ένα μέγεθος που περιγράφει τον τρόπο κατανομής του ηλεκτρικού φορτίου σε μία γραμμή μήκους L , σε μία επιφάνεια S ή σ' ένα όγκο V . Ονομάζεται γραμμική (σχέση 2.3) και μέση γραμμική (σχέση 2.4) με πυκνότητα $[\rho_L]$ και $[\bar{\rho}_L]$, επιφανειακή (σχέση 2.5) και μέση επιφανειακή (σχέση 2.6) με πυκνότητα $[\rho_S]$ και $[\bar{\rho}_S]$ και χωρική (σχέση 2.7) και μέση χωρική (σχέση 2.8) με πυκνότητα $[\rho_V]$ και $[\bar{\rho}_V]$ αντίστοιχα [7, §1.3, 1.6].

$$\rho_L = \frac{dq_L}{dl} \quad [\text{C/m}] \quad (2.3)$$

$$\bar{\rho}_L = \frac{Q_L}{L} \quad [\text{C/m}] \quad (2.4)$$

$$\rho_S = \frac{dq_S}{dS} \quad [\text{C/m}^2] \quad (2.5)$$

$$\bar{\rho}_S = \frac{Q_S}{S} \quad [\text{C/m}^2] \quad (2.6)$$

$$\rho_V = \frac{dq_V}{dV} \quad [\text{C/m}^3] \quad (2.7)$$

$$\bar{\rho}_V = \frac{Q_V}{V} \quad [\text{C/m}^3] \quad (2.8)$$

2.1.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες της ύλης

Κάθε υλικό σώμα περιέχει μικροσκοπικά ηλεκτρικά φορτία στη μάζα του, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Οι πιο σημαντικές ιδιότητες είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η διηλεκτρικότητα.

Ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι η ιδιότητα της ύλης να επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού φορτίου μέσα από τη μάζα της. Η συμπεριφορά των διαφόρων υλικών ως προς την ιδιότητα αυτή εξαρτάται από την εξωτερική στοιβάδα ηλεκτρονίων του ατόμου του υλικού αυτού. Με βάση αυτήν την ιδιότητα διακρίνονται τρεις κατηγορίες υλικών.

- Καλός αγωγός ηλεκτρισμού ή αγωγίμο σώμα ή αγωγός. Πρόκειται για υλικά που η εξωτερική στοιβάδα των ατόμων τους έχει λιγότερα από τέσσερα ηλεκτρόνια.
- Κακός αγωγός του ηλεκτρισμού ή διηλεκτρικό σώμα ή μονωτής. Πρόκειται για υλικά που τα άτομα τους περιέχουν περισσότερα από τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα.
- Ημιαγωγός. Πρόκειται για υλικά που η εξωτερική στοιβάδα των ατόμων τους περιέχει ακριβώς τέσσερα ηλεκτρόνια. Ανάλογα με τις συνθήκες είτε διώχνει, είτε παίρνει ηλεκτρόνια, συμπεριφέρεται, δηλαδή είτε ως αγωγός, είτε ως μονωτής αντίστοιχα.

Στη φύση δεν υπάρχει ούτε ο τέλειος αγωγός, ούτε ο τέλειος μονωτής, επειδή κανένα υλικό δεν είναι τελείως καθαρό και πάντα υπάρχει κάποια κίνηση ηλεκτρονίων, όχι όμως ελεύθερη. Η ιδιότητα της παρεμπόδισης της μετακίνησης των ηλεκτρικών φορτίων καλείται ηλεκτρική αντίσταση και πρόκειται για την αντίθετη ιδιότητα της αγωγιμότητας. Ενδεικτικά αναφέρονται, οι καλύτεροι αγωγοί που είναι ο χρυσός και ο άργυρος, οι καλύτεροι μονωτές που είναι τα ευγενή αέρια, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι αγωγοί που είναι ο χαλκός και το αλουμίνιο(κυρίως λόγω κόστους) και οι πιο συνηθισμένοι μονωτές που είναι ο αέρας και το εξαφθοριούχο θείο.

Διηλεκτρικότητα είναι η ιδιότητα της ύλης να επηρεάζει την άσκηση ηλεκτρικών δυνάμεων διαμέσου της μάζας της [7, §1.4].

2.2 Βασικές Έννοιες Ηλεκτροτεχνίας

2.2.1 Ηλεκτρική δύναμη Coulomb

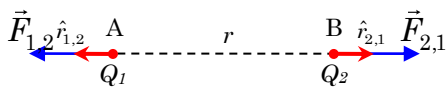
Ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι οι δυνάμεις που προκύπτουν από φορτία σωμάτων, που είναι ακίνητα ως προς τον παρατηρητή που τα μελετά και βρίσκονται μέσα σε μονωτικό υλικό. Αυτές μπορεί να είναι είτε ελκτικές, είτε απωστικές. Μεταξύ δύο σωμάτων Σ1 και Σ2 οι δυνάμεις που ασκούνται, σύμφωνα με την αρχή δράσης και αντίδρασης του Νεύτωνα έχουν κοινό φορέα, ίδιο μέτρο και αντίθετες φορές. Δηλαδή:

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1} \quad (2.9)$$

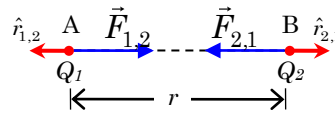
Όταν τα δύο σώματα έχουν τόσο μικρές διαστάσεις που μπορούν να θεωρηθούν ως σημειακά τα φορτία τους, τότε ισχύει ο νόμος Coulomb, ο οποίος λέει πως οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ δύο σημειακών φορτίων έχουν μέτρο ανάλογο του γινομένου των ποσοτήτων των φορτίων και αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της απόστασής τους. Έτσι για δύο σημειακά φορτία Q_1 και Q_2 που είναι τοποθετημένα στις θέσεις A και B και έχουν απόσταση r , η δύναμη που αναπτύσσεται στο φορτίο Q_1 δίνεται από τη (σχέση 2.10) και στο φορτίο Q_2 από τη (σχέση 2.11).

$$\vec{F}_{1,2} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \cdot \hat{r}_{1,2} \quad (2.10)$$

$$\vec{F}_{2,1} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \cdot \hat{r}_{2,1} \quad (2.11)$$



Σχήμα 2.8: Δυνάμεις Coulomb μεταξύ ομώνυμων σημειακών φορτίων (απωστικές)



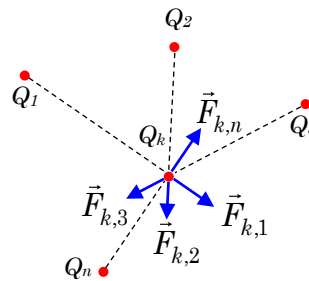
Σχήμα 2.9: Δυνάμεις Coulomb μεταξύ ετερόνυμων σημειακών φορτίων (ελκτικές)

Το ϵ είναι η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά και εκφράζει τη διηλεκτρικότητα του μονωτικού μέσου που παρεμβάλλεται μεταξύ των φορτίων και έχει μονάδες μέτρησης $C^2/N \cdot m^2$. Επειδή στο κενό και στον αέρα οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταδίδονται με τη μεγαλύτερη ευκολία, ορίστηκε η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού ϵ_0 (σχέση 2.12) και κάθε άλλη διηλεκτρική σταθερά ορίζεται με βάση αυτή και μέσω της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r (σχέση 2.13):

$$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} C^2/(N \cdot m^2) \quad (2.12)$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.13)$$

Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότερα από δύο σημειακά φορτία, τότε εφαρμόζεται η αρχή της επαλληλίας. Έτσι, εάν υπάρχουν φορτία $Q_1, Q_2, \dots, Q_k, Q_n$, τότε η δύναμη που ασκείται σε κάθε φορτίο (σχήμα 2.10), για παράδειγμα στο Q_k , προσδιορίζεται μέσω του διανυσματικού αθροίσματος των επιμέρους δυνάμεων που προκύπτουν, αν θεωρηθεί κάθε φορά το ζεύγος φορτίων που αποτελείται από το Q_k και οποιοδήποτε άλλο από τα υπόλοιπα φορτία [7, κεφ.2].



Σχήμα 2.10: Δύναμη Coulomb μεταξύ πολλών σημειακών φορτίων

$$\vec{F}_k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \sum_{m=1, m \neq k}^n \frac{Q_k \cdot Q_m}{r_{k,m}^2} \cdot \hat{r}_{0-k,m} \quad (2.14)$$

2.2.2 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

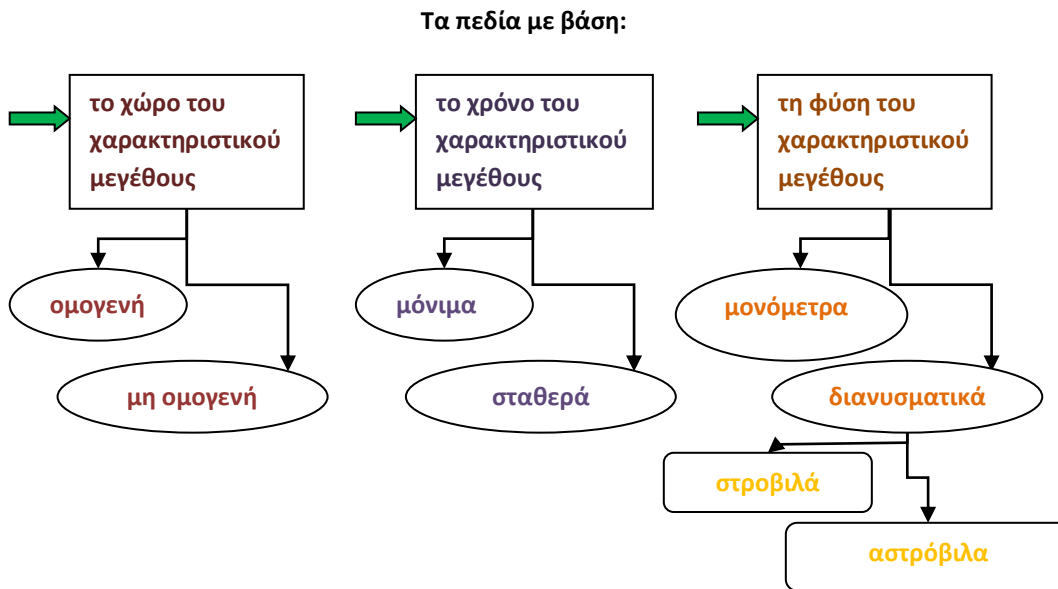
Μία περιοχή του χώρου ονομάζεται πεδίο, όταν σε κάθε σημείο της, ένα ορισμένο φυσικό μέγεθος που εκφράζει κάποια κοινή ιδιότητα των σημείων της λαμβάνει ορισμένη τιμή, η οποία εξαρτάται μόνο από τη θέση του σημείου και ενδεχομένως από το χρόνο. Οι ιδιότητες των σημείων επιτρέπουν την εκδήλωση φυσικών φαινομένων μέσα στο πεδίο. Η ιδιότητα που συνδέεται άμεσα με την εκδήλωση του φαινομένου λέγεται χαρακτηριστική ιδιότητα, ενώ το μέγεθος που την περιγράφει λέγεται χαρακτηριστικό μέγεθος και εξαρτάται από τη θέση του στο χώρο και το χρόνο. Παραδείγματα που βοηθούν στην κατανόηση των παραπάνω δίνονται στον πίνακα 2.1

Π.2.1 Ενδεικτικά παραδείγματα πεδίων

Πεδίο	Κατάλληλο υπόθεμα	Χαρακτηριστική ιδιότητα	Χαρακτηριστικό μέγεθος
Βαρυτικό πεδίο γης	Υλικό σημείο	Άσκηση δύναμης βάρους	Επιτάχυνση βαρύτητας
Πιέσεων ρευστού	Επιφάνεια	Άσκηση δύναμης πάνω σε επιφάνεια	Υδροστατική πίεση
Ροής ρευστού	Υλικό σημείο	Κίνηση υλικού σημείου	Ταχύτητα ροής
Ηλεκτροστατικό πεδίο	Σημειακό φορτίο	Άσκηση δύναμης Coulomb στο σημειακό φορτίο	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου
Μαγνητοστατικό πεδίο	Σημειακή μαγνητική μάζα (μόνο θεωρητικά)	Άσκηση μαγνητικής δύναμης στη μαγνητική μάζα	Ένταση μαγνητικού πεδίου

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι κατηγοριοποιήσεις των πεδίων (σχήμα 2.11). Ανάλογα με την εξάρτηση του χαρακτηριστικού μεγέθους από το χώρο τα πεδία διακρίνονται σε ομογενή και μη ομογενή, ανάλογα με την εξάρτηση του χαρακτηριστικού μεγέθους από το χρόνο διακρίνονται σε μόνιμα και μεταβαλλόμενα και τέλος ανάλογα με τη φύση του χαρακτηριστικού μεγέθους διακρίνονται σε μονόμετρα και διανυσματικά. Ειδική κατηγορία των διανυσματικών πεδίων είναι το δυναμικό πεδίο με χαρακτηριστική ιδιότητα όλων των σημείων του την άσκηση δύναμης πάνω σε κατάλληλο υπόθεμα. Τέτοιος χώρος είναι το ηλεκτρικό πεδίο, αφού, αν βρεθεί ένα ηλεκτρικό φορτίο μέσα του, τότε θα του ασκηθεί δύναμη. Με βάση αυτήν την άσκηση δύναμης τα διανυσματικά πεδία χωρίζονται σε αστρόβιλα και στροβιλιά. Αστρόβιλα είναι τα πεδία που η άσκηση δύναμης στο υπόθεμα προκαλεί μηδενική κυκλοφορία π.χ. βαρυτικό πεδίο γης, ενώ στα αστρόβιλα η άσκηση δύναμης προκαλεί μη μηδενική κυκλοφορία κατά μήκος μιας κλειστής καμπύλης στο χώρο του πεδίου π.χ το πεδίο ροής νερού από ένα σωλήνα εκροής δεξαμενής. Επισημαίνεται ότι ως κυκλοφορία K_P του χαρακτηριστικού μεγέθους \vec{F} ενός διανυσματικού πεδίου κατά μήκος μίας προσανατολισμένης κλειστής καμπύλης C είναι ουσιαστικά η αντίστοιχη ροή P κατά μήκος της κλειστής καμπύλης C και είναι ίση με:

$$K_P = \oint_C \vec{F} \cdot d\vec{r} = \oint_C \vec{F} \cdot \dot{\vec{r}}(u) \cdot du \quad (2.15)$$



Σχήμα 2.11: Κατηγοριοποιήσεις πεδίων

Το ηλεκτρικό πεδίο αποτελεί τη βάση αυτού του κεφαλαίου. Το μόνιμο και στατικό ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από στατικά φορτία σε μονωτικό χώρο ονομάζεται ηλεκτροστατικό, ενώ αυτό που δημιουργείται γύρω από κινούμενα φορτία ονομάζεται ηλεκτροδυναμικό. Χαρακτηριστικό που περιγράφει τη ‘δύναμη’ ενός ηλεκτρικού πεδίου είναι η έντασή του. Ένταση ηλεκτρικού πεδίου ορίζεται ως η δύναμη που ασκείται ανά μονάδα θετικού φορτίου στο σημείο αυτό:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (2.16)$$

$$\xrightarrow{(2.10),(2.16)} \vec{E} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \hat{r}_0 \quad (2.17)$$

Μονάδες μέτρησης της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο S.I. είναι τα V/m. Κατά αντιστοιχία με τη σχέση (2.15) όταν υπάρχει πλήθος σημειακών φορτίων n , η ένταση ορίζεται ως:

$$\vec{E} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \sum_{m=1}^n \frac{Q_m}{r_{q,m}^2} \cdot \hat{r}_{0-q,m} \quad (2.18)$$

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε συγκεκριμένες διατάξεις όπως αυτές του ευθύγραμμου φορτισμένου αγωγού και της επίπεδης φορτισμένης πλάκας. Έστω ένας αγωγός απείρου μήκους σταθερής γραμμικής πυκνότητας φορτίου ίσης με ρ_L και σε απόσταση d από τον άξονα (σχήμα 2.12), υπολογίζεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σύμφωνα με τη σχέση (2.19):

$$d\vec{E} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\rho_L \cdot dl}{r^2} \cdot \hat{r}_0 \quad (2.19)$$

Από το σχήμα φαίνεται πως η ένταση αναλύεται σε δύο συνιστώσες $d\vec{E}_x$ και $d\vec{E}_y$. Αποδεικνύεται ότι $\vec{E}_y = 0$ και

$$\vec{E}_x = \frac{\rho_L}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot d} \quad (2.20)$$

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην περίπτωση του ευθύγραμμου αγωγού απείρου μήκους είναι κάθετη σε αυτόν και είναι ανάλογη της γραμμικής πυκνότητας του φορτίου ρ_L και αντιστρόφως ανάλογη από τη διηλεκτρική σταθερά ε του υλικού και από την απόσταση d του αγωγού. Δηλαδή μόνο από την προβολή του σημείου A

πάνω στον αγωγό και όχι την απόσταση από το στοιχειώδες τμήμα του αγωγού που εξετάζεται κάθε φορά.

Στην περίπτωση της επίπεδης φορτισμένης πλάκας με σταθερή επιφανειακή πυκνότητα φορτίου ρ_s η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση d από την επιφάνεια (σχήμα 2.13) υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση 2.20.

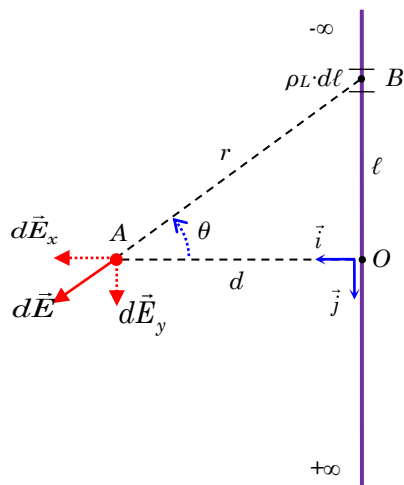
$$d\vec{E} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\rho_s \cdot dS}{r^2} \cdot \hat{r}_0 \quad (2.21)$$

Από το σχήμα φαίνεται πως η ένταση αναλύεται σε δύο συνιστώσες $d\vec{E}_z$ και $d\vec{E}_a$. Αποδεικνύεται ότι $\vec{E}_a = 0$ και

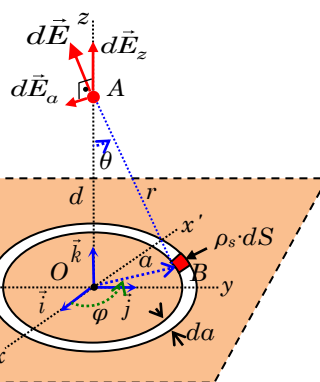
$$\vec{E}_z = -\frac{\rho_s}{2 \cdot \varepsilon} \cdot \vec{k} \quad (2.22)$$

Συμπεραίνεται ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην περίπτωση της επίπεδης φορτισμένης πλάκας είναι σταθερή σε όλο το χώρο, μεταβάλλει φορά μόνο στο επίπεδο και είναι ανάλογη της επιφανειακής πυκνότητας του φορτίου.

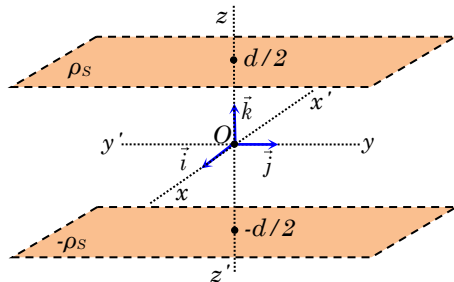
Υποπερίπτωση αυτής της διάταξης αποτελούν δύο αντίθετα φορτισμένες επίπεδες επιφάνειες, επειδή αποτελεί μία προσομοίωση ενός πυκνωτή (σχήμα 2.14). Σε αυτήνη διάταξη αποδεικνύεται ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου εξωτερικά των επιφα-



Σχήμα 2.12: Υπολογισμός έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε σημείο στοιχειώδους τμήματος αγωγού απείρου μήκους.



Σχήμα 2.13: Υπολογισμός έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε σημείο στοιχειώδους δακτυλίου ακτίνας a.

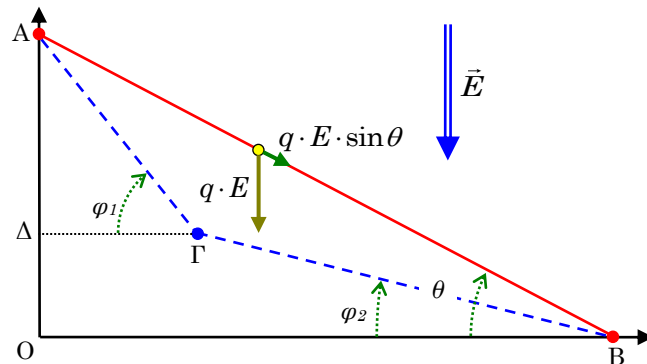


Σχήμα 2.14: Ένταση μεταξύ δύο φορτισμένων επιπέδων

νειών (φορτισμένων πλακών) είναι ίση με μηδέν, ενώ η ένταση ενδιάμεσα είναι σταθερή και ίση με ρ_s/ϵ [7, κεφ.3].

2.2.3 Ηλεκτρικό δυναμικό και ηλεκτρική τάση

Βοηθητικό μέγεθος για τον ορισμό της ηλεκτρικής τάσης αποτελεί το έργο. Ισχύει ότι σε ένα φορτίο q , που κινείται εντός ενός ομογενούς ηλεκτροστατικού πεδίου έντασης \vec{E} από τη θέση Α στη θέση Β, ασκείται μία ηλεκτρική δύναμη με μέτρο ίσο με $q \cdot E$, η οποία παράγει ή καταναλώνει έργο που δίνεται ή κερδίζεται από το πεδίο (σχήμα 2.15), όπως φαίνεται στη σχέση:



Σχήμα 2.15: Εύρεση έργου εντός ομογενούς ηλεκτροστατικού πεδίου

$$W_{A \rightarrow B} = \vec{F} \cdot \vec{AB} = q \cdot E \cdot \ell_{AB} \cdot \sin \theta = q \cdot E \cdot (OA) \quad (2.23)$$

Αποδεικνύεται ότι το έργο της ηλεκτρικής δύναμης που μετακινεί το ηλεκτρικό φορτίο μεταξύ δύο θέσεων δεν εξαρτάται από τη διαδρομή που ακολουθεί, αλλά μόνο από την αρχική και την τελική θέση. Το ηλεκτροστατικό πεδίο είναι εκείνο που παρέχει ή δαπανά έργο και έχει αντίστοιχα απώλεια ή αύξηση της ηλεκτροστατικής του ενέργειας. Εάν ένα φορτίο ξεκινήσει από ένα σημείο και καταλήξει στο ίδιο μέσω μίας κλειστής διαδρομής, τότε η ενέργεια του πεδίου παραμένει σταθερή και εξαιτίας αυτής της ιδιότητας το πεδίο λέγεται συντηρητικό.

Ηλεκτρική τάση V_{AB} ή $V_{A,B}$ μεταξύ δύο σημείων Α και Β καλείται το ανά μονάδα φορτίου έργο W_{AB} που επιτελείται κατά τη μετακίνηση του φορτίου q από τη θέση Α στη θέση Β:

$$V_{AB} = V_{A,B} = \frac{W_{A \rightarrow B}}{q} = \frac{W_{AB}}{q} \quad (2.24)$$

Η ηλεκτρική τάση είναι μονόμετρο μέγεθος. Επίσης, όπως και το έργο, εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική θέση και όχι από τη διαδρομή μεταξύ Α και Β. Ακόμη είναι ανεξάρτητη από το πρόσημο του φορτίου, ενώ το έργο λαμβάνεται ως θετικό, όταν παράγεται από την ενέργεια του πεδίου και αρνητικό, όταν λαμβάνεται ενέργεια από το εξωτερικό περιβάλλον για τη μετακίνηση του φορτίου από το Α στο Β. Μονάδες μέτρησης της τάσης στο S.I. είναι:

$$[V_{AB}] = \frac{J}{C} = \frac{N \cdot m}{C} = \frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^3} = V = Volt \quad (2.25)$$

Η ηλεκτρική τάση V_{AB} συνδέεται με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} ως εξής:

$$V_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.26)$$

Όταν το φορτίο επιστρέφει στη θέση από την οποία άρχισε τη μετακίνηση, δηλαδή κινείται από τη θέση A στη θέση A, τότε ισχύει:

$$V_{AA} = \int_A^A \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \Rightarrow \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (2.27)$$

Η σχέση (2.27) εκφράζει την ιδιότητα των αστρόβιλων πεδίων, ότι το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της έντασης \vec{E} του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος μίας κλειστής διαδρομής C, είναι ίσο με το μηδέν. Από αυτήν την ιδιότητα προκύπτει και ότι η ηλεκτρική τάση V_{AB} είναι ίση και αντίθετη με την ηλεκτρική τάση V_{BA} . Επιπλέον εάν υπάρχουν πολλά σημεία ενδιάμεσα της κλειστής διαδρομής προκύπτει και ο νόμος των τάσεων, γνωστός και ως 2^{ος} νόμος του Kirchhoff, που λέει πως κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής το άθροισμα όλων των τάσεων είναι ίσο με μηδέν:

$$V_{12} + V_{23} + \dots + V_{n-1,n} + V_{n,1} = 0 \quad (2.28)$$

Δυναμικό $\varphi_{MO}(x,y,z)$ ενός σημείου M(x,y,z) καλείται το ανά μονάδα φορτίου έργο που επιτελείται από το πεδίο κατά τη μετακίνηση αυτού του μοναδιαίου δοκιμαστικού φορτίου από το σημείο M μέχρι ένα σημείο O που θεωρείται σημείο αναφοράς και είναι σταθερό και ίδιο για όλα τα υπόλοιπα σημεία του πεδίου.

$$\varphi_{MO} = V_{MO} = \frac{W_{M \rightarrow O}}{q} = \frac{W_{MO}}{q} \quad (2.29)$$

Η έννοια του απόλυτου δυναμικού είναι παρόμοια με την προηγούμενη μόνο που σε αυτήν την περίπτωση το σημείο αναφοράς O τοποθετείται στο άπειρο. Μονάδα μέτρησης και των δύο δυναμικών είναι τα *Volt*.

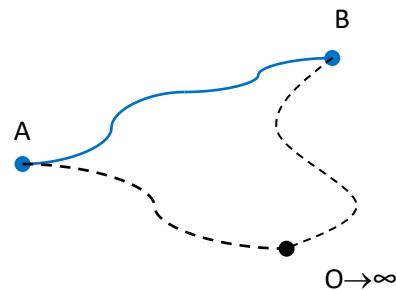
Υπάρχουν σχέσεις που συνδέουν το δυναμικό με την ηλεκτρική τάση. Με βάση το σχήμα 2.16 ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$V_{AB} = V_{AO} + V_{OB} = V_{AO} - V_{BO} \quad (2.30)$$

$$\varphi_A = V_{AO} \text{ και } \varphi_B = V_{BO} \quad (2.31)$$

$$V_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \quad (2.32)$$

$$\Delta\varphi_{AB} = -V_{AB} \quad (2.33)$$



Σχήμα 2.16: Συσχέτιση του δυναμικού με την ηλεκτρική τάση

Προκύπτει δηλαδή ότι η ηλεκτρική τάση από ένα σημείο του ηλεκτροστατικού πεδίου σε ένα άλλο είναι ίση και αντίθετη με τη διαφορά των απόλυτων δυναμικών του αρχικού και του τελικού σημείου, χωρίς να επηρεάζεται από τη θέση του σημείου αναφοράς των δυναμικών [7, κεφ.4].

2.2.4 Επίδραση ηλεκτροστατικού πεδίου στην ύλη

2.2.4.1 Πόλωση

Στη φύση όλα τα υλικά παρουσιάζουν κάποια αγωγιμότητα και κάποια διηλεκτρικότητα, αφού δεν υπάρχουν τέλει μονωτές. Ένα υλικό καλείται διηλεκτρικό όταν η ιδιότητα της διηλεκτρικότητας υπερσχύει της αγωγιμότητας και παρουσιάζει ηλεκτροστατικό πεδίο και όχι ροή ηλεκτρικού φορτίου, εφόσον όλα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι δεσμευμένα. Όταν το διηλεκτρικό υλικό βρεθεί μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο, τα δεσμευμένα φορτία μπορούν και πραγματοποιούν μικρές ελαστικές μετατοπίσεις, τα μεν θετικά μετατοπίζονται με κατεύθυνση ίδια με αυτήν της έντασης του πεδίου, τα δε αρνητικά με αντίθετη κατεύθυνση. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται ένα μικρός διαχωρισμός του θετικού από το αρνητικό δεσμευμένο ηλεκτρικό φορτίο, ο οποίος ονομάζεται πόλωση του διηλεκτρικού υλικού, στην οποία όμως το υλικό παραμένει να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο ,δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό δίπολο. Ανάλογα με τον τρόπο που προκύπτει ο σχηματισμός αυτού του ηλεκτρικού διπόλου διακρίνονται τρία είδη πόλωσης:

- Ηλεκτρική πόλωση, με παραμόρφωση των ηλεκτρικών τροχιών, η οποία συμβαίνει σε όλα τα υλικά όταν βρεθούν μέσα σε ηλεκτροστατικό πεδίο
- Ιοντική πόλωση, με μετατόπιση ιόντων και κατιόντων, η οποία συμβαίνει σε στερεά που διαθέτουν ιοντικό κρυσταλλικό πλέγμα
- Διπολική ή μοριακή πόλωση, που δημιουργείται σε μόρια χημικών ενώσεων που αποτελούνται από τουλάχιστον δύο διαφορετικά στοιχεία που ενώνονται με ομοιοπολικούς δεσμούς, οι οποίοι όμως έλκονται περισσότερο από τον πιο ισχυρό πυρήνα μετατρέποντας το κάθε μόριο ξεχωριστά σε ένα ηλεκτρικό δίπολο.

Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις, η απομάκρυνση από το ηλεκτροστατικό πεδίο προκαλεί παύση της πόλωσης και επαναφορά των δεσμευμένων φορτίων στις θέσεις τους, με εξαίρεση κάποια υλικά που ονομάζονται σιδηροηλεκτρικά και διατηρούν τον προσανατολισμό ακόμα και μετά την απομάκρυνση από το πεδίο. Κινητήριο δύναμη της πόλωσης αποτελεί η δημιουργία ηλεκτρικής ροπής εντός του διπόλου από τη δύναμη που ασκεί το ηλεκτρικό πεδίο στο δίπολο και εκμηδενίζει σχεδόν τις δυνάμεις Coulomb που υπάρχουν μεταξύ των μορίων του διπόλου, προκαλώντας έτσι τη στρέψη του [7, κεφ.5].

2.2.4.2 Διηλεκτρική μετατόπιση

Για τον προσδιορισμό του μεγέθους της πόλωσης των διηλεκτρικών υλικών, χρησιμοποιείται ένα διανυσματικό μέγεθος που καλείται διηλεκτρική μετατόπιση και συμβολίζεται με \vec{D} . Σε μία διάταξη με δύο παράλληλα επίπεδα ομοιόμορφα φορτισμένα με επιφανειακή πυκνότητα ρ_s και $-\rho_s$ αντίστοιχα(σχήμα 2.17). Σε αυτήν

την περίπτωση η ένωση του ηλεκτρικού πεδίου υπολογίζεται όπως έχει προαναφερθεί με τη σχέση:

$$\vec{E}_a = \frac{\rho_s}{\epsilon_0} \cdot (-\vec{k}) \quad (2.34)$$

Εάν όμως τοποθετηθεί ενδιάμεσα των επιπέδων ένα τεμάχιο γραμμικού, ισότροπου και ομογενούς διηλεκτρικού υλικού σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r πάχους d , τότε αυτό θα πολωθεί (σχήμα 2.18). Το μέγεθος της πόλωσης αυτής δίνεται από τη σχέση:

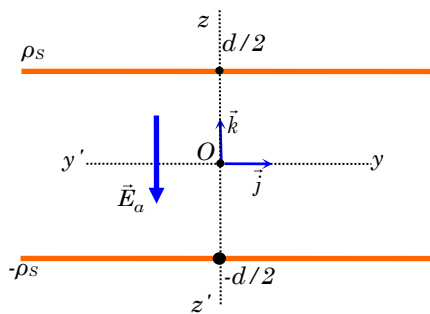
$$\vec{P} = \rho_{s\delta} \cdot (-\vec{k}) \quad (2.35)$$

Η τοποθέτηση του διηλεκτρικού υλικού έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο κενό, επειδή το διηλεκτρικό υλικό αναπτύσσει ένα αντίθετο ηλεκτρικό πεδίο. Ωστόσο αποδεικνύεται πως η διηλεκτρική μετατόπιση παραμένει σταθερή είτε υπάρχει διηλεκτρικό υλικό είτε όχι, εφόσον η επιφανειακή πυκνότητα του Φορτίου ρ_s είναι η ίδια. Σε οποιαδήποτε διάταξη η διηλεκτρική μετατόπιση \vec{D} συνδέεται με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} και με το διάνυσμα πόλωσης του ηλεκτρικού πεδίου \vec{P} σύμφωνα με τη σχέση [7, κεφ.5].:

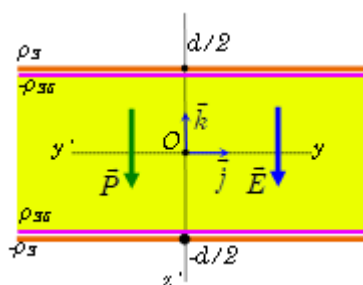
$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad (2.36)$$

2.2.4.3 Ηλεκτρική ροή

Το πλήθος των δυναμικών γραμμών της διηλεκτρικής μετατόπισης που διέρχονται ανά μονάδα επιφάνειας είναι ανάλογο της διηλεκτρικής μετατόπισης και εκφράζει το ηλεκτρικό φορτίο από το οποίο πηγάζουν οι γραμμές ροής. Σε αυτό το σημείο εισάγεται το μέγεθος της ηλεκτρικής ροής που εξυπηρετεί την ποσοτικοποίηση των ανωτέρω. Η στοιχειώδης ηλεκτρική ροή $d\psi$ ορίζεται ως το εσωτερικό γινόμενο της



Σχήμα 2.17: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ δύο παράλληλων επιπέδων .



Σχήμα 2.18: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ δύο παράλληλων επιπέδων με την προσθήκη διηλεκτρικού υλικού.

διηλεκτρικής μετατόπισης \vec{D} που διέρχεται από μία στοιχειώδη επιφάνεια dS επί το διάνυσμα \vec{dS} που ορίζεται από το γινόμενο της στοιχειώδους επιφάνειας dS με το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα \hat{n}_0 επί της επιφάνειας αυτής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.19 και υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση.

$$d\Psi = \vec{D} \cdot \vec{dS} = \vec{D} \cdot \hat{n}_0 \cdot dS = D \cdot \cos \varphi \cdot dS \quad (2.36)$$

Αντίστοιχα η συνολική ηλεκτρική ροή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Psi = \iint_S d\Psi = \iint_S \vec{D} \cdot \vec{dS} = \iint_S \vec{D} \cdot \hat{n}_0 \cdot dS = \iint_S D \cdot \cos \varphi \cdot dS \quad (2.37)$$

Η ηλεκτρική ροή είναι ένα βαθμωτό μέγεθος και έχει μονάδες μέτρησης στο S.I. τα Coulomb [C]. Επίσης μπορεί να έχει θετικό ή αρνητικό πρόσημο ανάλογα με το αν οι γραμμές ροής κατευθύνονται από την αρνητική προς την θετική όψη της επιφάνειας ή το αντίθετο αντίστοιχα. Επειδή όμως η ηλεκτρική ροή Ψ εκφράζει τα πραγματικά ηλεκτρικά φορτία από τα οποία προέρχονται ή καταλήγουν οι γραμμές ροής η διηλεκτρική μετατόπιση \vec{D} μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι η πυκνότητα ροής της ηλεκτρικής διέγερσης [7, κεφ.5].

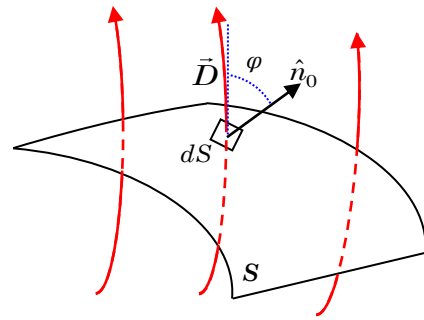
2.2.4.4 Νόμος του Gauss στο ηλεκτρικό πεδίο

Η ένταση ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} για ένα σημειακό φορτίο Q που βρίσκεται στο εσωτερικό γραμμικού, ισότροπου, ομογενούς μονωτικού υλικού σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r σε απόσταση r υπολογίζεται ως εξής:

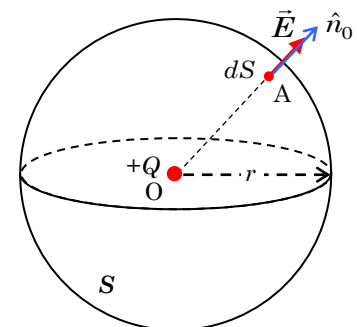
$$\vec{E} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \hat{r}_0 \quad (2.38)$$

Για να βρεθεί η ηλεκτρική ροή στην επιφάνεια της κλειστής σφαίρας με κέντρο Q και ακτίνα r μέσω της διηλεκτρικής μετατόπισης και έντασης χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$\begin{aligned} \Psi &= \iint_S d\Psi = \iint_S \vec{D} \cdot \vec{dS} = \iint_S \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot \hat{n}_0 \cdot dS = \iint_S \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \hat{r}_0 \cdot \hat{n}_0 \cdot dS \\ &= \iint_S \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot 1 \cdot dS \Rightarrow \\ \Psi &= \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \iint_S dS = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \Rightarrow \Psi = \iint_S \vec{D} \cdot \vec{dS} = Q \end{aligned} \quad (2.39)$$

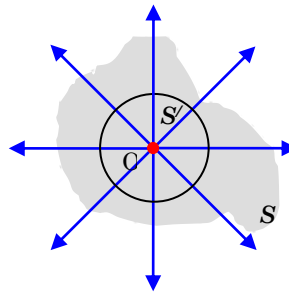


Σχήμα 2.19: Ορισμός στοιχειώδους ηλεκτρικής ροής $d\Psi$

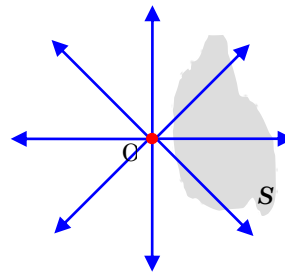


Σχήμα 2.20: Νόμος Gauss για σημειακό φορτίο.

Εάν η κλειστή επιφάνεια S περικλείει το φορτίο Q και έχει τυχαία μορφή (σχήμα 2.21), τότε μπορεί να σχεδιαστεί μία σφαίρα με κέντρο O και ακτίνα τέτοια ώστε η επιφάνεια S' να περικλείεται από την S με αποτέλεσμα η ηλεκτρική ροή Ψ για την επιφάνεια S' να ταυτίζεται με αυτήν της S και να μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση 2.39 που αναφέρεται σε επιφάνεια σφαίρας. Εάν όμως το φορτίο Q βρίσκεται εκτός της κλειστής επιφάνειας S όπως διακρίνεται και στο σχήμα 2.22, τότε η ηλεκτρική ροή είτε δεν τη διασχίζει, είτε όση ηλεκτρική ροή εισέρχεται στην επιφάνεια τόση εξέρχεται. Η σχέση λοιπόν 2.39 λέει ότι το σημειακό φορτίο Q ισούται με την ηλεκτρική ροή που το περιβάλλει. Εάν όμως δεν το περιβάλλει και το φορτίο βρίσκεται εκτός αυτής της επιφάνειας τότε η ηλεκτρική ροή της επιφάνειας είναι μηδέν.



Σχήμα 2.21: Ηλεκτρική ροή σε τυχαία κλειστή επιφάνεια S που περι-κλείει το σημειακό φορτίο Q .



Σχήμα 2.22: Ηλεκτρική ροή που δεν περικλείει το σημειακό φορτίο Q .

Στην περίπτωση που σε ένα χώρο βρίσκονται πολλά σημειακά φορτία, τότε η ηλεκτρική ροή που διαπερνά μία συγκεκριμένη επιφάνεια που έχει οριστεί και περιλαμβάνει κάποια ή και όλα

Τα σημειακά φορτία, μπορεί να υπολογιστεί ως το άθροισμα των επιμέρους ηλεκτρικών ροών των σημειακών φορτίων. Όσα όμως βρίσκονται εκτός της υπό μελέτης επιφάνειας, δεν προκαλούν ηλεκτρική ροή στην επιφάνεια αυτή. Έτσι η συνολική ηλεκτρική ροή για την επιφάνεια εκφράζεται μέσω της παρακάτω σχέσης, η οποία αποτελεί μία ολοκληρωτική μορφή για τον νόμο του Gauss[7, κεφ.5].

$$\begin{aligned} \Psi &= \sum_{i \in S} \Psi_{Q_i} + \sum_{dq_i \in S} \Psi_{dq_i} \Rightarrow \Psi = \sum_{i \in S} \oiint_S \vec{D}_{Q_i} \cdot \vec{dS} + \sum_{dq_i \in S} \oiint_S \vec{D}_{dq_i} \cdot \vec{dS} = \sum_{i \in S} Q_i + \sum_{dq_i \in S} dq_{-i} \\ &= Q_{tot \text{ εντός του } V} \Rightarrow \\ \Psi &= \oiint_S \vec{D} \cdot \vec{dS} = Q_{tot, V} = \iiint_V \rho_V \cdot dV \end{aligned} \quad (2.40)$$

2.2.5 Το ηλεκτρικό στοιχείο του πυκνωτή

Η ανάγκη για συσσώρευση ηλεκτρικού φορτίου σε αρκετές σύγχρονες ηλεκτρικές συσκευές, προκειμένου να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία τους, οδήγησε στη δημιουργία του ηλεκτρικού στοιχείου που ονομάζεται πυκνωτής.

2.2.5.1 Ορισμός πυκνωτή

Για την απόδοση του ακριβή ορισμού του πυκνωτή απαιτείται αρχικά η επεξήγηση των όρων ηλεκτρόδιο και κλειστό σύστημα ηλεκτροδίων. Έτσι, **ηλεκτρόδιο** είναι ένα αγωγίμο σώμα, που αποτελεί τμήμα ενός ηλεκτρικού πεδίου και χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο ηλεκτρικό δυναμικό

και **κλειστό σύστημα ηλεκτροδίων** καλείται εκείνο το σύστημα στο οποίο όλες οι δυναμικές γραμμές ξεκινούν από ηλεκτρόδια και καταλήγουν πάλι σε ηλεκτρόδια, δηλαδή δεν υπάρχουν δυναμικές γραμμές που να καταλήγουν στο άπειρο. Το ηλεκτροστατικό πεδίο που σχηματίζεται σ' αυτό το σύστημα καλείται *αυτοτελές*. Ισοδύναμα το συνολικό φορτίο όλων των ηλεκτροδίων είναι μηδέν.

Πυκνωτής είναι ένα κλειστό σύστημα ηλεκτροδίων που σχηματίζεται από δύο ηλεκτρόδια με ίσα αλλά αντίθετα φορτία. **Οπλισμοί** του πυκνωτή καλούνται τα ηλεκτρόδια. Ενδιάμεσα από τους οπλισμούς μπορεί να είναι τοποθετημένο και κάποιο διηλεκτρικό υλικό για αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης φορτίου του πυκνωτή, ένα μέγεθος που προσδιορίζεται από τη χωρητικότητα του πυκνωτή [7,κεφ.6].

2.2.5.2 Χωρητικότητα πυκνωτή

Σε έναν πυκνωτή που αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια A και B με ίσα και αντίθετα ηλεκτρικά φορτία υφίσταται διαφορά δυναμικού μεταξύ των A και B που ισούται με:

$$V_{AB} = \phi_A - \phi_B \quad (2.41)$$

Αν C_A και C_B οι χωρητικότητες των ηλεκτροδίων A και B αντίστοιχα ισχύει:

$$C_A = \frac{Q}{\phi_A} \Rightarrow \phi_A = \frac{Q}{C_A} \quad (2.42)$$

$$C_B = \frac{-Q}{\phi_B} \Rightarrow \phi_B = -\frac{Q}{C_B} \quad (2.43)$$

Έτσι η ηλεκτρική τάση της σχέσης 2.41 γίνεται:

$$V_{AB} = \phi_A - \phi_B = \frac{Q}{C_A} - \left(-\frac{Q}{C_B}\right) = Q \cdot \left(\frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_B}\right) = Q \cdot \frac{C_A + C_B}{C_A \cdot C_B} \quad (2.44)$$

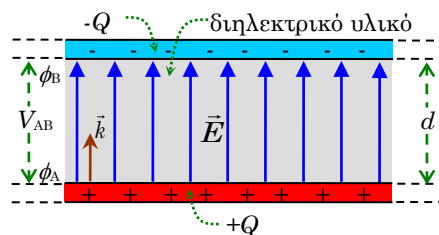
Προκύπτει λοιπόν ο ορισμός της χωρητικότητας του πυκνωτή ως ο λόγος του ηλεκτρικού φορτίου Q προς την ηλεκτρική τάση V_{AB} μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή. Ο λόγος αυτός είναι σταθερός και ανεξάρτητος του φορτίου Q .

$$C = \frac{Q}{V_{AB}} \quad (2.45)$$

Χαρακτηριστικές διατάξεις πυκνωτών είναι ο επίπεδος, ο σφαιρικός και ο κυλινδρικός, για κάθε μία από τις οποίες γίνεται διαφορετικός υπολογισμός της χωρητικότητάς τους.

→ Επίπεδος πυκνωτής

Πρόκειται για έναν πυκνωτή που έχει για οπλισμούς δύο παράλληλες πλάκες που βρίσκονται απέναντι σε απόσταση d και έχουν διατομή S (σχήμα 2.23). Ανάμεσα στους δύο οπλισμούς είναι τοποθετημένο γραμμικό, ομογενές, ισότροπο σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r . Η ένταση του ηλεκτρικού



πεδίου ανάμεσα σε δύο ίσα και αντίθετα φορτισμένα **Σχήμα 2.23:** διάταξη τομής επίπεδου παράλληλα επίπεδα είναι σταθερή παντού. πυκνωτή.

Ισούται με το πηλίκο της επιφανειακής πυκνότητας φορτίου ρ_S προς την απόλυτη διηλεκτρική σταθερά ϵ και με φορά από το θετικά φορτισμένο επίπεδο προς το αρνητικό. Εκτός της ενδιάμεσης περιοχής των επιπέδων η ένταση είναι μηδενική. Στην παρούσα περίπτωση η επιφανειακή πυκνότητα ρ_S είναι ίση με το πηλίκο του συνολικού φορτίου Q προς το συνολικό εμβαδό S του κάθε οπλισμού, οπότε η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι ίση με:

$$\vec{E} = \frac{\rho_S}{\epsilon} \cdot \vec{k} = \frac{Q}{\epsilon \cdot S} \cdot \vec{k} = \frac{Q}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot S} \cdot \vec{k} \quad (2.46)$$

Η ηλεκτρική τάση μεταξύ του θετικού Α και του αρνητικού οπλισμού Β υπολογίζεται απο τη σχέση 2.26 ως εξής:

$$V_{AB} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{\ell} \Rightarrow V_{AB} = \int_A^B \frac{Q}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot S} \cdot \vec{k} \cdot d\vec{\ell} \cdot \vec{k} \Rightarrow$$

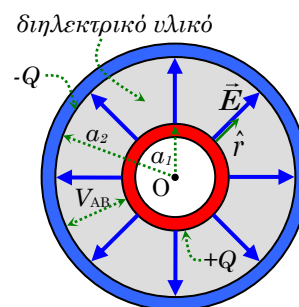
$$V_{AB} = \frac{Q}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot S} \cdot \int_A^B d\ell \Rightarrow V_{AB} = \frac{Q}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot S} \cdot d \quad (2.47)$$

Με βάση τη σχέση 2.45 της χωρητικότητας του πυκνωτή και τη σχέση 2.47 της τάσης προκύπτει η χωρητικότητα του επίπεδου πυκνωτή να εξαρτάται μόνο από το εμβαδόν του οπλισμού, την απόσταση μεταξύ των οπλισμών και από το διηλεκτρικό υλικό που χρησιμοποιείται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$C = \frac{Q}{V_{AB}} \Rightarrow C = \frac{Q}{\frac{Q}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot S} \cdot d} \Rightarrow C = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d} \quad (2.48)$$

→ Σφαιρικός πυκνωτής

Πρόκειται για έναν πυκνωτή που έχει για οπλισμούς δύο σφαιρικές επιφάνειες με κοινό κέντρο Ο και ακτίνες a_1 και a_2 αντίστοιχα (σχήμα 2.24). Ανάμεσα στους δύο οπλισμούς είναι τοποθετημένο γραμμικό, ομογενές, ισότροπο σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r . Η ένταση του πεδίου περιορίζεται ανάμεσα στις δύο σφαιρικές επιφάνειες και έχει μόνο ακτινική συνιστώσα στο σύστημα σφαιρικών συντεταγμένων με κέντρο Ο και δίνεται από την παρακάτω σχέση:



Σχήμα 2.24: διάταξη τομής σφαιρικού και κυλινδρικού πυκνωτή.

$$\vec{E} = \frac{\rho_{S1}}{\epsilon} \cdot \frac{a_1^2}{r^2} \cdot \hat{r} = \frac{\rho_{S1}}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot a_1^2}{r^2} \cdot \hat{r} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \hat{r}$$

$$= \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \hat{r} \quad (2.49)$$

Με βάση τη σχέση υπολογισμού της τάσης και τη σχέση 2.26 και κατάλληλους υπολογισμούς ισχύει:

$$V_{AB} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{a_2 - a_1}{a_1 \cdot a_2} \quad (2.50)$$

Με συνδυασμό της έντασης \vec{E} και της τάσης V_{AB} στη σχέση 2.45 προκύπτει η χωρητικότητα του σφαιρικού πυκνωτή να εξαρτάται από τις ακτίνες των δύο σφαιρικών οπλισμών και από το διηλεκτρικό υλικό που υπάρχει μεταξύ των οπλισμών ως εξής:

$$C = \frac{Q}{V_{AB}} \Rightarrow C = \frac{Q}{\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{a_2 - a_1}{a_1 \cdot a_2}} \Rightarrow C = 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{a_1 \cdot a_2}{a_2 - a_1} \quad (2.51)$$

→ Κυλινδρικός πυκνωτής

Πρόκειται για έναν πυκνωτή που έχει για οπλισμούς δύο κυλινδρικές επιφάνειες με κοινό κέντρο O , ακτίνες a_1 και a_2 αντίστοιχα και ύψους h , η τομή του οποίου είναι όμοια με αυτή του σφαιρικού πυκνωτή (σχήμα 2.24) Ανάμεσα στους δύο οπλισμούς είναι και πάλι τοποθετημένο γραμμικό, ομογενές, ισότροπο σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r . Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και η τάση δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\vec{E} = \frac{\rho_{S1}}{\epsilon} \cdot \frac{a_1}{r} \cdot \hat{r} = \frac{\rho_{S1}}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \epsilon} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot a_1 \cdot h}{r} \cdot \hat{r} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{\hat{r}}{r} \quad (2.52)$$

$$V_{AB} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0} \cdot \ln \frac{a_2}{a_1} \quad (2.53)$$

Με συνδυασμό της έντασης \vec{E} και της τάσης V_{AB} στη σχέση 2.45 προκύπτει η χωρητικότητα του κυλινδρικού πυκνωτή να εξαρτάται από τις ακτίνες των δύο κυλινδρικών οπλισμών, από το διηλεκτρικό υλικό που υπάρχει μεταξύ τους, με διαφοροποίηση από τον σφαιρικό πυκνωτή ότι σε αυτήν την περίπτωση η χωρητικότητα εξαρτάται και από το ύψος h του κυλινδρικού πυκνωτή ως εξής [7,κεφ.6]:

$$C = \frac{Q}{V_{AB}} \Rightarrow C = \frac{Q}{\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0} \cdot \ln \frac{a_2}{a_1}} \Rightarrow C = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0}{\ln \left(\frac{a_2}{a_1} \right)} \quad (2.54)$$

2.2.5.3 Συνδεσμολογίες πυκνωτών

Πρακτικά ένας πυκνωτής χρησιμοποιείται σπάνια μόνος του. Τις περισσότερες φορές προκύπτει η ανάγκη για μεγάλη χωρητικότητα ή μεγάλη τάση λειτουργίας, οπότε γίνεται χρήση συστημάτων πυκνωτών, δηλαδή διατάξεις που αποτελούνται από πυκνωτές κατάλληλα συνδεδεμένους μεταξύ τους. Οι τρόποι σύνδεσης των πυκνωτών είναι κυρίως δύο, καθώς υπάρχει και ένας τρίτος που αποτελεί το συνδυασμό των δύο προηγούμενων.

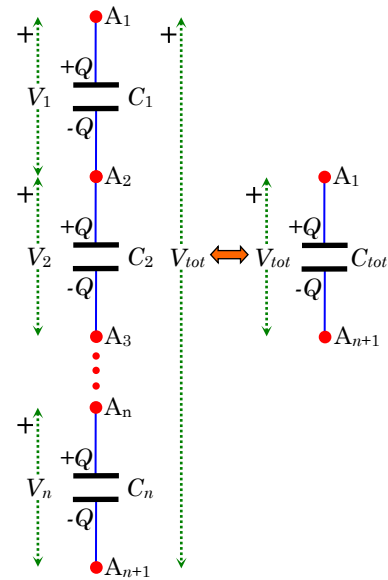
→ Σύνδεση σειράς

Ένα σύστημα πυκνωτών βρίσκεται σε σειρά, όταν ο δεύτερος οπλισμός του 1^{ου} πυκνωτή συνδέεται αγωγικά με τον πρώτο του 2^{ου} πυκνωτή, όταν ο δεύτερος οπλισμός του 2^{ου} πυκνωτή συνδέεται αγωγικά με τον πρώτο του 3^{ου} πυκνωτή, κλπ.(σχήμα 2.25). Το φορτίο καθενός εκ των οπλισμών των πυκνωτών της σύνδεσης σειράς είναι το ίδιο κατ' απόλυτη τιμή με το φορτίο του συστήματος Q , δηλαδή:

$$Q = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n \quad (2.55)$$

Επίσης η συνολική τάση στους ακροδέκτες του συστήματος V_{tot} , ισούται με το άθροισμα των τάσεων των πυκνωτών, δηλαδή:

$$\begin{aligned} V_{A_1, A_{n+1}} &= V_{A_1, A_2} \\ &\quad + V_{A_2, A_3} + \dots + V_{A_n, A_{n+1}} \\ &\Leftrightarrow \\ V_{tot} &= V_1 + V_2 + \dots + V_n \end{aligned} \quad (2.56)$$



Σχήμα 2.25: Συνδεσμολογία σειράς n πυκνωτών.

Από τον ορισμό της χωρητικότητας πυκνωτή και με τη σχέση περί ισοδυναμίας τάσεων, προκύπτει η ισοδύναμη χωρητικότητα του πυκνωτή:

$$\frac{Q}{C_{tot}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \dots + \frac{Q}{C_n} \Rightarrow \frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2.57)$$

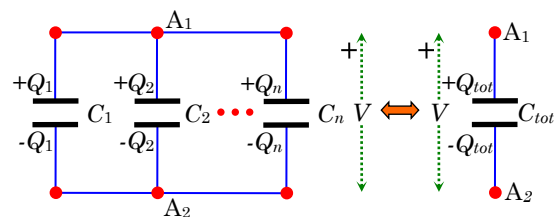
Προκύπτει επίσης ότι ισοδύναμη χωρητικότητα του συστήματος πυκνωτών είναι μικρότερη από τη μικρότερη χωρητικότητα όλων των εμπλεκόμενων πυκνωτών.

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \geq \max_{\forall i} \left\{ \frac{1}{C_i} \right\} = \frac{1}{\min_{\forall i} \{C_i\}} \Rightarrow C_{tot} \leq \min_{\forall i} \{C_i\} \quad (2.58)$$

→ Παράλληλη σύνδεση

Ένα σύστημα πυκνωτών βρίσκεται σε παράλληλη σύνδεση, όταν οι οπλισμοί τους χωρίζονται σε δύο ομάδες και η κάθε ομάδα συνδέεται με ένα κοινό ακροδέκτη (σχήμα 2.26). Στην περίπτωση αυτή το φορτίο του συστήματος Q_{tot} , είναι ίσο με το άθροισμα των επιμέρους φορτίων των πυκνωτών (αρχή διατήρησης φορτίου):

$$Q_{tot} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (2.59)$$



Σχήμα 2.26: Παράλληλη συνδεσμολογία n πυκνωτών.

Επίσης η τάση V στους ακροδέκτες του συστήματος είναι κοινή και ίση με τις τάσεις στους ακροδέκτες όλων των επιμέρους πυκνωτών του συστήματος, δηλαδή:

$$V = V_{A_1, A_2} = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (2.60)$$

Από τον ορισμό της χωρητικότητας πυκνωτή και με τη σχέση περί αρχής διατήρησης φορτίου, η ισοδύναμη χωρητικότητα του πυκνωτή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$C_{tot} \cdot V = C_1 \cdot V + C_2 \cdot V + \dots + C_n \cdot V \Rightarrow C_{tot} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (2.61)$$

Προκύπτει επίσης ότι ισοδύναμη χωρητικότητα του συστήματος πυκνωτών είναι μεγαλύτερη από τη μεγαλύτερη χωρητικότητα όλων των εμπλεκόμενων πυκνωτών:

$$C_{tot} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \geq \max\{C_i\} \quad (2.62)$$

→ Μικτή σύνδεση

Ένα σύστημα πυκνωτών βρίσκεται σε μικτή σύνδεση, όταν αποτελείται από τμήματα που περιέχουν πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά ή παράλληλα και οι ισοδύναμες χωρητικότητες των τμημάτων αυτών επίσης συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα. Για να βρεθεί η αντίστοιχη ισοδύναμη χωρητικότητα μίας μικτής συνδεσμολογίας, βρίσκεται πρώτα η ισοδύναμη χωρητικότητα κάθε τμήματος συνδεσμολογίας σειράς ή παράλληλης και αντικαθίσταται από έναν ισοδύναμο πυκνωτή, με συνέπεια να απλοποιείται η συνδεσμολογία. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, ώσπου να βρεθεί η ισοδύναμη χωρητικότητα όλου του συστήματος [7, κεφ.6].

2.2.6 Ενέργεια & δυνάμεις ηλεκτροστατικού πεδίου

Σε κάθε ηλεκτροστατικό πεδίο εμπεριέχεται ένα ποσό δυναμικής ηλεκτροστατικής ενέργειας που οφείλεται στις αμοιβαίες δράσεις μεταξύ των φορτίων που το δημιουργούν. Έστω ότι n σημειακά φορτία $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ τοποθετούνται στα σημεία $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_n$ σε γνωστές αποστάσεις μεταξύ τους και σχηματίζουν ένα ηλεκτροστατικό πεδίο σε μονωτικό υλικό σταθερής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ . Αρχικά όλα τα φορτία Q_i είναι τοποθετημένα στο άπειρο, οπότε για να βρεθούν στις αντίστοιχες θέσεις Σ_i η ηλεκτροστατική δύναμη δαπανά έργο ($W_{\infty \rightarrow i} < 0$), κερδίζοντας έτσι το το πεδίο ποσό ενέργειας ίσο με το ποσό της ηλεκτροστατικής ενέργειας. Αντίθετα, αν η ηλεκτροστατική δύναμη παράγει έργο ($W_{\infty \rightarrow i} > 0$), τότε το πεδίο χάνει ίσο ποσό ενέργειας. Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση διαμορφώνεται τελικά η ηλεκτροστατική ενέργεια του πεδίου W_e .

$$W_e = - \sum_{i=1}^n W_{\infty \rightarrow i} \quad (2.63)$$

Στην αντίθετη περίπτωση που προαναφέρθηκε, εάν τα φορτία μετακινηθούν από τη θέση Σ_i στο άπειρο τότε η ηλεκτροστατική ενέργεια του πεδίου W_e θα είναι η εξής:

$$W_e = \sum_{i=1}^n W_{i \rightarrow \infty} \quad (2.64)$$

Στην περίπτωση που το πεδίο καταστραφεί, ξεκινούν μετατοπίσεις φορτίων που εξαρτώνται από τα υπόλοιπα φορτία με τα οποία αλληλεπιδρούν. Έτσι, για τη μετατόπιση του Q_1 του πεδίου λαμβάνει έργο:

$$W_{1 \rightarrow \infty} = Q_1 \cdot \phi'_1 = Q_1 \cdot \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{Q_2}{r_{1,2}} + \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{Q_3}{r_{1,3}} + \dots + \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{Q_n}{r_{1,n}} \right) \quad (2.65)$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι μετατοπίσεις για τα υπόλοιπα φορτία. Αθροίζοντας τις ποσότητες των έργων και με δεδομένο ότι το έργο του τελευταίου φορτίου είναι μηδέν προκύπτει ότι η ηλεκτροστατική ενέργεια του πεδίου είναι:

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{Q_i \cdot Q_j}{r_{i,j}} \quad (2.66)$$

Η παραπάνω μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική, ανάλογα με το αν η ηλεκτροστατική δύναμη παράγει ή καταναλώνει έργο αντίστοιχα.

Με δεδομένο ότι μπορεί να οριστεί το δυναμικό ϕ_i ως το δυναμικό του i -ιστού φορτίου προς όλα τα υπόλοιπα φορτία έναντι του δυναμικού ϕ'_i που αναφέρεται στο δυναμικό που προκαλούν τα υπόλοιπα $i+1$ ως n φορτία κατά την απομάκρυνση του i -ιστού φορτίου, δηλαδή:

$$\phi_i = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{Q_j}{r_{i,j}} \quad (2.67)$$

Τελικά η ηλεκτροστατική ενέργεια του πεδίου δίνεται από την παρακάτω σχέση που είναι ουσιαστικά η ίδια με την 2.66 σε πιο συμπυκνωμένη μορφή:

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \phi_i \quad (2.68)$$

Σε αυτό το σημείο, είναι χρήσιμο να αναφερθεί και η ενέργεια που αποθηκεύει ένας πυκνωτής. Έστω λοιπόν ένας πυκνωτής με δύο οπλισμούς A και B , που βρίσκονται σε απόλυτα δυναμικά ϕ_A και ϕ_B αντίστοιχα με επιφανειακή πυκνότητα ρ_{SA} και ρ_{SB} σε επιφάνεια εμβαδού S_A και S_B . Τότε η ενέργεια του πυκνωτή είναι:

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot (\phi_A - \phi_B) \Rightarrow W_e = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot V_{AB} \quad (2.69)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τη χωρητικότητα C του πυκνωτή (σχέση 2.45) προκύπτουν δύο άλλες μορφές της σχέσης 2.69:

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot V_{AB} \stackrel{Q=C \cdot V_{AB}}{\Rightarrow} W_e = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{AB}^2 \quad (2.70)$$

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot V_{AB} \stackrel{V_{AB}=Q/C}{\Rightarrow} W_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} \quad (2.71)$$

Μία προσπάθεια για προσδιορισμό των δυνάμεων ηλεκτροστατικού πεδίου με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε, βασισμένη δηλαδή στις δυνάμεις Coulomb οδηγεί σε περίπλοκες σχέσεις και έτσι

γίνεται προσέγγιση μέσω της ενέργειας του πεδίου. Έστω επιδιώκεται ο προσδιορισμός της δύναμης που ασκεί ένα σύστημα αγωγίων σωμάτων στο k -ιστό αγωγίμο σώμα. αν το k -ιστό αγωγίμο σώμα μετακινηθεί στοιχειωδώς κατά $d\ell_k$ τότε η στοιχειώδης ενεργειακή αύξηση από όλες τις ενεργειακές πηγές του συστήματος dW_S είναι ίση με το άθροισμα της στοιχειώδους μεταβολής του μηχανικού έργου του συστήματος dW , της στοιχειώδους αύξησης της αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας του πεδίου dW_e και των στοιχειωδών τυχουσών απωλειών $dW_{\text{απώλειες}}$. Δηλαδή:

$$dW_S = dW + dW_e + dW_{\text{απώλειες}} \quad (2.72)$$

Επειδή όμως το μηχανικό έργο είναι το γινόμενο της δύναμης F_k επί τη μετατόπιση $d\ell_k$ ισχύει:

$$dW = \vec{F}_k \cdot \vec{d\ell}_k \Rightarrow dW = F_k \cdot d\ell_k \Leftrightarrow F_k = \frac{dW}{d\ell_k} \quad (2.73)$$

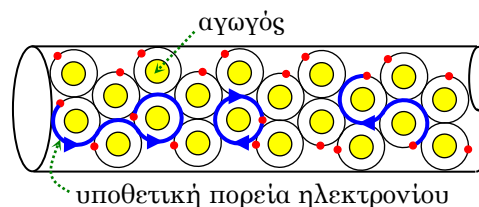
Θεωρώντας μηδενικές απώλειες και λύνοντας τη σχέση 2.72 ως προς dW , προκύπτει [7, κεφ.7]:

$$F_k = \frac{dW_S}{d\ell_k} - \frac{dW_e}{d\ell_k} \quad (2.74)$$

2.2.7 Ηλεκτρικό ρεύμα

2.2.7.1 Ορισμός ηλεκτρικού ρεύματος

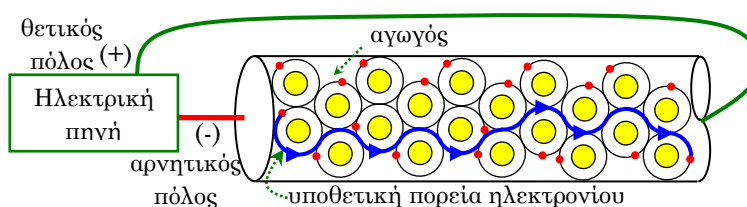
Ορισμένα στοιχεία καλούνται αγωγοί, επειδή τα άτομα αυτών των στοιχείων σταματούν ή προσλαμβάνουν ηλεκτρόνια στις εξωτερικές τροχιές με ελάχιστη δυσκολία. Τα ηλεκτρόνια αυτά που κινούνται από ένα άτομο προς ένα άλλο καλούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αυτή η μετακίνηση συμβαίνει από την εξωτερική στοιβάδα ενός ατόμου στην εξωτερική στοιβάδα του άλλου (σχήμα 2.27).



Σχήμα 2.27: Τυχαία κίνηση ηλεκτρονίων

Παρατηρείται λοιπόν ότι αυτή η τυχαία μετακίνηση δεν προκαλεί συγκεκριμένη ροή ηλεκτρονίων. Σε περίπτωση που στα άκρα του μεταλλικού αγωγού του προηγούμενου σχήματος

επιβληθεί μια ηλεκτρική πηγή που θα δημιουργεί κατάλληλη διαφορά δυναμικού τότε τα ελεύθερα ηλεκτρόνια απωθούνται από τον πόλο με το χαμηλότερο δυναμικό (αρνητικό πόλο), και έλκονται προς τον πόλο με το υψηλότερο δυναμικό (θετικό πόλο). Η επιβολή δηλαδή της ηλεκτρικής τάσης προκαλεί την ανάπτυξη ενός ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον αγωγό το οποίο προκαλεί



Σχήμα 2.28: Διατεταγμένη κίνηση ηλεκτρονίων –ανάπτυξη ηλεκτρικού ρεύματος

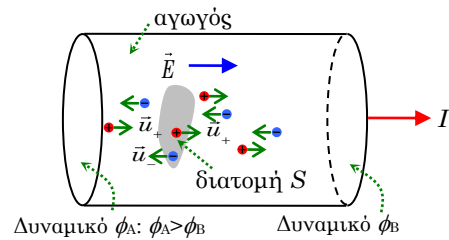
δυνάμεις Coulomb επί των ηλεκτρονίων και κατ' επέκταση την κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Αυτή η κίνηση-ροή των ηλεκτρονίων μέσω ενός αγωγού αποτελεί το ηλεκτρικό ρεύμα. Έτσι ηλεκτρικό ρεύμα ορίζεται η οποιαδήποτε προσανατολισμένη κίνηση ή και ρυθμική ταλάντωση φορτίων, από όπου και αν προέρχεται, όχι όμως και η άτακτη θερμική κίνηση των φορτίων της

Διευκρινίζεται ότι τα κινούμενα φορτία είναι ελεύθερα ηλεκτρόνια στους μεταλλικούς αγωγούς, ιόντα σε υγρά διαλύματα και ηλεκτρόνια ή ιόντα ή συνδυασμός και των δύο στα αέρια [7,κεφ.8].

2.2.7.2 Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε έναν αγωγό ορίζεται ένα φυσικό μέγεθος που εκφράζει το ρυθμό διέλευσης του ηλεκτρικού φορτίου μέσα από τη διατομή του αγωγού. Αυτό το μέγεθος ονομάζεται ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος i ή I και έχει μονάδα μέτρησης στο S.I. το αμπέρ (A). Έστω τώρα ότι υπάρχει ένας αγωγός με ένταση ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} , η οποία είναι υπεύθυνη για την άσκηση δυνάμεων στους φορείς θετικών και αρνητικών ηλεκτρικών φορτίων, δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο ροής (σχήμα 2.29).

Σε ένα μικρό στοιχειώδες χρονικό διάστημα Δt , από μία τυχαία διατομή S περνούν ηλεκτρικά φορτία, εκ των οποίων τα θετικά κινούνται με φορά ίδια με αυτήν της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ενώ τα αρνητικά με αντίθετη φορά. Η συνολική όμως ροή μπορεί να αντικατασταθεί συμβατικά με ροή μόνο ισοδύναμου θετικού φορτίου $\Delta q = \Delta q_+ + |\Delta q_-|$ κατά τη φορά της έντασης ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 2.29: Ορισμός έντασης ηλεκτρικού πεδίου

Έτσι ορίζεται ως ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος i (ή I) μέσω μίας επιφάνειας S ο ρυθμός μεταβολής της ποσότητας ισοδύναμου θετικού φορτίου που περνά από αυτήν την επιφάνεια S στη μονάδα του χρόνου. Εναλλακτικά είναι το όριο του λόγου του ισοδύναμου θετικού φορτίου Δq που διέρχεται μέσω της επιφάνειας αυτής κατά μία επιλεγμένη φορά προς το χρονικό διάστημα Δt κατά τη διάρκεια του οποίου μετράται το φορτίο, με το Δt να τείνει προς το μηδέν. Η ακριβής σχέση που εκφράζει τον παραπάνω ορισμό είναι η εξής:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (2.75)$$

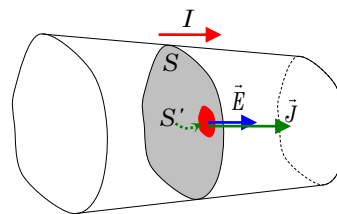
Από τον ορισμό της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος προκύπτει και ο ορισμός της μονάδας μέτρησης αμπέρ. Δηλαδή:

$$[i] = \frac{[dq]}{[dt]} \Rightarrow A = \frac{C}{s} \quad (2.76)$$

Πολλές φορές για χάρη συντομίας η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος καλείται και ως ηλεκτρικό ρεύμα. Για το λόγο αυτό, παρόλο που η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι μονόμετρο μέγεθος, πρέπει να ορίζεται αλγεβρικό πρόσημο σε αυτήν προκειμένου να δηλώνεται η συμβατική φορά του ρεύματος [7,κεφ.8].

2.2.7.3 Πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος

Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος αντιστοιχίζεται με το μέγεθος της παροχής στη μηχανική ρευστών. Έτσι γνωρίζοντας αυτήν δίνεται το μέτρο της ‘παροχής φορτίων’ που περνούν από μία διατομή του αγωγού αγνοώντας όμως πληροφορίες όπως η ταχύτητα του ρευστού που είναι πολύ σημαντική για την υδραυλική, καθώς έχει άμεση σχέση με τις απώλειες. Αντίστοιχα προκειμένου να υπάρχει ένα μέγεθος που θα εκφράζει μία κοινή ιδιότητα όλων των σημείων του ηλεκτρικού πεδίου ροής, ορίζεται το μέγεθος της πυκνότητας του



Σχήμα 2.30: Ορισμός πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος

ηλεκτρικού ρεύματος J που έχει μονάδα μέτρησης στο S.I. το A/m^2 . Προκειμένου να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της πυκνότητας, διατίθεται ένας αγωγός συνολικής διατομής S (σχήμα 2.30) μέσα στον οποίο μέσα στον οποίο έχει αναπτυχθεί ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος $i(t)$. Κατά το χρονικό διάστημα από t έως $t+dt$, διέρχεται φορτίο dq ώστε $dq=i(t) \cdot dt$. Αντίστοιχα από μία διατομή S' διέρχεται μικρότερη ποσότητα φορτίου dq' που είναι ανάλογη της διατομής και είναι ίση με $dq'=dq \cdot S'/S$. Οπότε η αντίστοιχη ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος $i'(t)$ στο τμήμα S' θα είναι και αυτή ανάλογη της διατομής του τμήματος, δηλαδή θα είναι ίση με $i'(t) \cdot S'/S$. Σε αυτό το σημείο προκύπτει ο ορισμός της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος ως ο λόγος της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που διέρχεται μέσα από μία στοιχειώδη διατομή προς το εμβαδόν της διατομής αυτής. Δηλαδή:

$$\frac{i(t)}{S} = \frac{i'(t)}{S'} = \dots \Rightarrow J \triangleq \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta i}{\Delta S} \quad (2.77)$$

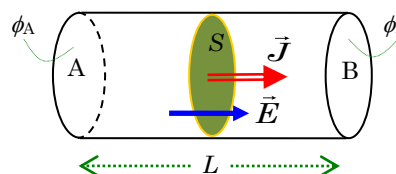
Η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος \vec{J} είναι ένα διανυσματικό μέγεθος που έχει φορά ίδια με τη φορά της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου [7,κεφ.8].

2.2.8 Το ηλεκτρικό στοιχείο του αντιστάτη

2.2.8.1 Αντιστάτης

Αντιστάτης είναι ένα ηλεκτρικό στοιχείο πάνω στο οποίο καταναλώνεται ενέργεια με τη μορφή θερμότητας, γεγονός που άλλες φορές είναι επιθυμητό (π.χ. Ηλεκτρική κουζίνα) και άλλες φορές ανεπιθύμητο (π.χ. στους αγωγούς τροφοδοσίας). Το ποσοτικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τον αντιστάτη είναι η αντίσταση. Όλες σχεδόν οι ηλεκτρικές συσκευές παρουσιάζουν αντίσταση και μάλιστα οι διάφορες ηλεκτρικές διατάξεις σε ένα κύκλωμα παριστάνονται με τις αντίστοιχες αντιστάσεις τους γι' αυτό και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην αντίσταση και όχι στο στοιχείο του αντιστάτη αυτό καθ' αυτό.

Έστω ένας μεταλλικός αγωγός από ομοιόμορφο υλικό σταθερής διατομής S μήκους L , ο οποίος διαρρέεται από μία ομοιόμορφη πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος \vec{J} . Μέσα στον αγωγό αυτό αναπτύσσεται παράλληλα μία ομοιόμορφη ένταση ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 2.31: ομοιόμορφη πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος διαρρέει μακρύ κυλινδρικό μεταλλικό αγωγό.

\vec{E} και μία ηλεκτρική τάση $V_{AB} = V = \phi_A - \phi_B$ (σχήμα 2.31). Με βάση την ένταση του συνολικού ρεύματος I για διατομή επιφάνειας S είναι:

$$I = \iint_S \vec{j} \cdot \vec{dS} = j \cdot S \quad (2.78)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν το γενικευμένο νόμο του Ohm που συνδέει την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος \vec{j} με την ένταση ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} , προκύπτει ότι:

$$I = \sigma \cdot E \cdot S \quad (2.79)$$

Στη συνέχεια συνδέοντας την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} με τη διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού ισχύει:

$$V = \int_L \vec{E} \cdot \vec{d\ell} = E \cdot L \quad (2.80)$$

Με κατάλληλο συνδυασμό των σχέσεων 2.79 και 2.80 προκύπτει ο ορισμός της ωμικής αντίστασης R ως ο λόγος της ηλεκτρικής τάσης προς την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτός είναι σταθερός, εξαρτάται μόνο από τις γεωμετρικές διαστάσεις και το σχήμα του αγωγού και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{V}{I} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{L}{S} = \rho \cdot \frac{L}{S} \triangleq R \quad (2.81)$$

Μονάδα μέτρησης στο S.I. είναι το Ohm [Ω] και προσδιορίζεται ως εξής:

$$[R] = \frac{[V]}{[I]} = \frac{V}{A} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{A}^2 \cdot \text{s}^3} = \Omega \quad (2.82)$$

Η σχέση 2.81 αποτελεί τον σημαντικότερο κανόνα της ηλεκτροτεχνίας και καλείται νόμος του Ohm σύμφωνα με τον οποίο η ωμική αντίσταση R ενός αγωγού ισούται από το πηλίκο της ηλεκτρικής τάσης V που εφαρμόζεται στα άκρα του αγωγού και προκαλεί τη ροή ρεύματος έντασης I προς αυτήν την ένταση I , δηλαδή:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.83)$$

Άλλες εκφράσεις του νόμου του Ohm παρουσιάζονται στις παρακάτω σχέσεις καθώς επιλέγεται πάντα η πιο συμφέρουσα για υπολογισμούς ανάλογα με τα δεδομένα που διατίθενται κάθε φορά [7,κεφ.9].

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.84)$$

$$V = R \cdot I \quad (2.85)$$

2.2.8.2 Νόμος Joule

Εάν στον αγωγό του σχήματος 2.32 επιβληθεί μία ηλεκτρική τάση $v(t)=\phi_A-\phi_B$, σταθερής τιμής ή αργά μεταβαλλόμενης που έχει ως αποτέλεσμα και πάλι τη δημιουργία ομοιόμορφης έντασης \vec{E} στο εσωτερικό του αγωγού, τότε σε χρονικό διάστημα dt , φορτίο dq μεταφέρεται από το σημείο A στο σημείο B υπό την επίδραση της δύναμης ηλεκτρικού πεδίου $dq \cdot E$ παράγοντας έργο:

$$dW_{A \rightarrow B} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{\ell} = \int_A^B dq \cdot \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = dq \cdot \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{\ell} \quad (2.86)$$

Με βάση τη σχέση σύνδεσης της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με την τάση η παραπάνω σχέση γράφεται ως εξής:

$$dW_{A \rightarrow B} = dq \cdot v(t) \quad (2.87)$$

Επίσης υποθέτοντας πως το έργο αυτό συμβαίνει σε χρονικό διάστημα dt υπολογίζεται η ισχύς ως το έργο προς το χρόνο. Δηλαδή:

$$p(t) = \frac{dW_{A \rightarrow B}}{dt} = \frac{dq}{dt} \cdot v(t) \quad (2.88)$$

Κατόπιν σύμφωνα με τη σχέση 2.75 περί έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος προκύπτει:

$$p(t) = i(t) \cdot v(t) = i^2(t) \cdot R = \frac{v^2(t)}{R} \quad (2.89)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του νόμου Joule μόνο όμως για την περίπτωση γραμμικών αγωγών με σταθερή διατομή. Ιδιαίτερα βολική περίπτωση για τον προσδιορισμό της ισχύος P και της ενέργειας $W_{e,T}$ αποτελεί εκείνη που η επιβαλλόμενη τάση στα άκρα ενός γραμμικού, ισότροπου, ομογενούς αγωγού σταθερής διατομής είναι σταθερή και ίση με V , οπότε η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό αντίστασης R είναι I , και έτσι για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα T ισχύει:

$$P = V \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{V^2}{R} \quad (2.90)$$

$$W_{e,T} = P \cdot T = V \cdot I \cdot T = I^2 \cdot R \cdot T = \frac{V^2}{R} \cdot T \quad (2.91)$$

Μονάδα μέτρησης της ισχύος στο S.I. είναι τα Watt= $V \cdot A$ [W], ενώ της ενέργειας είναι τα Joule [J] [7,κεφ.9].

2.2.8.3 Συνδεσμολογίες αντιστατών

Στην πράξη αρκετές φορές είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν αντιστάσεις συγκεκριμένης τιμής που μπορεί να μην διατίθεται άμεσα στο εμπόριο κυρίως για κατασκευαστικές δυσκολίες. Λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνει η δημιουργία ειδικών διατάξεων οι οποίες αποτελούνται από αντιστάσεις που συνδέονται κατάλληλα μεταξύ τους (συστήματα αντιστάσεων). Ο τρόπος σύνδεσης των αντιστάσεων αυτών είναι παρόμοιος με αυτόν των πυκνωτών, καθώς διακρίνεται σε σύνδεση σειράς, σε παράλληλη σύνδεση και σε μικτή σύνδεση.

→ Σύνδεση σειράς

Ένα σύστημα αντιστάσεων είναι συνδεδεμένο σε σειρά όταν ο δεύτερος ακροδέκτης της 1^{ης} αντίστασης συνδέεται ιδανικά αγωγίμα με τον πρώτο ακροδέκτη της 2^{ης} αντίστασης, όταν ο δεύτερος ακροδέκτης της 2^{ης} αντίστασης συνδέεται ιδανικά αγωγίμα με τον πρώτο ακροδέκτη της 3^{ης} αντίστασης κλπ.(σχήμα 2.32). όπως φαίνεται και στο σχήμα λόγω της συνδεσμολογίας όλες οι αντιστάσεις διαρρέονται από κοινό ρεύμα, δηλαδή:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (2.92)$$

Αντίθετα η συνολική στους ακροδέκτες του συστήματος ισούται με το άθροισμα των τάσεων των επιμέρους αντιστάσεων.

$$V_{A_1, A_{n+1}} = V_{A_1, A_2} + V_{A_2, A_3} + \dots + V_{A_n, A_{n+1}} \Leftrightarrow$$

$$V_{tot} = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (2.93)$$

Από τον ορισμό της ωμικής αντίστασης που ισχύει για κάθε μία από τις αντιστάσεις ξεχωριστά δίνεται:

$$R_1 = \frac{V_1}{I_1} \quad (2.94)$$

$$R_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad (2.95)$$

και τελικά

$$R_{tot} = \frac{V_{tot}}{I_{tot}} \quad (2.96)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν το νόμο του Ohm στη μορφή $V = R \cdot I$ προκύπτει η συνολική ισοδύναμη αντίσταση να είναι μεγαλύτερη από τη μεγαλύτερη αντίσταση των εμπλεκόμενων αντιστάσεων στο σύστημα.

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \geq \max_{\forall i} \{R_i\} \quad (2.97)$$

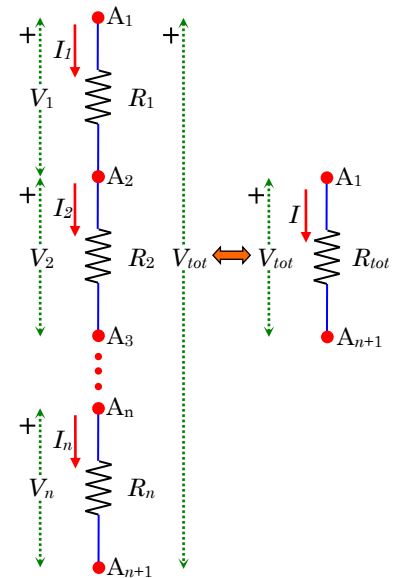
Η ισοδύναμη αντίσταση δηλαδή σε αυτήν την περίπτωση δίνεται από τη σχέση:

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (2.98)$$

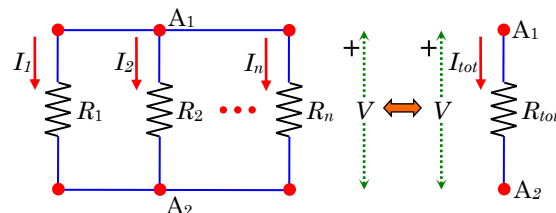
→ Παράλληλη σύνδεση

Ένα σύστημα αντιστάσεων βρίσκεται σε παράλληλη συνδεσμολογία όταν υπάρχει κοινή τάση στα άκρα όλων των εμπλεκόμενων αντιστάσεων. Ουσιαστικά οι n αντιστάσεις που συνδέονται παράλληλα σχηματίζουν τελικά δύο μόνο ακροδέκτες με κοινή τάση V που είναι ίση με τις επιμέρους τάσεις. Ενώ η τιμή του ισοδύναμου ρεύματος που διαρρέει τελικά

την ισοδύναμη τελική αντίσταση είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους εντάσεων του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει κάθε αντίσταση ξεχωριστά.



Σχήμα 2.32: Σύνδεση σειράς n αντιστάσεων



Σχήμα 2.33: Παράλληλη σύνδεση n αντιστάσεων

$$V = V_{A_1, A_2} = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (2.99)$$

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (2.100)$$

Από τον νόμο του Ohm ισχύει ότι:

$$R_{tot} = \frac{V}{I_{tot}} \quad (2.101)$$

Έτσι η ισοδύναμη αντίσταση υπολογίζεται ως εξής

$$\frac{V}{R_{tot}} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \dots + \frac{V}{R_n} \Rightarrow \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (2.102)$$

Προκύπτει έτσι, πως η συνολική ισοδύναμη αντίσταση στην περίπτωση αυτή είναι μικρότερη από την τιμή της μικρότερης εμπλεκόμενης αντίστασης:

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \geq \max_{\forall i} \left\{ \frac{1}{R_i} \right\} = \frac{1}{\min_{\forall i} \{R_i\}} \Rightarrow R_{tot} \leq \min_{\forall i} \{R_i\} \quad (2.103)$$

→ Μικτή σύνδεση

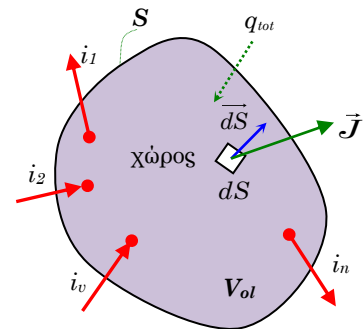
Ένα σύστημα αντιστάσεων βρίσκεται σε μικτή σύνδεση, όταν αποτελείται από τμήματα που περιέχουν αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά ή παράλληλα και οι ισοδύναμες αντιστάσεις των τμημάτων αυτών επίσης συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα. Για να βρεθεί η αντίστοιχη ισοδύναμη αντίσταση κάθε τμήματος συνδεσμολογίας σειράς ή παράλληλης, αντικαθίσταται από μία ισοδύναμη αντίσταση, με συνέπεια να απλοποιείται η συνδεσμολογία. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, ώσπου να βρεθεί η ισοδύναμη αντίσταση όλου του συστήματος [7, κεφ.9].

2.2.9 Αρχή διατήρησης φορτίου – 1^{ος} νόμος εντάσεων Kirchhoff

Ένας χώρος με όγκο V_{ol} κλειστής επιφάνειας S , περικλείει n σημειακά φορτία καθώς και κατανεμημένα φορτία (σχήμα 2.34). Το συνολικό φορτίο q_{tot} είναι:

$$q_{tot} = \sum_{i=1}^n Q_i + \sum_{j=1}^{n_L} \int_L \rho_{L-j} \cdot d\ell + \sum_{k=1}^{n_S} \iint_S \rho_{S-k} \cdot dS + \sum_{m=1}^{n_V} \iiint_{V_{ol}} \rho_{V_{ol}-k} \cdot dV_{ol} \quad (2.104)$$

Επίσης το συνολικό ρεύμα που εξέρχεται από το χώρο αυτό αποτελείται από την επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος J που είναι μεταβλητή ως προς το χώρο και το χρόνο και τα συγκεντρωμένα ρεύματα i_u από συγκεκριμένες θέσεις. Έτσι:



Σχήμα 2.34: Χώρος με φορτία και ρεύματα.

$$i_{tot} = \sum_{v=1}^{n'} i_v + \oiint_S \vec{j} \cdot \vec{dS} \quad (2.105)$$

Σύμφωνα όμως με την αρχή διατήρησης του φορτίου που υποστηρίζει πως δεν μπορεί να δημιουργηθεί ή να καταστραφεί ηλεκτρικό φορτίο, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος ισούται με το αντίθετο της μεταβολής του αποθηκευμένου φορτίου. Δηλαδή:

$$i_{tot} = -\frac{\partial q_{tot}}{\partial t} \quad (2.106)$$

Η παραπάνω σχέση με αντικατάσταση των σχέσεων 2.104 και 2.105 γίνεται:

$$\begin{aligned} \sum_{v=1}^{n'} i_v + \oiint_S \vec{j} \cdot \vec{dS} \\ = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{i=1}^n Q_i + \sum_{j=1}^{n_L} \int_L \rho_{L-j} \cdot d\ell + \sum_{k=1}^{n_S} \oiint_S \rho_{S-k} \cdot dS \right. \\ \left. + \sum_{m=1}^{n_V} \iiint_{V_{ol}} \rho_{Vol-k} \cdot dV_{ol} \right) \end{aligned} \quad (2.107)$$

Στην περίπτωση που το συνολικό φορτίο του χώρου που εξετάζεται είναι μηδέν ή και σταθερό, τότε και ο ρυθμός μεταβολής του φορτίου αυτού ισούται με μηδέν. Με την παραπάνω προϋπόθεση η σχέση 2.107 γίνεται:

$$\sum_{v=1}^{n'} i_v + \oiint_S \vec{j} \cdot \vec{dS} = 0 \quad (2.108)$$

Ακόμη εάν δεν υπάρχουν κατανεμημένα φορτία, παρά μόνο σημειακά θα υπάρχουν μόνο συγκεντρωμένες εντάσεις και όχι πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος και έτσι η σχέση 2.108 απλοποιείται ως εξής:

$$\sum_{v=1}^{n'} i_v = 0 \Rightarrow \sum_{v=1}^{n'} i_v = 0 \quad (2.109)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τον 1^ο νόμο του Kirchhoff ή το νόμο εντάσεων του Kirchhoff και εκφράζει ουσιαστικά ότι το άθροισμα των ρευμάτων που εξέρχονται από ένα χώρο ή εισέρχονται σε αυτόν είναι ίσο με το μηδέν. Έχει μεγάλη χρησιμότητα στην επίλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων, καθώς όταν διάφοροι αγωγοί συγκεντρώνονται σε ένα σημείο που ονομάζεται κόμβος και έχει την ιδιότητα να μη συγκεντρώνει φορτίο ισχύει ο πρώτος νόμος του Kirchhoff [7, §10.1].

2.2.10 Αρχή διατήρησης ενέργειας – 2^{ος} νόμος τάσεων Kirchhoff

Με σκοπό τη διατήρηση της ηλεκτρικής ροής σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, είναι απαραίτητη η χρήση ηλεκτρικής πηγής. Πρόκειται για ένα στοιχείο που συνδέεται αγώγιμα με τα δύο ηλεκτρόδια,

μεταφέρει μέσω των ηλεκτροδίων τα αντίστοιχα φορτία και διατηρεί το αντίστοιχο ηλεκτροστατικό πεδίο. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μέσα σε μία πηγή, ονομάζονται ηλεκτροδιαχωριστικές, διότι αφενός μετατρέπουν τις αρχικές μορφές ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια φορτίων και αφετέρου επιτρέπουν το διαχωρισμό των θετικών από τα αρνητικά φορτία. Στο εσωτερικό των πηγών αναπτύσσεται μία ισοδύναμη δύναμη E_S , γνωστή και ως ηλεκτρεγερτική πεδιακή ένταση, που έχει την ιδότητα σε κάθε σημείο της πηγής να είναι ίση και αντίθετη της αντίστοιχης πεδιακής έντασης E του ηλεκτροστατικού πεδίου στη μόνιμη κατάσταση. Δηλαδή:

$$\vec{E}_S + \vec{E} = 0 \quad (2.110)$$

Είναι σημαντικό να γίνει σαφές, πως η ηλεκτρεγερτική πεδιακή ένταση υφίσταται μόνο στο εσωτερικό της πηγής και έτσι εξωτερικά της πηγής υπάρχει μόνο η ένταση του ηλεκτροστατικού πεδίου. Ακόμη εάν σε μία περιοχή της πηγής η ηλεκτρεγερτική πεδιακή ένταση είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της έντασης του ηλεκτροστατικού πεδίου τότε γίνονται μετακινήσεις πρόσθετων φορτίων ή αλληλοεξουδετερώσεις μέρους αυτών αντίστοιχα με σκοπό την αποκατάσταση της ισορροπίας με βάση τη σχέση 2.110.

Επίσης τα ηλεκτρόδια A και B ονομάζονται πόλοι ή ακροδέκτες της πηγής.

Με βάση τη σχέση 2.26 που δίνει την ηλεκτρική τάση συναρτήσει της έντασης του ηλεκτροστατικού πεδίου, η ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής ισούται με την τάση στα άκρα των πόλων A και B , ως εξής:

$$V_{πηγής} = \int_B^A \vec{E}_S \cdot d\vec{\ell} = \int_B^A (-\vec{E}) \cdot d\vec{\ell} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = V_{AB} \quad (2.111)$$

Με τη σύνδεση των ακροδεκτών A και B μέσω αγωγίου σώματος με ειδική αγωγιμότητα σ , αναπτύσσεται ηλεκτρικό ρεύμα με πυκνότητα J που με βάση τη σχέση 2.79 δίνεται από τον τύπο:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (2.112)$$

Η αντίστοιχη σχέση για την πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος της πηγής $J_{πηγής}$ δίνεται από την εξής σχέση:

$$\vec{J}_{πηγής} = \sigma_{πηγής} \cdot (\vec{E}_S + \vec{E}) \quad (2.113)$$

Με την αντικατάσταση της προηγούμενης σχέσης στην 2.111 προκύπτει:

$$V_{AB} = \int_B^A \left(\vec{E}_S - \frac{\vec{J}_{πηγής}}{\sigma_{πηγής}} \right) \cdot d\vec{\ell} \Leftrightarrow V_{AB} = \int_B^A \vec{E}_S \cdot d\vec{\ell} - \int_B^A \frac{\vec{J}_{πηγής}}{\sigma_{πηγής}} \cdot d\vec{\ell} \quad (2.114)$$

Με την προϋπόθεση ότι η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος της πηγής είναι συγγραμμική με το μοναδιαίο διάνυσμα ολοκλήρωσης κατά την πορεία από το B στο A , ομοιόμορφη πάνω στην εκάστοτε διατομή S της αγωγίμης σύνδεσης της πηγής και λαμβάνοντας υπόψιν τη σχέση της της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος I με την αντίστοιχη πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος, προκύπτει ο ορισμός της αντίστασης της ηλεκτρικής πηγής $R_{πηγής}$ ως εξής:

$$\int_B^A \frac{\vec{J}_{πηγής}}{\sigma_{πηγής}} \cdot d\vec{\ell} = \int_B^A \frac{J_{πηγής}}{\sigma_{πηγής}} \cdot d\ell = \int_B^A \frac{J_{πηγής} \cdot S}{\sigma_{πηγής} \cdot S} \cdot d\ell$$

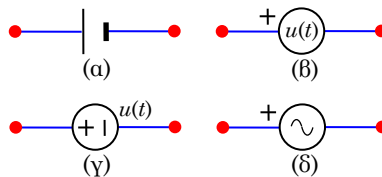
$$= \int_B^A \frac{I}{\sigma_{πηγής} \cdot S} \cdot d\ell = I \cdot R_{πηγής}$$
(2.115)

Με το συνδυασμό των σχέσεων 2.114 και 2.115 προκύπτει η τάση στους πόλους της πηγής ή αλλιώς η πολική τάση V_{AB} :

$$V_{AB} = V_{πηγής} - I \cdot R_{πηγής}$$
(2.116)

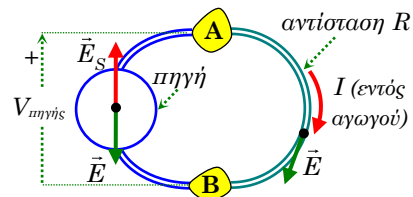
Στην περίπτωση του το υλικό της πηγής είναι εντελώς αγώγιμο και δεν υπάρχει αντίσταση πηγής, τότε η πολική τάση ταυτίζεται με την ηλεκτρεγερτική δύναμη πηγής.

Η ηλεκτρική πηγή που αναλύθηκε παραπάνω ονομάζεται ηλεκτρική πηγή σταθερού πλάτους ή ηλεκτρική πηγή συνεχούς τάσης ή ηλεκτρική πηγή τάσης συνεχούς ρεύματος ή πιο απλά ηλεκτρική πηγή τάσης αφού παρέχει στα άκρα της ηλεκτρική τάση σταθερού πλάτους ίση με την πολική τάση της σχέσης 2.116.



Σχήμα 2.35: Συμβολισμός ηλεκτρικών πηγών τάσης: (α) σταθερού πλάτους / συνεχούς ρεύματος, (β-γ) μεταβλητής μορφής, (δ) ημιτονοειδούς εναλλασσό-μενης μορφής.

Η σχέση 2.116 αποτελεί ουσιαστικά το 2^ο νόμο του Kirchhoff και εκφράζει τη διατήρηση της ενέργειας των φορτίων, δηλαδή ένα φορτίο που ακολουθεί την κλειστή διαδρομή AB και BA (βρόχος κυκλώματος) ωρολογιακά, επιστρέφει στην αρχική του θέση μέσα στο κύκλωμα και η μεταβολή της δυναμικής του ενέργειας είναι μηδέν. Η ενέργεια που ενδεχομένως χάνεται στις αντιστάσεις αναπληρώνεται από την ενέργεια που παρέχει η



Σχήμα 2.36: επεξήγηση 2^{ου} νόμου Kirchhoff

πηγή. Μία πιο γενικευμένη μορφή του 2^{ου} νόμου

του Kirchhoff αποτελεί η παρακάτω σχέση 2.117 που λέει πως το αλγεβρικό άθροισμα των ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων $V_{πηγής-j}$ κάθε βρόχου ενός κυκλώματος κατά τη θετική φορά κίνησης πάνω στο βρόχο (γνωστή ως φορά διαγραφής) είναι ίσο με το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων επί των αντιστάσεων ($R_{πηγής-j}$ και R_k) κατά τη θετική φορά κίνησης πάνω στο βρόχο.

$$\sum_j V_{πηγής-j} = \sum_j I_j \cdot R_{πηγής-j} + \sum_k I_k \cdot R_k$$
(2.117)

Η τάση πάνω σε μία αντίσταση ονομάζεται πτώση τάσης αντίστασης λόγω μείωσης της ενέργειας.

Μία άλλη μορφή της παραπάνω σχέσης βασισμένη στις τάσεις που αναπτύσσονται στα άκρα των εκάστοτε στοιχείων είναι η εξής:

$$\sum_j (V_{\pi\eta\eta\eta\zeta-j} - I_j \cdot R_{\pi\eta\eta\eta\zeta-j}) - \sum_k I_k \cdot R_k = 0 \Leftrightarrow \sum_j V_{AB-j} - \sum_k I_k \cdot R_k = 0 \Leftrightarrow \sum_i V_i = 0 \quad (2.118)$$

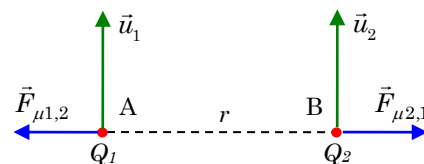
Δηλαδή, το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων V_i όλων των στοιχείων σε κάθε βρόχο είναι ίσο με το μηδέν [7, §10.6-10.7].

2.2.11 Μαγνητικό πεδίο

2.2.11.1 Ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου- ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων

Η ιδιότητα κάποιων μετάλλων να έλκουν και να συγκρατούν σιδερένια σώματα ονομάζεται μαγνητισμός. Τα σώματα που έχουν την αντίστοιχη ιδιότητα λέγονται μαγνήτες. Υπάρχουν δύο ειδών μαγνήτες: οι μόνιμοι και οι παροδοικοί (ηλεκτρομαγνήτες). Οι πρώτοι είναι μόνιμα μαγνητισμένοι ενώ στους δεύτερους η μαγνητική ιδιότητα παρουσιάζεται ή απομακρύνεται ανάλογα με την ύπαρξη ή μη του αιτίου μαγνήτισης. Αυτοί αποκαλούνται και ως ηλεκτρομαγνήτες διότι αποτελούνται από ένα σώμα από μαλακό σίδηρο που γύρω του είναι τυλιγμένος ένας αγωγός ο οποίος, όταν διαρρέεται από ρεύμα, έλκει σιδερένια αντικείμενα, ενώ, όταν παύσει η ροή ρεύματος, δεν υπάρχει και η έλξη αυτή. Στην πραγματικότητα ο μαγνητισμός οφείλεται στην κίνηση ηλεκτρικών φορτίων, διότι σε έναν ηλεκτρομαγνήτη τα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία είναι το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει την περιέλιξη του ηλεκτρομαγνήτη και στους μόνιμους μαγνήτες τα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία είναι τα ηλεκτρόνια που περιστρέφονται γύρω από τους πυρήνες των ατόμων του υλικού και συγχρόνως και γύρω από τον άξονά τους. Το μαγνητικό πεδίο είναι όμοιο με το ηλεκτρικό πεδίο αφού και τα δύο για να δημιουργηθούν απαιτείται η ύπαρξη ηλεκτρικών φορτίων, με βασική όμως διαφορά ότι το μαγνητικό πεδίο έχει ως προϋπόθεση όχι μόνο την ύπαρξη φορτίων, αλλά και την κίνηση αυτών.

Με σκοπό την κατανόηση των μαγνητικών δυνάμεων διατίθεται ένα στατικό μαγνητικό πεδίο που ονομάζεται μαγνητοστατικό και οφείλεται είτε σε μόνιμους μαγνήτες είτε σε ηλεκτρομαγνήτη που η περιέλιξή του διαρρέεται από ρεύμα χρονικά αμετάβλητης έντασης. Κατ' αντιστοιχία των δυνάμεων Coulomb για τα ηλεκτρικά πεδία, διαπιστώνεται η ύπαρξη μαγνητικών δυνάμεων για τα μαγνητικά πεδία. Έτσι όταν δύο ετερόνυμα φορτία Q_1 και Q_2 κινούνται με ταχύτητες u_1 και u_2 ίδιας φοράς, κάθετα στον άξονα σύνδεσης των δύο φορτίων και η απόσταση μεταξύ τους είναι r υπάρχουν μαγνητικές δυνάμεις που το μέτρο τους είναι ανάλογο των γινομένων φορτίου - ταχύτητας φορτίου και αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης r , δηλαδή:



Σχήμα 2.37: Αρχική διάταξη διαπίστωσης μαγνητικών δυνάμεων.

$$F_{\mu 1,2} = F_{\mu 2,1} = F_{\mu} = \mu \cdot \frac{|Q_1 \cdot u_1| \cdot |Q_2 \cdot u_2|}{r^2} \quad (2.119)$$

Αν το κινούμενο φορτίο Q_1 είναι το αίτιο σχηματισμού μαγνητικού πεδίου και το κινούμενο φορτίο Q_2 έχει το ρόλο του υποθέματος, τότε η αναπτυσσόμενη δύναμη σε συγκεκριμένη απόσταση και θέση είναι ανάλογη της ταχύτητας και του φορτίου Q_2 . Προκειμένου να αποφεύγεται κάθε φορά ο υπολογισμός του υποθέματος ορίζεται το μέγεθος της μαγνητικής επαγωγής B , του οποίου στην παρούσα περίπτωση το μέτρο B_1 ισούται με:

$$B_1 = \frac{F_{\mu 2,1}}{m_{\mu 2}} = \frac{F_{\mu 2,1}}{|Q_2 \cdot u_2|} = \mu \cdot \frac{|Q_1 \cdot u_1|}{r^2} \quad (2.120)$$

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής στο S.I είναι το Tesla [T] που ισούται με:

$$[B] = \frac{N}{C \cdot m/s} = \frac{N}{A \cdot m} = \frac{kg}{A \cdot s^2} = \frac{Wb}{m^2} = T \quad (2.121)$$

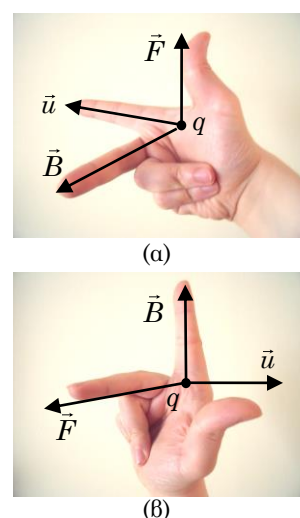
Έστω ότι ένα θετικό φορτίου-υπόθεμα q βρίσκεται εντός μαγνητικού πεδίου με μαγνητική επαγωγή \vec{B} και κινείται με ταχύτητα \vec{u} . Προκύπτει ότι πάνω του ασκείται μία δύναμη, της οποίας το μέτρο της δίνεται από το γινόμενο του μέτρου της ταχύτητας u , του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής B και του ημιτόνου της γωνίας μεταξύ των διανυσμάτων της ταχύτητας \vec{u} και της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} . Αντίστοιχα η διεύθυνση και η φορά της δύναμης δίνεται από το εξωτερικό γινόμενο της ταχύτητας \vec{u} και της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} , δηλαδή η δύναμη \vec{F}_{μ} που αναπτύσσεται, γνωστή και ως μαγνητική δύναμη, είναι ίση με:

$$\vec{F}_{\mu} = q \cdot \vec{u} \times \vec{B} \quad (2.122)$$

Ενώ το μέτρο της μαγνητικής δύναμης μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$F_{\mu} = q \cdot u \cdot B \cdot \sin \theta \quad (2.123)$$

Το σύμβολο «x» στη σχέση 2.122 δίνει το εξωτερικό γινόμενο δύο διανυσμάτων, το οποίο ακολουθεί το νόμο των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού για θετικό φορτίο q (σχήμα 2.38). Ακόμη με βάση τη σχέση 2.123 μπορεί να επισημανθεί ότι η μαγνητική δύναμη είναι μηδενική όταν το φορτίο κινείται παράλληλα προς τη μαγνητική επαγωγή ($\sin 0 = 0$). Επίσης είναι η μέγιστη δυνατή όταν το φορτίο κινείται κάθετα στη μαγνητική επαγωγή ($\sin 90 = 1$). Τέλος η μαγνητική δύναμη παίρνει μία τιμή μεταξύ των δύο προηγούμενων εάν το φορτίο q κινείται σε τυχαία κατεύθυνση με γωνία θ μεταξύ της ταχύτητας και της μαγνητικής επαγωγής.



Σχήμα 2.38: Μαγνητική δύναμη θετικού φορτίου με τη βοήθεια του κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού.

Στην περίπτωση που ένα στοιχειώδες φορτίο q βρίσκεται εντός τόσο μαγνητικού όσο και ηλεκτρικού πεδίου τότε πάνω του ασκείται ηλεκτρομαγνητική δύναμη που καλείται και δύναμη Lorentz και ισούται με:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (2.124)$$

Σε μία προσπάθεια εμφάνισης του μεγέθους της έντασης του ρεύματος I για τον υπολογισμό της μαγνητικής δύναμης γίνονται οι ακόλουθες αντικαταστάσεις:

$$d\vec{F} = dq \cdot \vec{u} \times \vec{B} = dq \cdot \frac{d\vec{\ell}}{dt} \times \vec{B} = \frac{dq}{dt} \cdot d\vec{\ell} \times \vec{B} \Rightarrow d\vec{F} = I \cdot d\vec{\ell} \times \vec{B} \quad (2.125)$$

Έτσι η δύναμη που ασκείται κατά μήκος ενός αγωγού συνολικού μήκους C που διαρρέεται από το ρεύμα έντασης I εντός ενός μαγνητικού πεδίου μαγνητικής επαγωγής \vec{B} καλείται δύναμη Laplace και δίνεται από το ακόλουθο ολοκλήρωμα:

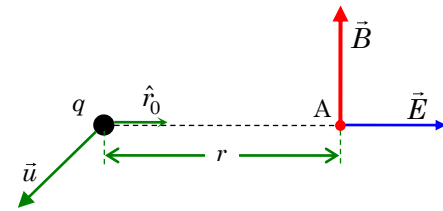
$$\vec{F}_\mu = \int_C I \cdot d\vec{\ell} \times \vec{B} = I \cdot \int_C d\vec{\ell} \times \vec{B} \quad (2.126)$$

Στην ειδική περίπτωση που ο αγωγός είναι ευθύγραμμος και έχει μήκος l η δύναμη Laplace δίνεται από τη σχέση [7,κεφ.11]:

$$\vec{F} = I \cdot \ell \cdot \hat{n}_0 \times \vec{B} \quad (2.127)$$

2.2.11.2 Δημιουργία μαγνητικού πεδίου

Ο νόμος Biot-Savart αποδεικνύει τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου συγκεκριμένης μαγνητικής επαγωγής. Συγκεκριμένα αναφέρει πως ένα ηλεκτρικό φορτίο q λόγω της κίνησής του με ταχύτητα \vec{u} στο κενό προκαλεί την ανάπτυξη ενός μαγνητικού πεδίου μαγνητικής επαγωγής \vec{B} στην τυχαία θέση A που απέχει απόσταση r κατά τη διεύθυνση από αυτό το κινούμενο φορτίο (σχήμα 2.39), που είναι ίση με:



Σχήμα 2.39: Νόμος Biot-Savart και υπολογισμός της μαγνητικής επαγωγής.

$$\vec{B} = \frac{1}{c^2} \cdot \vec{u} \times \vec{E} \stackrel{(3.4)}{\Rightarrow} \vec{B} = \frac{1}{c^2} \cdot \vec{u} \times \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \hat{r}_0 \right) \Rightarrow$$

$$\vec{B} = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot c^2} \cdot \vec{u} \times \frac{\hat{r}_0}{r^2} \Rightarrow \vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot q \cdot \frac{\vec{u} \times \hat{r}_0}{r^2} \quad (2.128)$$

Όπου \vec{E} είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από το κινούμενο φορτίο q με κατεύθυνση από το κινούμενο φορτίο προς το σημείο A , c η ταχύτητα του φωτός, μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού μέσα στο οποίο βρίσκεται το φορτίο και ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}\mu_0 &= \frac{1}{\epsilon_0 \cdot c^2} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{kg} \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2} \\ &= 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}\end{aligned}\quad (2.129)$$

Σε περίπτωση που το φορτίο βρίσκεται μέσα σε άλλο υλικό και όχι στο κενό τότε η μαγνητική επαγωγή δίνεται από τον παρακάτω τύπο όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού [7,κεφ.11].

$$\vec{B} = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot q \cdot \frac{\vec{u} \times \hat{r}_0}{r^2} \quad (2.130)$$

2.2.11.3 Νόμοι του μαγνητοστατικού πεδίου

Δύο από τους θεμελιώδεις νόμους που διέπουν τα μαγνητικά πεδία είναι ο νόμος του Gauss και ο νόμος του Ampere.

Ο νόμος Gauss είναι η εφαρμογή του θεωρήματος της απόκλισης Gauss, σύμφωνα με το οποίο το τριπλό ολοκλήρωμα μίας διανυσματικής συνάρτησης στον όγκο V που περικλείεται από μία κλειστή ομαλή ή τμηματικά ομαλή προσανατολισμένη επιφάνεια S είναι ίσο με το επιφανειακό ολοκλήρωμα της ροής αυτής της διανυσματικής συνάρτησης πάνω στη S . Έτσι η ολοκληρωματική μορφή του νόμου του Gauss γράφεται ως εξής:

$$\left. \begin{aligned}\nabla \cdot \vec{B} = 0 &\Rightarrow \iiint_V (\nabla \cdot \vec{B}) \cdot dV = 0 \\ \iiint_V (\nabla \cdot \vec{B}) \cdot dV &= \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS} = 0\end{aligned}\right\} \Rightarrow \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS} = 0 \quad (2.131)$$

Ενώ η σημειακή μορφή του νόμου του Gauss για το μαγνητικό σωληνοειδές πεδίο (πεδίο μηδενικής απόκλισης) είναι η ακόλουθη:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{A}(\vec{r})) = 0 \Rightarrow \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.132)$$

Η φυσική σημασία αυτού του θεωρήματος είναι πως στη φύση δεν υπάρχει ελεύθερη μαγνητική μάζα, αλλά πάντα σχηματίζονται μαγνητικά δίπολα.

Ο νόμος του Ampere αποδεικνύει πως το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της μαγνητικής επαγωγής του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος μίας κλειστής καμπύλης C ισούται με το ρεύμα I_{tot} που διαρρέει την επιφάνεια S που ορίζει η C πολλαπλασιασμένο με την αντίστοιχη μαγνητική διαπερατότητα μ . Η ολοκληρωματική μορφή του νόμου του Ampere είναι η εξής:

$$\begin{aligned}\oint_C \vec{B} \cdot \vec{d\ell} &= \iint_S \nabla \times \vec{B} \cdot \vec{dS} = \iint_S \mu \cdot \vec{j} \cdot \vec{dS} \Rightarrow \oint_C \vec{B} \cdot \vec{d\ell} = \mu \cdot \iint_S \vec{j} \cdot \vec{dS} \\ &= \mu \cdot I_{tot}\end{aligned}\quad (2.133)$$

Ενώ η σημειακή μορφή του νόμου του Ampere μέσω της μαγνητικής επαγωγής για την περίπτωση που μαγνητοστατικού πεδίου είναι η ακόλουθη [7,κεφ.11] :

$$\nabla \times \vec{B} = \nabla \cdot (0) - (-\mu \cdot \vec{j}) \Rightarrow \nabla \times \vec{B} = \mu \cdot \vec{j} \quad (2.134)$$

2.2.12 Επίδραση του μαγνητικού πεδίου στην ύλη

2.2.12.1 Μαγνήτιση υλικών

Ανάλογα με τον τρόπο απόκρισης των υλικών σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο διακρίνονται τα φαινόμενα του διαμαγνητισμού, του παραμαγνητισμού, του σιδηρομαγνητισμού και του αντισιδηρομαγνητισμού.

Το φαινόμενο του διαμαγνητισμού αναφέρεται στα υλικά που τα άτομά τους δεν έχουν εσωτερική μαγνητική ροπή, οπότε με την επίδραση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προκαλούνται διαταραχές στις τροχιές των ηλεκτρονίων, με συνέπεια τη μαγνήτιση των υλικών αυτών σε αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Ενδεικτικά διαμαγνητικά υλικά είναι οι περισσότερες ανόργανες και οργανικές ενώσεις, ο χαλκός, ο άργυρος, ο ψευδάργυρος κ.α.

Το φαινόμενο του παραμαγνητισμού αναφέρεται στα υλικά που τα άτομά τους παρουσιάζουν εσωτερική μαγνητική ροπή οπότε με την επίδραση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου δημιουργούνται και οι δύο μηχανισμοί πόλωσης, δηλαδή και περιστροφή ηλεκτρονίων γύρω από τον άξονά τους και γύρω από τον πυρήνα του ατόμου τους, με τον πρώτο όμως να υπερισχύει, με συνέπεια η μαγνήτιση των υλικών αυτών να είναι συγγραμμική με αυτή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Το φαινόμενο αυτό εξαρτάται από τη θερμοκρασία, καθώς η ροπή μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τα στοιχεία στα οποία δρα ο παραμαγνητισμός είναι η πλατίνα, το μαγνήσιο, το αργίλιο, το χρώμιο, το μαγγάνιο, ο κασσίτερος, το βανάδιο και το βολφράμιο.

Το φαινόμενο του σιδηρομαγνητισμού αναφέρεται σε ειδικά μεμονωμένα άτομα της ομάδας του σιδήρου στον περιοδικό πίνακα και η μαγνήτιση των υλικών αυτών είναι επίσης συγγραμμική με αυτήν του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου και αρκετά ισχυρή. Παρουσιάζουν όμως μία επιπλέον ιδιότητα σε σχέση με τα παραμαγνητικά υλικά, αυτή του αυθόρμητου μαγνητισμού. Δηλαδή χωρίς την παρουσία του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου παραλληλίζονται οι μαγνητικές ροπές εξαιτίας πολύ ισχυρών δυνάμεων κβαντομηχανικής φύσης που προκύπτουν από μαγνητική και ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών μαγνητικών δίπολων. Έτσι στην περίπτωση επιβολής ενός ισχυρού εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, όλο το υλικό προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση του πεδίου με αποτέλεσμα η περαιτέρω αύξηση του μαγνητικού πεδίου να μη μεταβάλλει άλλο τις ιδιότητες του υλικού, αφού αυτό έχει πλέον κορεστεί. Μετά την απομάκρυνση αυτού του ισχυρού πεδίου το υλικό παραμένει σε μαγνήτιση, γνωστή ως υστέρηση. Ακόμη τα σιδηρομαγνητικά υλικά χάνουν την αυθόρμητη μαγνήτισή τους, όταν η θερμοκρασία τους ξεπεράσει τη λεγόμενη σιδηρομαγνητική θερμοκρασία Curie, οπότε σε αυτήν την περίπτωση συμπεριφέρονται ως παραμαγνητικά υλικά.

Κατά το φαινόμενο του αντισιδηρομαγνητισμού είναι το φαινόμενο κατά το οποίο οι ισχυρές δυνάμεις ανταλλαγής κβαντομηχανικής φύσης εξασκούνται μεταξύ γειτονικών μαγνητικών δίπολων προσανατολίζοντας αντίρροπα τις μαγνητικές ροπές με ίσα μέτρα, με συνέπεια το υλικό μακροσκοπικά να συμπεριφέρεται ως αμαγνήτιστο [7,κεφ.12].

2.2.12.2 Ένταση μαγνητικού πεδίου

Για τον προσδιορισμό του μεγέθους πόλωσης των μαγνητικών υλικών χρησιμοποιείται το μέγεθος της έντασης του μαγνητικού πεδίου \vec{H} . Ένα σώμα που διαρρέεται από ρεύμα πυκνότητας \vec{J} οδηγεί στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου μαγνητικής επαγωγής \vec{B}_J , που με τη σειρά του αυξάνει τη μαγνητική πόλωση του υλικού, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται και ένα δευτερεύον μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής \vec{B}_{mV} που εκφράζεται μέσω της χωρικής πυκνότητας ρεύματος μαγνητικής πόλωσης \vec{J}_{mV} . Διαμορφώνεται έτσι η συνολική μαγνητική επαγωγή ως εξής:

$$\vec{B} = \vec{B}_J + \vec{B}_{mV} = \nabla \times \vec{A}_J + \nabla \times \vec{A}_{mV} = \nabla \times \vec{A}$$
$$\Rightarrow \vec{B} = \nabla \times \left(\frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \iiint_V \frac{(\vec{J} + \vec{J}_{mV}) \cdot dV'}{r} \right) \Rightarrow \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{J} + \vec{J}_{mV}) \quad (2.135)$$

Συνδέοντας την πυκνότητα ρεύματος \vec{J}_{mV} με τη μαγνήτιση \vec{M}° προκύπτει:

$$\nabla \times \frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{J} + \nabla \times \vec{M}^\circ \Rightarrow \vec{J} = \nabla \times \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}^\circ \right) \quad (2.136)$$

Ο τελευταίος όρος συνδέεται μόνο με την πραγματική πυκνότητα ρεύματος \vec{J} και προκειμένου να περιοριστεί η χρήση της μαγνήτισης ορίζεται το μέγεθος της έντασης μαγνητικού πεδίου \vec{H} ως εξής:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}^\circ \quad (2.137)$$

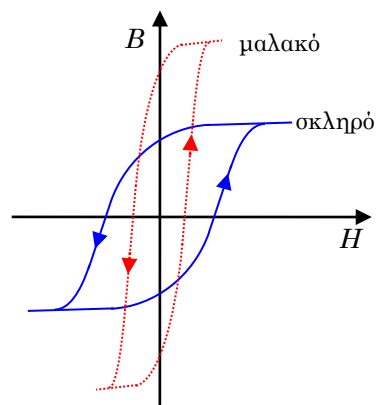
Μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο S.I. είναι το [A/m] [7,κεφ.12].

2.2.12.3 Μαγνητικά υλικά

Η κατηγοριοποίηση των μαγνητικών υλικών γίνεται με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- Με βάση την ομοιογένειά τους, δηλαδή τη μεταβολή ή μη των μαγνητικών χαρακτηριστικών τους από σημείο σε σημείο του υλικού χωρίζονται σε ανομοιογενή ή ομογενή αντίστοιχα.
- Με βάση την εξάρτησή ή μη της μαγνητικής τους συμπεριφοράς από την κατεύθυνση που έχει η μαγνητική επαγωγή και η ένταση του μαγνητικού πεδίου, χωρίζονται σε ισότροπα, όπου η μαγνητική επαγωγή και η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι συγγραμμικά, και σε ανισότροπα, όπου η μαγνητική επαγωγή και η ένταση του μαγνητικού πεδίου δεν είναι συγγραμμικά.
- Με βάση τη γραμμική ή μη εξάρτηση της μαγνήτισης \vec{M}° και της έντασης του μαγνητικού πεδίου.
- Με βάση τις μαγνητικές τους ιδιότητες. Πολύ σημαντικό κριτήριο για τον περαιτέρω διαχωρισμό αυτής της κατηγορίας αποτελεί το μέγεθος της μαγνητικής διαπερατότητας μ_r . Έτσι τα υλικά διαχωρίζονται σε μη μαγνητικά, που έχουν συντελεστή μαγνητικής διαπερατότητας περίπου ίσο με τη μονάδα και σε σιδηρομαγνητικά που έχουν συντελεστή μαγνητικής διαπερατότητας πολύ μεγαλύτερο με τη μονάδα. Αυτά διαθέτουν και

υποκατηγορίες. Έτσι τα μη μαγνητικά υλικά που έχουν συντελεστή μαγνητικής διαπερατότητας λίγο μεγαλύτερο της μονάδας, καλούνται διαμαγνητικά, αυτά που έχουν συντελεστή ίσο ακριβώς με τη μονάδα καλούνται κενά ή μη μαγνητικά υλικά, ενώ αυτά που διαθέτουν συντελεστή λίγο μεγαλύτερο της μονάδας καλούνται παραμαγνητικά υλικά. Παράλληλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά χωρίζονται σε μαλακά και σκληρά, ανάλογα με το αν ο βρόχος υστέρησης παρουσιάζει μικρό ή μεγάλο εμβαδόν αντίστοιχα. Ακολουθούν πίνακες σιδηρομαγνητικών υλικών και μη σε συνδυασμό με τη μαγνητικά διαπερατότητα μ_r . (Πίνακας 2.1 και 2.2). [7, κεφ.12].



Σχήμα 2.40: Βρόχος υστέρησης μαλακών και σκληρών σιδηρομαγνητικών υλικών.

Π.2.1 Συντελεστής μαγνητικής διαπερατότητας μη σιδηρομαγνητικών υλικών

Κατηγορία	Υλικό	μ_r
Διαμαγνητικά	Βισμούθιο	0,999830
	Χρυσός	0,999965
	Υδράργυρος	0,999975
	Ασήμι	0,999980
	Μολύβι	0,999983
	Ψευδάργυρος	0,999988
	Χαλκός	0,999990
	Νερό	0,999991
Μη μαγνητικά	Κενό	1,000000
	Αέρας (σε 1 atm)	1,0000004
	Οξυγόνο (σε 1 atm)	1,0000018
Παραμαγνητικά	Αλουμίνιο	1,000022
	Λευκόχρυσος	1,000330
	Παλλάδιο	1,000699

Π.2.2 Συντελεστής μαγνητικής διαπερατότητας σιδηρομαγνητικών υλικών

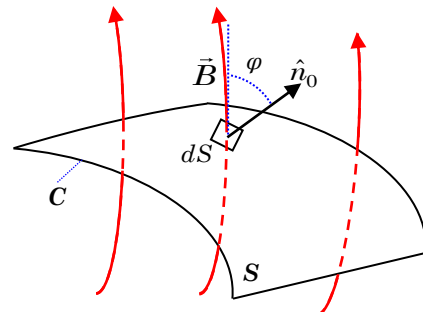
Υλικό	μ_r
Σίδηρος καθαρότητας 99,95%Fe	5
Πυριτιούχος σίδηρος 4%Si, 96% Fe	7
Πυριτιούχος σίδηρος 3%Si, 97% Fe	10
Permalloy 78 (78,5% Ni, 21,2% Fe, 0,3% Mn)	100
Permalloy 4-79 (79% Ni, 16% Fe, 4% Mo)	80
Hipernek (50% Ni, 50% Fe)	80
Sendust (9,4% Si, 5,5% Al, 85% Fe)	120
Mumetal (75% Ni, 18% Fe, 5%Cu, 2% Cr)	110
Supermalloy (79% Ni, 15,7% Fe, 5% Mo, 0,3% Mn)	800
Σκόνη Permalloy 2-81 (81% Ni, 17% Fe, 2% Mo)	130

2.2.12.4 Μαγνητική ροή και νόμος του Gauss

Το πλήθος των γραμμών ροής της μαγνητικής επαγωγής που διέρχεται ανά μονάδα επιφάνειας είναι ανάλογο της μαγνητικής επαγωγής. Με σκοπό την ποσοτικοποίηση αυτού του πλήθους των γραμμών ροής εισάγεται το μέγεθος της μαγνητικής ροής, κατ' αντιστοιχία του μεγέθους της ηλεκτρικής ροής στα ηλεκτρικά πεδία.

Το εσωτερικό γινόμενο της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} επί το διάνυσμα \vec{dS} που ορίζεται από το γινόμενο της στοιχειώδους επιφάνειας dS με το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα \hat{n}_0 επί της επιφάνειας αυτής (σχήμα 2.41) αποτελεί τον ορισμό της στοιχειώδους μαγνητικής ροής $d\Phi$. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} d\Phi &= \vec{B} \cdot \vec{dS} = \vec{B} \cdot \hat{n}_0 \cdot dS \\ \Rightarrow d\Phi &= B \cdot \cos \varphi \cdot dS \end{aligned} \quad (2.138)$$



Σχήμα 2.41 : Ορισμός μαγνητικής ροής Φ

Είναι μονόμετρο μέγεθος και έχει μονάδα μέτρησης στο S.I. το Weber [Wb].

Η μαγνητική ροή Φ που αντιστοιχεί σε ολόκληρη την επιφάνεια S δίνεται από το αντίστοιχο επιφανειακό ολοκλήρωμα της στοιχειώδους μαγνητικής ροής:

$$\Phi = \iint_S d\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS} \Leftrightarrow \Phi = \iint_S \vec{B} \cdot \hat{n}_0 \cdot dS = \iint_S B \cdot \cos \varphi \cdot dS \quad (2.139)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν το νόμο του Gauss για το μαγνητικό πεδίο σε ολοκληρωματική μορφή, προκύπτει ότι η μαγνητική ροή που εισέρχεται σε μία κλειστή επιφάνεια είναι πάντα ίση με μηδέν ή αυτή που εισέρχεται σε ένα χώρο είναι ίση με αυτήν που εξέρχεται από αυτόν, δηλαδή [7,κεφ.12]:

$$\Phi = \oiint_S d\Phi = \oiint_S \vec{B} \cdot \vec{dS} = \oiint_S \vec{B} \cdot \hat{n}_0 \cdot dS = \oiint_S B \cdot \cos \varphi \cdot dS = 0 \quad (2.140)$$

2.2.12.5 Γενικευμένη μορφή του νόμου Ampere

Ο νόμος του Ampere που έχει αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα στηρίζεται στο ενδεχόμενο ότι μία επιφάνεια S συνδέεται με την πυκνότητα J μόνο ενός ρεύματος. Στην πραγματικότητα μπορεί να υπάρχουν περισσότερα ρεύματα, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εισαγωγή της έννοιας του διαρρέυματος, δηλαδή του κατάλληλου αθροίσματός των ρευμάτων αυτών. Το διάρρευμα που περικλείεται από την καμπύλη C είναι μονόμετρο μέγεθος, μετράται και αυτό σε [A] ή αμπεροτυλίγματα [At] για να ξεχωρίζει από την ένταση I και ορίζεται ως εξής:

$$F = \sum_i I_i + \sum_l \iint_{S_l} \vec{J}_l \cdot \vec{dS} = \sum_i I_i + \sum_l \iint_{S_l} \vec{J}_l \cdot \hat{n}_0 \cdot dS \quad (2.141)$$

Μία πιο γενικευμένη μορφή του νόμου του Ampere υπό ολοκληρωματική μορφή είναι εκείνη που συνδέει την κυκλοφορία της έντασης του μαγνητικού πεδίου \vec{H} με την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος \vec{J} και με τη διηλεκτρική μετατόπιση \vec{D} ως εξής:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} &\Rightarrow \iint_S (\nabla \times \vec{H}) \cdot \vec{dS} = \iint_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot \vec{dS} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \oint_C \vec{H} \cdot \vec{d\ell} = \iint_S \vec{J} \cdot \vec{dS} + \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \vec{D} \cdot \vec{dS}\end{aligned}\quad (2.142)$$

Με συνδυασμό της παραπάνω σχέσης με τη σχέση 2.134 που αποτελεί τον νόμο του Ampere στη σημειακή του μορφή προκύπτει ο τροποποιημένος νόμος του Ampere που ονομάζεται νόμος του διαρρέυματος και ουσιαστικά αποδεικνύει πως το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος μίας κλειστής επιφάνειας C ισούται με το ρεύμα I_{tot} που διαρρέει την επιφάνεια S που ορίζει η C . Δηλαδή [7,κεφ.12]:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \Leftrightarrow \oint_C \vec{H} \cdot \vec{d\ell} = \iint_S \vec{J} \cdot \vec{dS} = \sum_i I_i + \sum_l \iint_{S_l} \vec{J}_l \cdot \vec{dS} = I_{tot} = F \quad (2.143)$$

2.2.13 Πηνίο και αυτεπαγωγή

2.2.13.1 Νόμος της επαγωγής

Το φαινόμενο της επαγωγής είναι ουσιαστικά η ανάπτυξη ηλεκτρικού ρεύματος εντός κλειστού βρόχου που οφείλεται στη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου. Το φαινόμενο της επαγωγής σχετίζεται με την αυτεπαγωγή, με την αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια εντός του πηνίου και την ανάπτυξη δυνάμεων μεταξύ γειτονικών ρευματοφόρων αγωγών.

Όπως έχει προαναφερθεί πάνω σε μία ράβδο που κινείται εντός μαγνητικού πεδίου συγκεκριμένης μαγνητικής επαγωγής αναπτύσσεται μία δύναμη Lorentz αντίστοιχη της σχέσης (2.122). Αυτή έχει ως αποτέλεσμα το διαχωρισμό των θετικών από τα αρνητικά φορτία στο εσωτερικό της ράβδου, δηλαδή την ανάπτυξη μιας έντασης \vec{E}_μ εντός του αγωγού γνωστή και ως ηλεκτρεγερτική πεδιακή ένταση:

$$\vec{E}_\mu = \frac{\vec{F}_\mu}{q} = \vec{u} \times \vec{B} \quad (2.144)$$

Μετά από εισαγωγή του μοναδιαίου διανύσματος η παραπάνω σχέση μετασχηματίζεται σε:

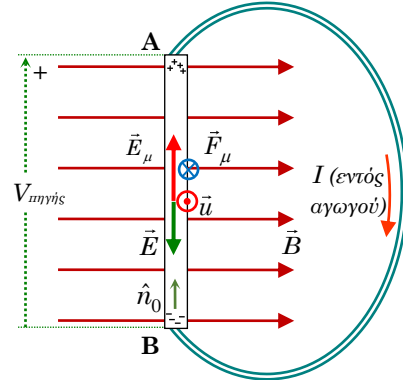
$$\vec{E}_\mu = u \cdot B \cdot \hat{n}_0 \quad (2.145)$$

Εφόσον σε όλο το μήκος της ράβδου υπάρχει πεδιακή ένταση ομοιόμορφα κατανομημένη, η ράβδος λειτουργεί και ως πηγή, με συνέπεια την ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης $V_{πηγής}$ που υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση 2.111 ως εξής:

$$V_{πηγής} = \int_B^A \vec{E}_\mu \cdot d\vec{\ell} = \int_B^A (u \cdot B \cdot \hat{n}_0) \cdot (\hat{n}_0 \cdot d\ell) = u \cdot B \cdot \ell \quad (2.146)$$

Στην περίπτωση δημιουργίας κλειστού βρόχου με κατάλληλη αντίσταση μεταξύ των άκρων A και B (σχήμα 2.42), φορτία κινούνται κατά μήκος του βρόχου και σχηματίζουν ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I , με συνέπεια την ανάπτυξη δύναμης Laplace:

$$\begin{aligned} \vec{F}_\mu &= \int_B^A I \cdot d\vec{\ell} \times \vec{B} = I \cdot \int_B^A \hat{n}_0 \cdot d\ell \times \vec{B} \\ \Rightarrow \vec{F}_\mu &= I \cdot \int_B^A \hat{n}_0 \times \vec{B} \cdot d\ell \end{aligned} \quad (2.14)$$



Σχήμα 2.42 : Αγωγική ράβδος εντός μαγνητικού πεδίου σε κλειστό βρόχο-λειτουργία γεννήτριας.

Η δύναμη αυτή είναι ίση και αντίθετη με τη δύναμη $\vec{F}_{μηχ}$ που προκαλεί την κίνηση της ράβδου μειωμένη κατά τη δύναμη τριβής $\vec{F}_{μηχ}$

$$\begin{aligned} P &= (\vec{F}_{μηχ} - \vec{F}_{τρ}) \cdot \vec{u} = -\vec{F}_\mu \cdot \vec{u} = -I \cdot \int_B^A \vec{u} \cdot (\hat{n}_0 \times \vec{B}) \cdot d\ell = -I \cdot \int_B^A \vec{u} \cdot (-\vec{B} \times \hat{n}_0) \cdot d\ell \\ \Rightarrow P &= I \cdot \int_B^A (\vec{u} \times \vec{B}) \cdot \hat{n}_0 \cdot d\ell \Rightarrow P = I \cdot V_{πηγής} \end{aligned} \quad (2.148)$$

Η παραπάνω σχέση δίνει ουσιαστικά τη μηχανική ισχύ, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική, όμοια με τη λειτουργία της γεννήτριας.

Σε αντίστροφη περίπτωση, δηλαδή στην επιβολή ροής ηλεκτρικού ρεύματος στη ράβδο, από εξωτερική πηγή, τότε η ράβδος που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο έντασης \vec{B} ξεκινάει να κινείται, όμοια με τη λειτουργία ενός κινητήρα. Στα άκρα της ράβδου αναπτύσσεται τάση $V_{ραβ.}$ μέσω της οποίας υπολογίζεται και η ηλεκτρική ισχύς που μετατρέπεται σε μηχανική.

$$V_{ραβ.} = \int_B^A \vec{E}_L \cdot d\vec{\ell} = \int_B^A (u \cdot B \cdot \hat{n}_0) \cdot (\hat{n}_0 \cdot d\ell) = u \cdot B \cdot \ell \quad (2.149)$$

$$\begin{aligned} P' &= I \cdot V_{ραβ.} \Rightarrow P' = I \cdot \int_B^A (\vec{u} \times \vec{B}) \cdot \hat{n}_0 \cdot d\ell \\ &= -I \cdot \int_B^A \vec{u} \cdot (-\vec{B} \times \hat{n}_0) \cdot d\ell \\ \Rightarrow P' &= -I \cdot \int_B^A \vec{u} \cdot (\hat{n}_0 \times \vec{B}) \cdot d\ell = -\left(I \cdot \int_B^A \hat{n}_0 \times \vec{B} \cdot d\ell \right) \cdot \vec{u} \\ &= -\vec{F}'_\mu \cdot \vec{u} = (\vec{F}_{μηχ} + \vec{F}_{τρ}) \cdot \vec{u} \end{aligned} \quad (2.150)$$

Έστω ότι δίνεται ένας αγωγός τυχαίας μορφής, μήκους l , κινούμενος με ταχύτητα \vec{u} εντός μαγνητικού πεδίου μαγνητικής επαγωγής \vec{B} . Για ένα στοιχειώδες τμήμα του αγωγού $d\vec{\ell} = \partial\ell \cdot \widehat{d\ell}_0$ η στοιχειώδης αναπτυσσόμενη ηλεκτρική τάση είναι:

$$\vec{E}_\mu \cdot d\vec{\ell} = (\vec{d\ell} \times \vec{u}) \cdot \vec{B} \quad (2.151)$$

Κατά τη στοιχειώδη μετατόπιση $\vec{u} \cdot \partial t$ στοιχειώδους τμήματος του αγωγού $d\vec{\ell}$ καλύπτεται το εμβαδόν $\partial^2 S$, σύμφωνα με το σχήμα (2.43) που εκφράζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \partial^2 S \cdot \hat{n}_0 &= d\vec{\ell} \times (\vec{u} \cdot \partial t) \\ &= (d\vec{\ell} \times \vec{u}) \cdot \partial t \end{aligned} \quad (2.152)$$

Από τις δύο παραπάνω σχέσεις σε συνδυασμό με τη σχέση 2.138 περί μαγνητικής ροής προκύπτει:

$$\vec{E}_\mu \cdot d\vec{\ell} = \frac{\partial}{\partial t} \cdot \partial \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t} \quad (2.153)$$

Όπου $\partial^2 \Phi$ η στοιχειώδης μεταβολή της μαγνητικής ροής. Για όλο το μήκος του αγωγού η σχέση 2.153 γίνεται:

$$\int_e \vec{E}_\mu \cdot d\vec{\ell} = \int_e \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t} = \int_e \partial \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) = \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Rightarrow \int_e \vec{E}_\mu \cdot d\vec{\ell} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.154)$$

Τελικά προκύπτει ο νόμος της μαγνητικής επαγωγής για κλειστό βρόχο, γνωστός και ως ο νόμος του Faraday που αποδεικνύει πως η ισοδύναμη ηλεκτρεγερτική δύναμη e που αναπτύσσεται στο βρόχο C ταυτίζεται με τη μαγνητική ροή που διέρχεται από αυτόν στο τέλος του χρονικού διαστήματος dt (σχέση 2.155).

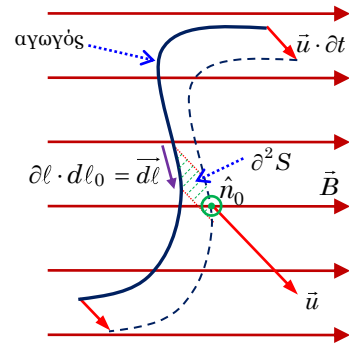
$$e_S = \oint_C \vec{E}_\mu \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.155)$$

Οι N σπείρες παράγουν όλες ίδια μαγνητική ροή Φ , καθώς κάθε μία έχει εμβαδόν S . Σε κάθε μία από αυτές αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη e_S σύμφωνα με τη σχέση (2.155) για κλειστό βρόχο. Η συνολική ηλεκτρεγερτική δύναμη του πηνίου είναι:

$$\begin{aligned} e_t &= \oint_{C-\beta\rho\rho\chi\omicron\upsilon} \vec{E}_L \cdot d\vec{\ell} = N \cdot \oint_{C-\sigma\pi\epsilon\iota\rho\alpha} \vec{E}_L \cdot d\vec{\ell} = N \cdot e_S = N \cdot \left(-\frac{d\Phi}{dt} \right) \\ &= -\frac{d\lambda}{dt} \end{aligned} \quad (2.156)$$

Το μέγεθος λ ονομάζεται πεπλεγμένη ροή και όπως διακρίνεται και από την παραπάνω σχέση είναι το γινόμενο της μαγνητικής ροής Φ της κάθε σπείρας επί το πλήθος των σπειρών. Μετράται και αυτή σε [Wb], όπως και η μαγνητική ροή και ουσιαστικά δίνει τη συνολική μαγνητική ροή του πηνίου. Υπολογίζεται ως εξής [7,κεφ.13] :

$$\lambda = N \cdot \Phi = N \cdot \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \iint_{N \cdot S} \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2.157)$$

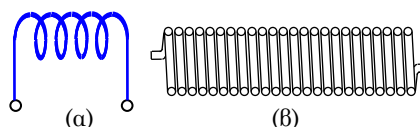


Σχήμα 2.43 : Αγωγός τυχαίας μορφής εντός μαγνητικού πεδίου

2.2.13.2 Πηνίο και αυτεπαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, η ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας που λαμβάνει χώρα στις γεννήτριες και στους κινητήρες βασίζεται στο φαινόμενο της επαγωγής. Οι διατάξεις που επιτρέπουν την αποθήκευση ενέργειας με τη βοήθεια του αναπτυσσόμενου μαγνητικού πεδίου ονομάζονται πηνία και το ηλεκτρικό μέγεθος που τα περιγράφει λέγεται αυτεπαγωγή, κατ' αντιστοιχία της χωρητικότητας σε έναν πυκνωτή.

Πιο συγκεκριμένα πηνίο ονομάζεται μία διάταξη αποτελούμενη από διαδοχικά συνδεδεμένες σπείρες / ελίγματα αγωγικού υλικού, που διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα και από το εσωτερικό τους διέρχεται η ίδια μαγνητική ροή. Τύλιγμα καλείται το σύνολο των σπειρών του πηνίου και πυρήνας το υλικό που περικλείεται από το τύλιγμα όπως φαίνεται στο σχήμα (2.44)



Σχήμα 2.44: α) Γενικό σύμβολο πηνίου, (β) δομή ευθύγραμμου πηνίου

Αυτεπαγωγή L ορίζεται ως ο λόγος της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής λ προς την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει ένα πηνίο. Δηλαδή:

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (2.158)$$

Μονάδα μέτρησης της αυτεπαγωγής στο S.I. είναι το Henry [H]. Συνήθως συναντάται σε mH ή μ H.

Ακόμη η πεπλεγμένη μαγνητική ροή λ είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής Φ και της μαγνητικής επαγωγής B , ενώ η ένταση του ρεύματος i είναι ανάλογη της μαγνητεγερτικής δύναμης \mathcal{F} και της έντασης του μαγνητικού πεδίου H . Έτσι η αυτεπαγωγή συνδέεται με τη μαγνητική αντίσταση \mathcal{R} ως εξής [7,κεφ.13] :

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N \cdot \Phi}{F/N} = N^2 \cdot \frac{\Phi}{F} \Rightarrow L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad (2.159)$$

2.2.13.3 Συνδεσμολογίες πηνίων

Περισσότερα από ένα πηνία κατάλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους αποτελούν τα συστήματα πηνίων, όμοια με τα συστήματα αντιστάσεων και πυκνωτών που έχουν αναλυθεί σε προηγούμενες παραγράφους. Ο τρόπος σύνδεσης των πηνίων αυτών είναι παρόμοιος λοιπόν με τους προαναφερθέντες, δηλαδή διακρίνεται σε σύνδεση σειράς, παράλληλη σύνδεση καθώς και συνδυασμός αυτών των δύο.

→ Σύνδεση σειράς

Ένα σύστημα πηνίων είναι συνδεδεμένο σε σειρά, όταν ο δεύτερος ακροδέκτης του 1^{ου} πηνίου συνδέεται ιδανικά αγώγιμα με τον πρώτο ακροδέκτη του 2^{ου} πηνίου, όταν ο δεύτερος ακροδέκτης του 2^{ου} πηνίου συνδέεται ιδανικά αγώγιμα με τον πρώτο ακροδέκτη του 3^{ου} πηνίου, κτλ. Λόγω της συνδεσμολογίας τους όλα τα πηνία διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, δηλαδή:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (2.160)$$

Ενώ η συνολική τάση στους ακροδέκτες του συστήματος είναι το άθροισμα των ακροδεκτών του κάθε πηνίου ξεχωριστά που εμπλέκεται στη σύνδεση σειράς. Έτσι:

$$V_{tot} = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (2.161)$$

Ταυτόχρονα η ισοδύναμη αυτεπαγωγή του συστήματος υπολογίζεται ως εξής:

$$L_{tot} = L_1 + L_2 + \dots + L_n \quad (2.162)$$

Από την ισοδύναμη αυτεπαγωγή L_{tot} προκύπτει ότι αυτή είναι μεγαλύτερη από το μεγαλύτερο προσθετό του αθροίσματος, δηλαδή τη μεγαλύτερη αυτεπαγωγή όλων των εμπλεκόμενων πηνίων. Δηλαδή:

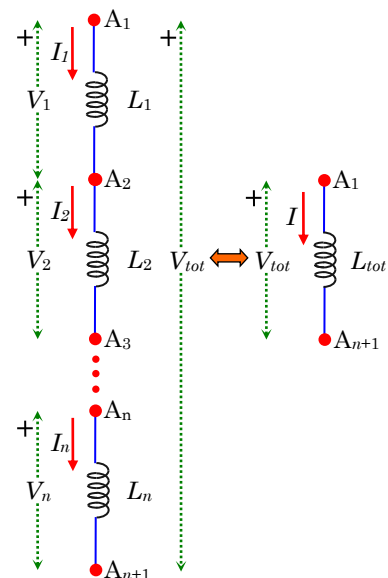
$$L_{tot} = L_1 + L_2 + \dots + L_n \geq \max_{i} \{L_i\} \quad (2.163)$$

→ Παράλληλη σύνδεση

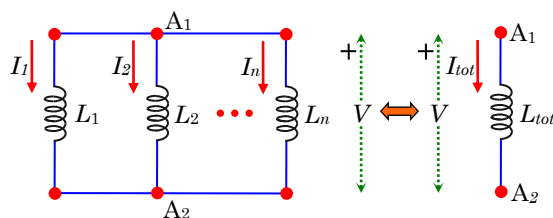
Ένα σύστημα πηνίων βρίσκεται σε παράλληλη συνδεσμολογία, όταν οι ακροδέκτες των πηνίων συνδέονται μεταξύ τους σε δύο σημεία. Αυτό έχει ως επακόλουθο η τάση V στα άκρα του συστήματος να είναι κοινή και ίση με τις τάσεις στους ακροδέκτες των επιμέρους πηνίων που αποτελούν το σύστημα. Δηλαδή:

$$V = V_{A_1, A_2} = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (2.164)$$

Παράλληλα με εφαρμογή του νόμου των εντάσεων των ρευμάτων προκύπτει ότι το ισοδύναμο ρεύμα είναι το άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων των πηνίων.



Σχήμα 2.45: Συνδεσμολογία σειράς n πηνίων.



Σχήμα 2.46: Παράλληλη συνδεσμολογία n πηνίων.

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (2.165)$$

Επίσης η ισοδύναμη αυτεπαγωγή του συστήματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{1}{L_{tot}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n} \quad (2.166)$$

Από την ισοδύναμη αυτεπαγωγή L_{tot} προκύπτει ότι αυτή είναι μικρότερη από το μικρότερη αυτεπαγωγή όλων των εμπλεκόμενων πηνίων. Δηλαδή:

$$\frac{1}{L_{tot}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n} \geq \max_{\forall i} \left\{ \frac{1}{L_i} \right\} = \frac{1}{\min_{\forall i} \{L_i\}} \Rightarrow L_{tot} \leq \min_{\forall i} \{L_i\} \quad (2.167)$$

→ Μικτή σύνδεση

Ένα σύστημα πηνίων βρίσκεται σε μικτή συνδεσμολογία, όταν αποτελείται από τμήματα που περιέχουν πηνία συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα και τα ισοδύναμα πηνία των τμημάτων αυτών επίσης συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα. Για να βρεθεί η αντίστοιχη ισοδύναμη αυτεπαγωγή μίας μικτής συνδεσμολογίας, βρίσκεται πρώτα η ισοδύναμη αυτεπαγωγή κάθε τμήματος συνδεσμολογίας σειράς ή παράλληλης και αντικαθίσταται από ένα πηνίο ισοδύναμης αυτεπαγωγής, με συνέπεια να απλοποιείται η συνδεσμολογία. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, ώσπου να βρεθεί η ισοδύναμη αυτεπαγωγή όλου του συστήματος [7, κεφ. 13].

2.2.14 Ενέργεια μαγνητικού πεδίου

Η ηλεκτρική τάση στα άκρα ενός παθητικού στοιχείου σύμφωνα με τη σχέση (2.87) ισούται με το στοιχειώδες έργο προς το στοιχειώδες φορτίο που μεταφέρεται. Έτσι:

$$v(t) = V_{A \rightarrow B} = \frac{dW_{A \rightarrow B}}{dq} \quad (2.168)$$

Ενώ σύμφωνα με τη σχέση (2.75) περί έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος σε συνδυασμό με την παραπάνω σχέση προκύπτει η στιγμιαία ισχύς που καταναλώνεται στο στοιχείο:

$$p(t) = \frac{dW_{A \rightarrow B}}{dt} = \frac{dW_{A \rightarrow B}}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} \Rightarrow p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.169)$$

Συγκεκριμένα για την περίπτωση του πηνίου η αναπτυσσόμενη τάση στα άκρα του ισούται με το ρυθμό πεπλεγμένης ροής. Δηλαδή:

$$p(t) = \frac{d\lambda}{dt} \cdot i(t) \quad (2.170)$$

Σε περίπτωση που οι απώλειες στην αντίσταση του πηνίου είναι μηδενικές, τότε η στιγμιαία ηλεκτρική ισχύς ισούται με το ρυθμό μεταβολής του μαγνητικού πεδίου.

$$p(t) = \frac{dW_m}{dt} \quad (2.171)$$

$$(2.170), (2.171) \Rightarrow \frac{dW_m}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \cdot i(t) \Rightarrow dW_m = d\lambda \cdot i(t) \quad (2.172)$$

Με κατάλληλο συνδυασμό των σχέσεων που συνδέουν τα μεγέθη της πεπλεγμένης ροής λ , της μαγνητικής ροής Φ , της μαγνητεγερτικής δύναμης $\mathcal{F}(t)$, της έντασης του μαγνητικού πεδίου H , της μαγνητικής επαγωγής B και της σχέσης (2.172) προσδιορίζεται η συνολική ενέργεια που απαιτείται για τη μετάβαση από μία αρχική κατάσταση «1» της μαγνητικής επαγωγής B_1 στην τελική κατάσταση «2» της μαγνητικής επαγωγής B_2 ως εξής:

$$W_{m:1 \rightarrow 2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i(t) \cdot d\lambda = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} \mathcal{F}(t) \cdot d\Phi = \ell_m \cdot S \cdot \int_{B_1}^{B_2} H(t) \cdot dB \quad (2.173)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη μαγνητική διαπερατότητα μ προκύπτει η ενέργεια μαγνητικού πεδίου για μηδενική αρχική τιμή να ισούται με:

$$W_m = \ell_m \cdot S \cdot \frac{1}{2} \cdot B \cdot H = \ell_m \cdot S \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu} = \ell_m \cdot S \cdot \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot H^2 \quad (2.174)$$

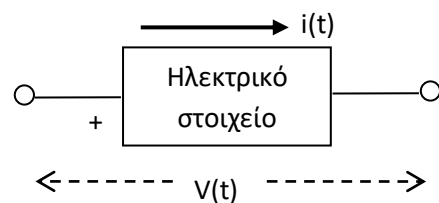
Η γενικευμένη σχέση που δίνει την αποθηκευμένη ενέργεια του μαγνητικού πεδίου για οποιοδήποτε γραμμικό υλικό είναι η παρακάτω [7, κεφ.14] :

$$\begin{aligned} W_m &= \iiint_V w_m \cdot dV = \frac{1}{2} \cdot \iiint_V B \cdot H \cdot dV = \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot \iiint_V B^2 \cdot dV \\ &= \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot \iiint_V H^2 \cdot dV \end{aligned} \quad (2.175)$$

2.3 Συστηματική διατύπωση των νόμων των τάσεων και των εντάσεων

2.3.1 Ηλεκτρικό στοιχείο - συνδεδεμένη φορά τάσεως - ρεύματος

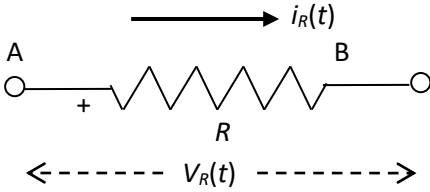
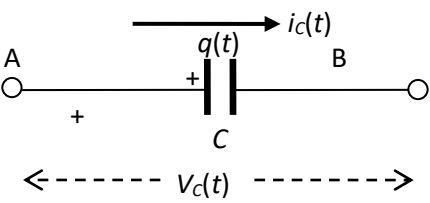
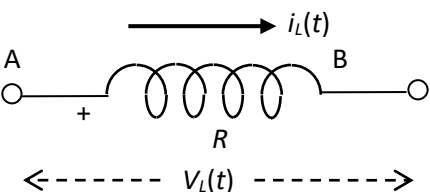
Ηλεκτρικό στοιχείο είναι η μικρότερη στοιχειωδέστερη ηλεκτρική διάταξη που διαθέτει δύο ακροδέκτες. (σχήμα 2.47). Το σύμβολο «+» στον έναν από τους δύο ακροδέκτες καθορίζει το μεγαλύτερο δυναμικό του ακροδέκτη αυτού κατά τις χρονικές στιγμές που η συνάρτηση $V(t)$ παίρνει θετικές τιμές και καλείται φορά αναφοράς τάσης. Αντίστοιχο σύμβολο το οποίο καθορίζει τη φορά του ρεύματος και καλείται φορά αναφοράς ρεύματος είναι το βέλος « \rightarrow » και σημαίνει πως κατά τις χρονικές στιγμές που η συνάρτηση $i(t)$ παίρνει θετικές τιμές, η φορά του ρεύματος είναι ίδια με του βέλους. Συνδεδεμένη φορά τάσεως – ρεύματος καλείται η περίπτωση στην οποία η φορά αναφοράς της έντασης του ρεύματος, δηλαδή το βέλος, ξεκινάει από τον ακροδέκτη που έχει το «+» της τάσης και καταλήγει σε αυτόν με το «-». Δεν είναι απαραίτητο κάθε φορά οι φορές να είναι συνδεδεμένες [21, §1].



Σχήμα 2.47: Συμβολισμός ηλεκτρικού στοιχείου

2.3.2 Σύνοψη ηλεκτρικών στοιχείων

Σε αυτήν την παράγραφο πρόκειται να παρουσιαστούν συνοπτικά οι συμβολισμοί των ηλεκτρικών στοιχείων που αναλύθηκαν σε προηγούμενες ενότητες, καθώς και οι βασικές σχέσεις που τα χαρακτηρίζουν [21, §2-7].

<u>Στοιχείο</u>	<u>Σύμβολο</u>	<u>Χαρακτηριστική σχέση</u>
Αντιστάτης		$v_R(t) = R \cdot i_R(t) \quad (2.176)$
Πυκνωτής		$C = \frac{q(t)}{V_C(t)} \quad (2.177)$ $i_C(t) = C \cdot \frac{dV_C(t)}{dt} \quad (2.178)$
Πηνίο		$L = \frac{\lambda(t)}{i_L(t)} \quad (2.179)$ $V_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \quad (2.180)$

2.3.3 Έννοιες ηλεκτρικών δικτύων

Τον πυρήνα των ηλεκτρικών δικτύων αποτελούν τα ηλεκτρικά κυκλώματα και όλες οι έννοιες που τα προσδιορίζουν και εξυπηρετούν στην επίλυσή τους.

Ηλεκτρικό κύκλωμα είναι ένα σύνολο από τουλάχιστον δύο ιδανικά ηλεκτρικά στοιχεία που συνδέονται μεταξύ τους με αγωγούς χωρίς αντίσταση.

Συνδεσμολογία σειράς δύο ή περισσότερων στοιχείων είναι όταν ο τελευταίος ακροδέκτης του ενός συνδέεται με τον πρώτο ακροδέκτη του επόμενου στοιχείου με αποτέλεσμα όλα τα στοιχεία να διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα.

Παράλληλη συνδεσμολογία δύο ή περισσότερων ηλεκτρικών στοιχείων λέγεται η συνδεσμολογία αυτών των δύο ή περισσότερων στοιχείων που βρίσκονται υπό την ίδια ηλεκτρική τάση.

Πραγματικός κόμβος ή κόμβος ενός ηλεκτρικού κυκλώματος είναι το κοινό σημείο συνδέσεως τριών τουλάχιστον ηλεκτρικών στοιχείων. Το σύνολο όλων των κόμβων συμβολίζεται με κ .

Κλάδος ενός ηλεκτρικού κυκλώματος είναι το σύνολο των εν σειρά συνδεδεμένων ηλεκτρικών στοιχείων μεταξύ δύο κόμβων. Το σύνολο όλων των κλάδων συμβολίζεται με λ' και διαφέρει από το συμβολισμό της πεπλεγμένης ροής.

Βρόχος ηλεκτρικού κυκλώματος είναι η οποιαδήποτε κλειστή διαδρομή κατά μήκος των κλάδων του κυκλώματος.

Οφθαλμός ηλεκτρικού κυκλώματος είναι ένας βρόχος που στην επιφάνεια σχεδίασης που περικλείει δεν περιέχεται κανένας άλλος κλάδος του κυκλώματος. Το πλήθος των οφθαλμών ενός κυκλώματος ισούται με τον αριθμό των κλάδων ενός κυκλώματος μειωμένο κατά τον αριθμό των κόμβων αυτού και προσαυξημένο κατά μία μονάδα.

Διέγερση ηλεκτρικού κυκλώματος είναι κάθε ανεξάρτητη πηγή του κυκλώματος αυτού.

Αποκρίσεις ηλεκτρικού κυκλώματος είναι οι άγνωστες εντάσεις των ρευμάτων των διαφόρων κλάδων και οι άγνωστες διαφορές δυναμικού μεταξύ των διαφόρων σημείων του κυκλώματος.

Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο σημείων ενός ηλεκτρικού κυκλώματος υπάρχει, όταν τα σημεία αυτά ενώνονται μεταξύ τους αγωγή χωρίς την παρεμβολή κανενός απολύτως ηλεκτρικού στοιχείου, ώστε μεταξύ αυτών των σημείων δεν αναπτύσσεται καμία διαφορά δυναμικού.

Ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός ηλεκτρικού κυκλώματος είναι το ρεύμα που διέρχεται μέσα από τον αγωγό που προκαλεί το βραχυκύκλωμα.

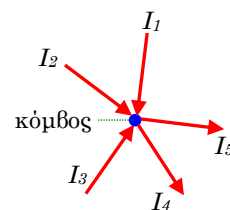
Ανοικτοκύκλωμα μεταξύ δύο σημείων ενός ηλεκτρικού κυκλώματος υπάρχει, όταν μεταξύ αυτών των σημείων δεν μπορεί να περάσει ρεύμα.

Τάση ανοικτοκύκλωσης είναι η τάση που αναπτύσσεται μεταξύ δύο σημείων από τα οποία δε διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα [22, §1-12].

2.3.4 Διατύπωση νόμου ρευμάτων

Ο νόμος των εντάσεων των ρευμάτων είναι γνωστός ως ο πρώτος νόμος του Kirchhoff και αποδεικνύει πως το αλγεβρικό άθροισμα των εντάσεων των ρευμάτων που εισέρχονται σε κάθε κόμβο είναι ίσο με το μηδέν. Δηλαδή σε έναν κόμβο που υπάρχουν n ρεύματα, για τις εντάσεις των ρευμάτων αυτών ισχύει:

$$\sum_{i=1}^n i_i(t) = 0 \quad (2.181)$$



Σχήμα 2.47: Κόμβος εντάσεων ρεύματος.

Ο νόμος αυτός στηρίζεται στο νόμο του Gauss σύμφωνα με τον οποίο δεν μπορεί να συγκεντρωθεί φορτίο σε ένα σημείο του ηλεκτρικού πεδίου. Συνήθως τα ρεύματα που εισέρχονται σε έναν κόμβο θεωρούνται ως θετικά, ενώ τα ρεύματα που εξέρχονται από αυτόν θεωρούνται αρνητικά. Έτσι για το σχήμα 2.47 η εφαρμογή του νόμου των εντάσεων γίνεται [22, §13]:

$$\sum_{i=1}^5 i_i = 0 \Rightarrow I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0 \quad (2.182)$$

2.3.5 Διατύπωση νόμου τάσεων

Ο νόμος των τάσεων ή αλλιώς νόμος των βρόχων, γνωστός και ως ο δεύτερος νόμος του Kirchhoff υποστηρίζει πως το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων κατά μήκος κάθε βρόχου είναι ίσο με το μηδέν. Δηλαδή για ένα κύκλωμα που εμπεριέχει m στοιχεία, για τις τάσεις τους ισχύει η παρακάτω σχέση.

$$\sum_{j=1}^m v_j(t) = 0 \quad (2.183)$$

Ο 2^{ος} νόμος του Kirchhoff βασίζεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου. Σε ένα κύκλωμα που διαθέτει λ κλάδους και κ κόμβους, το πλήθος των ανεξάρτητων εξισώσεων των τάσεων είναι $\lambda - \kappa + 1$ [22, §14].

2.4 Μόνιμη και μεταβατική κατάσταση

2.4.1 Διάκριση

Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα έχει μία διέγερση/είσοδο $U(t)$ και μία απόκριση/έξοδο $Y(t)$. Η διέγερση $U(t)$ επιβάλλεται τη χρονική στιγμή $t=0$ και προκαλεί την απόκριση, η οποία αποτελείται γενικά από δύο μέρη. Το ένα μέρος είναι η μεταβατική απόκριση, δηλαδή το μέρος της απόκρισης που τείνει στο μηδέν. Το άλλο μέρος είναι η μόνιμη-σταθερή απόκριση, δηλαδή το μέρος της απόκρισης που απομένει αφού πρώτα το μεταβατικό μέρος έχει εξασθενήσει. Η μόνιμη απόκριση μπορεί να είναι μία σταθερά, μία ταλάντωση με σταθερό πλάτος ή μία συνάρτηση που αυξάνει με το χρόνο.

Μεταβατική κατάσταση καλείται το χρονικό διάστημα από t_0 μέχρι t_∞ , δηλαδή η διάρκεια της μεταβατικής απόκρισης. Μόνιμη κατάσταση καλείται το χρονικό διάστημα πριν από τη χρονική στιγμή t_0 και μετά τη χρονική στιγμή t_∞ , δηλαδή μετά την εξάλειψη της μόνιμης απόκρισης [23].

2.4.2 Επίλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων σε μεταβατική κατάσταση

Η επίλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων σε μεταβατική κατάσταση απαιτεί λύσεις σε διαφορικές εξισώσεις πρώτης ή και μεγαλύτερης τάξης. Επίσης τις περισσότερες φορές οι λύσεις είναι ειδικές, δηλαδή κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, ενώ η εύρεση της συνολικής λύσης των διαφορικών εξισώσεων αποτελεί μία δύσκολη και ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία. Γι' αυτό το λόγο επιλέγεται η επίλυση κυκλωμάτων είτε συνεχούς, είτε εναλλασσόμενου ρεύματος σε μόνιμη και όχι σε μεταβατική κατάσταση, αν δεν ενδιαφέρει το τι συμβαίνει κατά τη μεταβατική χρονική περίοδο [23].

2.4.3 Επίλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων συνεχούς ρεύματος σε μόνιμη κατάσταση

Η επίλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων που διαρρέονται μόνο από συνεχές ρεύμα επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των νόμων του Kirchhoff, του 1^{ου} που αναφέρεται στα ρεύματα και του 2^{ου} που αναφέρεται στις τάσεις, όπως αυτοί έχουν αναλυθεί και σε προηγούμενες ενότητες. Έτσι για ένα

κύκλωμα που περιέχει παθητικά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

α) Ορισμός γραμμμάτων στα σημεία σύνδεσης των διάφορων στοιχείων

β) Προσδιορισμός των πραγματικών κόμβων του κυκλώματος και συμβολισμός του πλήθους τους ως «κ».

γ) Ορισμός ενός συγκεκριμένου σημείου του κυκλώματος ως σημείο αναφοράς μηδενικού δυναμικού, πρόκειται για ένα σημείο που έχει 0 Volt.

δ) Προσδιορισμός των κλάδων του κυκλώματος και συμβολισμός του πλήθους τους ως «λ'».

ε) Ορισμός των εντάσεων των ρευμάτων σε κάθε κλάδο που διαρρέεται από διαφορετικό ρεύμα. Συνήθως τα ρεύματα ορίζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξέρχονται από τις αντίστοιχες ανεξάρτητες πηγές τάσης ή έντασης. Στην περίπτωση που υπάρχουν ανεξάρτητες πηγές ρευμάτων οι εντάσεις των αντίστοιχων κλάδων προσδιορίζονται πλήρως, ενώ στην περίπτωση των εξαρτημένων πηγών ρευμάτων υπάρχει συσχέτιση με άλλο μέγεθος που χρειάζεται να αξιοποιηθεί.

στ) Προσδιορισμός της πολικότητας της τάσης όλων των στοιχείων, με βάση τη φορά των εντάσεων του ρεύματος του προηγούμενου βήματος με τον εξής κανόνα ' από εκεί που εισέρχεται το ρεύμα η τάση είναι θετική. Για τις πηγές τάσης ο θετικός πόλος είναι δεδομένος, καθώς επίσης και για τις πηγές έντασης λαμβάνεται συνήθως ως θετικός πόλος από εκεί που εξέρχεται το ρεύμα.

ζ) Εφαρμογή του νόμου των εντάσεων του Kirchhoff σε (κ-1) πραγματικούς κόμβους του κυκλώματος θεωρώντας θετικά τα εισερχόμενα ρεύματα σε κάθε κόμβο και αρνητικά τα εξερχόμενα. Η εξίσωση του τελευταίου κόμβου δεν χρειάζεται να γραφτεί, διότι λόγω της αρχής διατήρησης του φορτίου μπορεί να προκύψει από το άθροισμα των (κ-1) προηγούμενων εξισώσεων εντάσεων ρευμάτων.

η) Προσδιορισμός των βρόχων του κυκλώματος, το πλήθος των οποίων είναι «λ'-κ+1».

θ) Εφαρμογή του νόμου των τάσεων του Kirchhoff στους βρόχους του κυκλώματος προκειμένου να γίνει σωστή καταγραφή της πολικότητας των τάσεων, ορίζεται η ίδια φορά διαγραφής των βρόχων είτε ωρολογιακά είτε ανθωρολογιακά. Έτσι λαμβάνεται ως θετικό το πρόσημο της τάσης του στοιχείου που συναντάται πρώτα ο θετικός του πόλος κατά τη διαγραφή του βρόχου. Ενώ το πρόσημο της τάσης του στοιχείου που συναντάται πρώτα ο αρνητικός του πόλος κατά τη διαγραφή του βρόχου λαμβάνεται ως αρνητικό.

ι) Καταγραφή των σχέσεων τάσεων-ρευμάτων των ηλεκτρικών στοιχείων.

Οι εξισώσεις που προκύπτουν από τα βήματα ζ), θ) και ι) είναι οι απαραίτητες εξισώσεις που οδηγούν στην επίλυση του κυκλώματος. Έτσι μετά τη μαθηματική επίλυση προσδιορίζονται όλα τα μεγέθη του συστήματος, όπως οι τάσεις, τα ρεύματα, οι ισχύες κ.τ.λ. [24].

2.4.4 Επίλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων ημιτονοειδούς εναλλασσόμενου ρεύματος σε μόνιμη κατάσταση

Με τον όρο εναλλασσόμενα κυκλώματα αναφερόμαστε σε κυκλώματα στα οποία η ηλεκτρεγερτική δύναμη παρέχεται από πηγή εναλλασσόμενης τάσης. Η παραγωγή της εναλλασσόμενης τάσης στηρίζεται στο φαινόμενο της επαγωγής. Μία ημιτονοειδής εναλλασσόμενη τάση μηδενικής συνεχούς τάσης περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$v(t) = V_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta_0) \quad (2.184)$$

Στους αγωγούς του κυκλώματος που είναι συνδεδεμένοι με πηγή εναλλασσόμενης τάσης, το ηλεκτρικό πεδίο μεταβάλλεται περιοδικά, με αποτέλεσμα να προκαλεί περιοδική μεταβολή στην ένταση του ρεύματος. Η ένταση του ρεύματος κάθε χρονική στιγμή δίνεται από τη σχέση:

$$I(t) = \frac{V(t)}{R} \stackrel{\theta_0=0}{=} \frac{V_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)}{R} = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.185)$$

Πολύ σημαντικές έννοιες για τα εναλλασσόμενα κυκλώματα αποτελούν οι έννοιες της ενεργού έντασης και της ενεργού τάσης.

Ενεργός ένταση \bar{I} εναλλασσόμενου ρεύματος είναι η ένταση του συνεχούς ρεύματος σταθερής τιμής που προκαλεί το ίδιο θερμικό αποτέλεσμα με το εναλλασσόμενο ρεύμα, όταν διαρρέει την ίδια αντίσταση κατά το ίδιο χρονικό διάστημα. Προκύπτει από το νόμο του Joule ότι:

$$\bar{I} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) \cdot dt} \quad (2.186)$$

Ενεργός τάση \bar{V} εναλλασσόμενου ρεύματος είναι η τάση του συνεχούς ρεύματος που, όταν εφαρμοστεί στα άκρα της ίδιας ωμικής αντίστασης R , δημιουργεί συνεχές ρεύμα του οποίου η ένταση είναι ίση με την ενεργό ένταση του εναλλασσόμενου ρεύματος. Ομοίως προκύπτει ότι ισχύει:

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v^2(t) \cdot dt} \quad (2.187)$$

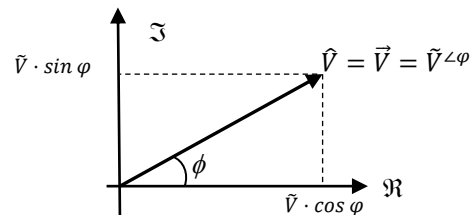
Ειδικά στην περίπτωση που η εναλλασσόμενη τάση είναι ημιτονοειδούς ή συνημιτονοειδούς μορφής της σχέσης (2.184) ισχύει ότι:

$$\bar{V} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \quad (2.188)$$

Είναι εξαιρετικής σημασίας μεγέθη, διότι όλα τα όργανα μέτρησης πάνω σε εναλλασσόμενο ρεύμα μετρούν ενεργές τιμές.

Η διαδικασία επίλυσης των ηλεκτρικών κυκλωμάτων ημιτονοειδούς εναλλασσόμενου ρεύματος σε μόνιμη κατάσταση είναι η ίδια με αυτήν του συνεχούς ρεύματος, μόνο που σε αυτήν την περίπτωση οι εξισώσεις που προκύπτουν κάθε φορά είναι πολύ δύσκολες και χρονοβόρες και για

αυτό σε αυτό το σημείο εισάγεται η έννοια του φασιθέτη ή στροφεία. Ουσιαστικά πρόκειται για την έκφραση συνημιτονοειδούς τάσης ή έντασης με τη μορφή παραστατικών μιγαδικών αριθμών και τη μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. Έτσι μία ημιτονοειδής τάση $u(t)$ μέγιστης τιμής V_0 , κυκλικής συχνότητας ω , με γωνία φάσεως φ μπορεί να περιγραφεί εναλλακτικά στο πεδίο του χρόνου με τη βοήθεια του πραγματικού μέρους ενός μιγαδικού αριθμού ως εξής:



Σχήμα 2.48: Διανυσματική παράσταση ενός φασιθέτη

$$u(t) = \Re\{V_0 \cdot e^{j\omega t + \varphi}\} = \Re\{\sqrt{2} \cdot \hat{V} \cdot e^{j\varphi} \cdot e^{j\omega t}\} = \sqrt{2} \cdot \Re\{\hat{V} \cdot e^{j\varphi} \cdot e^{j\omega t}\} \quad (2.189)$$

Η αντίστοιχη μορφή του πραγματικού μιγαδικού αριθμού-φασιθέτη είναι :

$$\hat{V} = \tilde{V} \cdot e^{j\varphi} = \tilde{V} \angle \varphi \quad (2.190)$$

Ο φασιθέτης \hat{V} τοποθετείται ως διάνυσμα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.48 και θεωρείται ταυτόσημος με το διάνυσμα \vec{V} .

Ταυτόχρονα προκύπτουν και οι ισοδύναμες μιγαδικές αντιστάσεις για όλα τα ηλεκτρικά στοιχεία. Έτσι η μιγαδική αντίσταση μίας ωμικής αντίστασης υπολογίζεται ως:

$$Z = \frac{\hat{V}}{\hat{I}} = R \quad (2.191)$$

Αντίστοιχα η ισοδύναμη μιγαδική αντίσταση ενός ιδανικού πηνίου είναι:

$$Z = \frac{\hat{V}}{\hat{I}} = j\omega L \quad (2.192)$$

Ενώ η ισοδύναμη μιγαδική αντίσταση ενός ιδανικού πυκνωτή υπολογίζεται ως εξής:

$$Z = \frac{\hat{V}}{\hat{I}} = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C} \quad (2.193)$$

Οι σχέσεις περί συνδεσμολογίας των ηλεκτρικών στοιχείων που ισχύουν για τα συνεχή κυκλώματα βρίσκουν ισχύ κι στα εναλλασσόμενα ακριβώς ίδιες [25].

2.5 Ισχύς

2.5.1 Ισχύς στο συνεχές ρεύμα

Ως ισχύς που καταναλώνεται πάνω σε ένα κύκλωμα συνεχούς ρεύματος ορίζεται το γινόμενο της τάσης V στα άκρα της αντίστασης και της έντασης του ρεύματος I που τη διαρρέει. Δηλαδή:

$$P = V \cdot I \quad (2.194)$$

Μονάδα μέτρησης της ισχύος στο S.I. είναι το 1 Watt που είναι το έργο που χρησιμοποιείται, όταν διαφορά δυναμικού 1 Volt κινεί φορτίο 1 Coulomb ανά δευτερόλεπτο μέσω ενός αγωγού, δηλαδή $1\text{ Volt} \times 1\text{ A}$ ισούται 1 Watt ισχύος

Εναλλακτικές σχέσεις υπολογισμού της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος πάνω σε μία αντίσταση είναι οι εξής [24]:

$$P = I^2 \cdot R \quad (2.195)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (2.196)$$

2.5.2 Ισχύς στο εναλλασσόμενο ρεύμα

Στα εναλλασσόμενα κυκλώματα, δηλαδή σε αυτά που διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα συναντώνται παραπάνω από ένα είδος ισχύος. Αυτά είναι η πραγματική ή ενεργός ισχύς P , η άεργος ισχύς Q και η φαινόμενη ισχύς S . Με γνώμονα τη στιγμιαία ισχύ που υπολογίζεται κανονικά σύμφωνα με τη σχέση (2.194), τροποποιημένη όμως διότι στα εναλλασσόμενα ρεύματα εντάσσεται ο παράγοντας του χρόνου, μπορούν να αναλυθούν και να οριστούν όλα τα είδη ισχύος. Η στιγμιαία ισχύς για μία σύνθετη αντίσταση, στα άκρα της οποίας αναπτύσσεται μία εναλλασσόμενη τάση $v(t) = \sqrt{2} \cdot \tilde{V} \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi_v)$ και διαρρέεται από ρεύμα έντασης $i(t) = \sqrt{2} \cdot \tilde{I} \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi_i)$ υπολογίζεται ως εξής:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.197)$$

Θέτοντας ως $\phi = \psi_v - \psi_i$ σε συνδυασμό με σχέσεις της τριγωνομετρίας προκύπτει η στιγμιαία ισχύς να ισούται με:

$$p(t) = \underbrace{\tilde{V} \cdot \tilde{I} \cdot \cos(\phi) \cdot [1 + \cos(2 \cdot \omega \cdot t + 2 \cdot \psi_i)]}_{p_1(t)} - \underbrace{\tilde{V} \cdot \tilde{I} \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t + 2 \cdot \psi_i)}_{p_2(t)} \quad (2.198)$$

Ενεργός ισχύς P είναι η μέση τιμή της στιγμιαίας ισχύος $p(t)$. Ουσιαστικά είναι η χρήσιμη ισχύς που μεταφέρεται-αποδίδεται πάνω στη σύνθετη αντίσταση. Υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$P = \tilde{V} \cdot \tilde{I} \cdot \cos(\phi) \quad (2.199)$$

Άεργος ισχύς Q η ισχύς της σύνθετης αντίστασης Z που αποθηκεύεται και αποδίδεται ξανά στο κύκλωμα (λόγω της ύπαρξης πηνίων και πυκνωτών), με αποτέλεσμα μηδενική μέση τιμή και αδυναμία εκτέλεσης χρήσιμου έργου. Κανονικά η άεργος ισχύς μετράται σε Watt όπως και η ενεργός. Προκειμένου όμως να ξεχωρίζουν και λόγω του γεγονότος πως η άεργος ισχύς δεν παράγει χρήσιμο έργο, η άεργος ισχύς μετράται σε VAr (Volt-Ampere reactive) και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

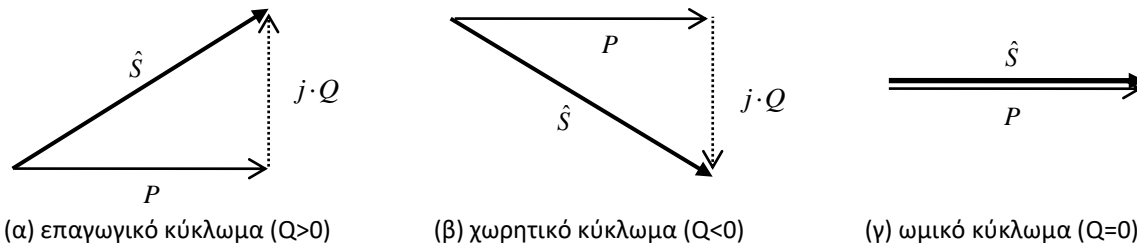
$$Q = \tilde{V} \cdot \tilde{I} \cdot \sin(\phi) \quad (2.200)$$

Μιγαδική φαινόμενη ισχύς \hat{S} είναι το διανυσματικό άθροισμα της ενεργού ισχύος και της άεργου ισχύος πάνω στο μιγαδικό επίπεδο.

Ως φαινόμενη ισχύς S ορίζεται το μέτρο της μιγαδικής φαινόμενης ισχύος:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.201)$$

Η άεργος ισχύς έχει την πολικότητα της αντίδρασης της μιγαδικής αντίστασης, δηλαδή του φανταστικού της μέρους. Έτσι είναι θετική σε ένα επαγωγικό κύκλωμα (επαγωγική άεργος ισχύς ή καταναλισκόμενη άεργος ισχύς), αρνητική σε ένα χωρητικό κύκλωμα (χωρητική άεργος ισχύς ή παραγόμενη άεργος ισχύς) και μηδενική σε ένα ωμικό κύκλωμα (δηλαδή ούτε παράγεται, ούτε καταναλώνεται άεργος ισχύς), όπου φαίνεται στο σχήμα (2.49) [25]



Σχήμα 2.49: Διανυσματικά διαγράμματα ισχύος

2.6 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μία σύντομη παρουσίαση των βασικών εννοιών της ηλεκτροτεχνίας, όπως του ηλεκτρισμού, του ηλεκτρικού φορτίου, της δύναμης Coulomb, της έντασης ηλεκτροστατικού πεδίου, του ηλεκτρικού δυναμικού και της ηλεκτρικής τάσης, της επίδρασης του ηλεκτρικού πεδίου στην ύλη, του πυκνωτή και της χωρητικότητας, της ενέργειας ηλεκτρικού πεδίου, του ηλεκτρικού ρεύματος και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος, του αντιστάτη και της αντίστασης, του μαγνητικού πεδίου και των δυνάμεων που αναπτύσσονται σ' αυτό καθώς και των ιδιοτήτων του, της έντασης του μαγνητικού πεδίου, της μαγνητικής και της πεπλεγμένης ροής, του πηνίου και της αυτεπαγωγής, της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου, καθώς και του νόμου των εντάσεων του Kirchhoff ως αποτέλεσμα της αρχής διατήρησης του φορτίου και του νόμου των τάσεων του Kirchhoff ως αποτέλεσμα της αρχής διατήρησης της ενέργειας.

Ακολουθώς διατυπώθηκαν συστηματικά οι σχέσεις των βασικών παθητικών γραμμικών στοιχείων, του τρόπου επίλυσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση και των εννοιών της ενεργού, άεργου και φαινόμενης ισχύος που συναντά κανείς στα εναλλασσόμενα ημιτονοειδή κυκλώματα μόνιμης κατάστασης. Η επανάληψη των βασικών εννοιών της ηλεκτροτεχνίας κρίνεται αναγκαία, ώστε να γίνει ακολούθως η αντιστοίχισή της με τα αντίστοιχα μεγέθη της μηχανικής ρευστών που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ

3.1 Βασικά χαρακτηριστικά ρευστών

3.1.1 Ορισμός ρευστού

Η ύλη στη φύση διακρίνεται σε τρεις μορφές, τη στερεή, την υγρή και την αέρια, ανάλογα με τη μοριακή της δομή και το μέγεθος των διαμοριακών δυνάμεων συνοχής. Συγκεκριμένα, τα στερεά παρουσιάζουν σταθερή δομή και επομένως συγκεκριμένο σχήμα και όγκο, ενώ τα υγρά και τα αέρια παρουσιάζουν χαλαρότερη δομή και μεταβλητό σχήμα. Ως ρευστά ορίζονται τα υγρά και τα αέρια εξαιτίας της ιδιότητάς τους να “ρέουν”, δηλαδή να παραμορφώνονται συνεχώς υπό την επίδραση διατμητικής τάσης, ανεξαρτήτως του μεγέθους αυτής. Ως διατμητική τάση ορίζεται το πηλίκο της εφαπτομενικής δύναμης που ασκείται σε μία επιφάνεια του ρευστού προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής. Τα υγρά και τα αέρια, πέρα του κοινού τους χαρακτηριστικού, παρουσιάζουν και μία βασική διαφορά που οφείλεται στις δυνάμεις συνοχής. Τα υγρά παρουσιάζουν μεγάλη δυσκολία στη μεταβολή του όγκου τους, δηλαδή είναι σχεδόν ασυμπίεστα, ενώ τα αέρια καταλαμβάνουν όλο το χώρο που έχουν διαθέσιμο. Έτσι, τα υγρά παίρνουν το σχήμα του περιέκτη, αλλά διατηρούν σχεδόν σταθερό όγκο και παρουσιάζουν ελεύθερη επιφάνεια, σε αντίθεση με τα αέρια που βρίσκονται σε ισορροπία μόνο μέσα σε κλειστά δοχεία και δεν παρουσιάζουν ελεύθερη επιφάνεια [5, §1.1], [18, §1.3].

3.1.2 Έννοια του ρευστού σωματιδίου και του ρευστού ως συνεχούς μέσου

Η ύλη και κατά συνέπεια και τα ρευστά έχουν σαν δομικές μονάδες μόρια ή άτομα. Δεδομένου ότι τα μόρια των ρευστών βρίσκονται σε συνεχή κίνηση και ότι ακόμα και μία πολύ μικρή ποσότητα ύλης αποτελείται από έναν τεράστιο αριθμό μορίων, η εξέταση της συμπεριφοράς ενός ρευστού γίνεται με μακροσκοπική και όχι με μικροσκοπική ανάλυση.

Ρευστό σωματίδιο ορίζεται ως ο μικρότερος όγκος του ρευστού που περιέχει ικανό πλήθος μορίων, ώστε να επιτρέπει τη στατιστική ερμηνεία της συμπεριφοράς τους. Όπως είναι κατανοητό, οι διαστάσεις του ρευστού σωματιδίου είναι απειροστές και οι στατιστικές ιδιότητες των μορίων που περιέχει μπορούν να θεωρηθούν ότι ανήκουν σε ένα σημείο. Δηλαδή, σε κάθε σημείο του χώρου και σε κάθε χρονική στιγμή βρίσκεται ένα ρευστό σωματίδιο και οι ιδιότητες του σωματιδίου είναι αντιπροσωπευτικές για τις ιδιότητες του ρευστού στο αντίστοιχο σημείο (x,y,z,t) . Μετά από αυτήν την αντιστοίχιση προκύπτει και η έννοια του ρευστού ως συνεχούς μέσου, του οποίου οι ιδιότητες είναι συνεχείς συναρτήσεις του χώρου (x,y,z) και του χρόνου (t) και οι μεταβολές των ιδιοτήτων αυτών εξαρτώνται από την κίνηση και τις ιδιότητες των επιμέρους ρευστών σωματιδίων. Επιπλέον επισημαίνεται πως με τον όρο ‘ιδιότητες’ αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της ύλης που παραμένουν αναλλοίωτα, όταν η ύλη βρίσκεται σε μία καθορισμένη μορφή. Ως εκ τούτου η ύλη σε οποιαδήποτε κατάσταση μπορεί να περιγραφεί πλήρως από τις ιδιότητές της. Στις ενότητες που ακολουθούν αναφέρονται οι κυριότερες ιδιότητες των ρευστών [5, §1.2], [18, §1.3].

3.1.3 Πυκνότητα και ειδικό βάρος

Πυκνότητα $[\rho]$ ενός ρευστού ορίζεται ως η μάζα ρευστού σωματιδίου ανά μονάδα όγκου αυτού.

$$\rho = \lim \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (3.1)$$

Μονάδες μέτρησης της πυκνότητας στο S.I. είναι τα kg/m^3 .

Στα ασυμπίεστα ρευστά η πυκνότητα εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία, η οποία, όταν μεταβάλλεται, προκαλεί διαστολή ή συστολή του όγκου. Στα συμπιεστά ρευστά η πυκνότητα εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία, όσο και από την πίεση, η οποία προκαλεί με τη σειρά της μεταβολή του όγκου.

Με βάση αυτήν την ιδιότητα κρίνεται εάν ένα ρευστό είναι συνεχές ή όχι. Η επίδραση του όγκου στη συνέχεια του ρευστού φαίνεται στο σχήμα 3.1.

Ειδικός όγκος $[\nu]$ ονομάζεται το αντίστροφο της πυκνότητας και έχει μονάδες μέτρησης στο S.I. m^3/kg .

$$\nu = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} \quad (3.2)$$

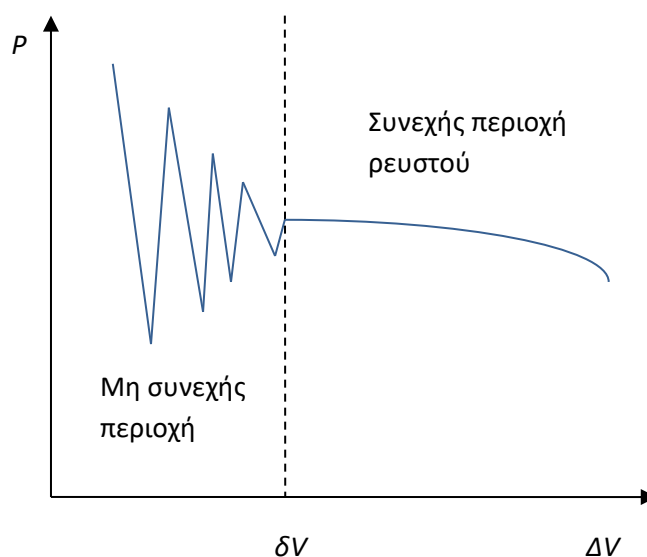
Ειδικό βάρος $[\gamma]$ ενός ρευστού ορίζεται ως το γινόμενο της πυκνότητας ρ και της επιτάχυνσης της βαρύτητας g .

$$\gamma = \rho g \quad (3.3)$$

Μονάδες μέτρησης του ειδικού βάρους στο S.I. είναι τα kg/m^3 [5, §1.3], [18, §1.4.1].

3.1.4 Πίεση

Έστω ένα ρευστό με όγκο V που περικλείεται από επιφάνεια E (σχήμα 3.2). Τότε το περιβάλλον ρευστό ασκεί στην κάθε στοιχειώδη επιφάνεια ΔE δύναμη $\overline{\Delta F}$, η οποία μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, μία κάθετη ΔP και μία εφαπτομενική ΔT ως προς την επιφάνεια ΔE . Σύμφωνα με τα παραπάνω ορίζεται η ορθή ή κάθετη τάση $[\sigma]$ και η διατμητική τάση $[\tau]$ ως εξής:

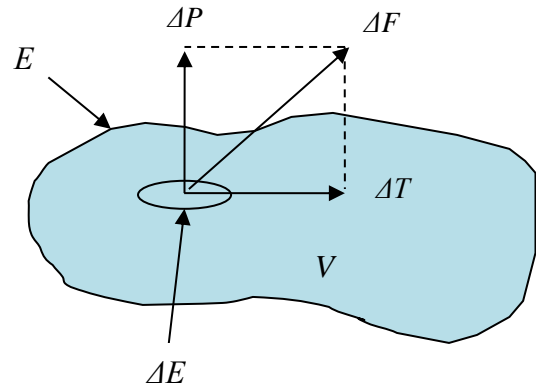


Σχήμα 3.1: Διάγραμμα όγκου – πίεσης ρευστού με σχετικές περιοχές συνέχειας ρευστού [18, §1.4.6].

$$\sigma = \lim_{\Delta E \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta E} \quad (3.4)$$

$$\tau = \lim_{\Delta E \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta E} \quad (3.5)$$

Πίεση [p] είναι η ορθή τάση, δηλαδή $p=\sigma$, όταν η διατμητική τάση δεν υπάρχει, δηλαδή $\tau=0$. Είναι μονόμετρο μέγεθος και όχι διανυσματικό και θεωρείται θετική όταν αντιστοιχεί σε θλιπτική τάση, δηλαδή όταν η δύναμη κατευθύνεται προς το εσωτερικό του θεωρούμενου όγκου. Η μέτρηση της πίεσης διακρίνεται σε απόλυτη και σχετική. Η διαφορά τους είναι ότι η απόλυτη πίεση εκφράζεται με σημείο αναφοράς το απόλυτο κενό, ενώ η σχετική πίεση εκφράζεται σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση, όπως φαίνεται ακολούθως.



Σχήμα 3.2: Όγκος ρευστού προς ανάλυση αναπτυσσόμενων δυνάμεων και πιέσεων.

$$p_{\text{σχετ.}} = p_{\text{απολ.}} - p_{\text{atm}} \quad (3.6)$$

Μονάδες μέτρησης της πίεσης στο S.I. είναι το Pascal ($\text{Pa} = 1\text{Nt/m}^2$). Ωστόσο πολλές φορές η πίεση εκφράζεται και σε bar ($1\text{bar} = 10^5 \text{Pa}$) και σε atm ($1\text{atm} = 1,0133\text{bar}$) [5, §1.4], [18, §1.4.2].

3.1.5 Συμπιεστότητα – Μέτρο ελαστικότητας

Συμπιεστότητα ενός ρευστού ορίζεται η ιδιότητα της μείωσης του όγκου του όταν αυξάνεται η πίεση που ασκείται σε αυτό.

Μέτρο συμπιεστότητας [K] ορίζεται ως ο λόγος της ποσοστιαίας μεταβολής του όγκου προς την αντίστοιχη μεταβολή της πίεσης.

$$K = - \frac{\Delta V / V}{\Delta p} \quad (3.7)$$

Στον παραπάνω τύπο το (-) είναι αναγκαίο προκειμένου να είναι θετικό το μέτρο συμπιεστότητας, διότι η αύξηση της πίεσης ($\Delta p > 0$) συνεπάγεται μείωση του όγκου ($\Delta V < 0$).

Μέτρο ελαστικότητας [E] ορίζεται το αντίστροφο του μέτρου συμπιεστότητας:

$$E = \frac{1}{K} = \frac{\Delta p}{-\Delta V / V} \quad (3.8)$$

Κατά τη διαδικασία μεταβολής της πίεσης, η μάζα του ρευστού διατηρείται σταθερή, επομένως:

$$M = V \rho = \text{σταθ.}$$

$$\Rightarrow \Delta M = \Delta V \rho + \Delta \rho V = 0$$

$$\Rightarrow -\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3.9)$$

Στη συνέχεια ακολουθούν τα μέτρα συμπιεστότητας και ελαστικότητας συναρτήσει των μεταβολών της πυκνότητας.

$$K = \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta p} \quad (3.10)$$

$$E = \frac{\Delta p}{\Delta \rho / \rho} \quad (3.11)$$

Μονάδες μέτρησης του μέτρου ελαστικότητας είναι οι μονάδες μέτρησης της πίεσης, ενώ μονάδες μέτρησης του μέτρου συμπιεστότητας είναι οι αντίστροφες της πίεσης [5, §1.5], [18, §1.4.6].

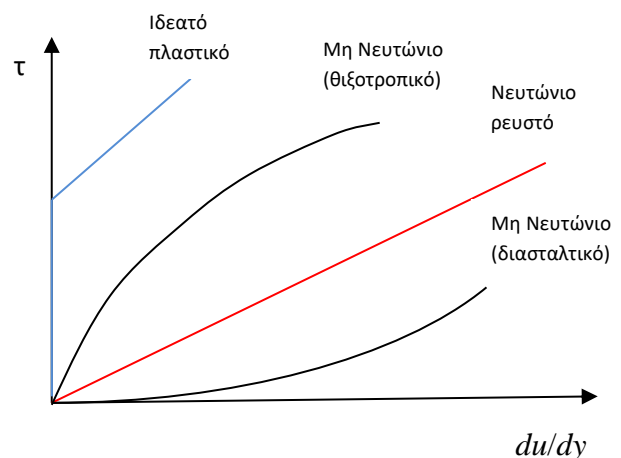
3.1.6 Συνεκτικότητα

Η συνεκτικότητα ή αλλιώς το κινηματικό ιξώδες $[\mu]$ αποτελεί την πιο σπουδαία και χαρακτηριστική ιδιότητα των ρευστών όσον αφορά τη ροή τους. Συνδέεται δε με την ειδοποιό διαφορά των ρευστών από τα στερεά, δηλαδή με τη συνεχή παραμόρφωση αυτών υπό την επίδραση διατμητικών τάσεων. Το ιξώδες είναι η ιδιότητα του ρευστού που καθορίζει τόσο το πόσο γρήγορα ρέει αυτό υπό την επίδραση διατμητικής τάσης, όσο και το πόση ενέργεια χάνεται κατά τη ροή ενός ρευστού σε αγωγούς, στόμια και κανάλια. Το ιξώδες μπορεί να μεταβάλλεται με το μέγεθος της τάσης ή της ταχύτητας παραμόρφωσης, δηλαδή $\mu = \mu(\tau)$ ή $\mu = \mu(du/dy)$. Η σχέση που συνδέει τα τρία αυτά μεγέθη είναι η εξής:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.12)$$

Μονάδες μέτρησης του δυναμικού ιξώδους στο S.I. είναι Pa·s ή kg/(m·s).

Νευτώνιο καλείται κάθε ρευστό που η τιμή του ιξώδους παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη από τις τιμές των τ και du/dy και, όπως προκύπτει από τη σχέση (3.12), η γραφική του παράσταση σε άξονες $(du/dy, \tau)$ είναι μία ευθεία που ξεκινά από την αρχή των αξόνων (σχήμα 3.3). Τα πιο συνηθισμένα ρευστά που είναι το νερό και ο αέρας δεν είναι Νευτώνια, ωστόσο συμπεριφέρονται σε πολύ μεγάλο βαθμό σαν Νευτώνια. Μη Νευτώνια καλούνται τα ρευστά στα οποία η τιμή του μ μεταβάλλεται με τη μεταβολή των μεγεθών από τα οποία εξαρτάται.



Σχήμα 3.3: Γραφική παράσταση ταχύτητας παραμόρφωσης – διατμητικής τάσης προς εύρεση ιξώδους για διάφορα υλικά [5, σχ.1.5].

Τα ρευστά των οποίων το ιξώδες μειώνεται όταν αυξάνεται η ταχύτητα παραμόρφωσης λέγονται θιξοτροπικά (π.χ. κόλλα), ενώ εκείνα των οποίων το ιξώδες μ αυξάνεται όταν αυξάνεται η ταχύτητα παραμόρφωσης λέγονται διασταλτικά (π.χ. σιρόπι), όπως φαίνονται στο σχήμα 3.3. Ιδεατά ρευστά είναι τα ασυμπίεστα ρευστά με ιξώδες $\mu=0$. Τέτοια ρευστά δεν υπάρχουν στη φύση.

Η τιμή του ιξώδους μπορεί να επηρεάζεται και από άλλες ιδιότητες του ρευστού και κυρίως από τη θερμοκρασία. Έτσι για παράδειγμα στα υγρά το ιξώδες μειώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας, σε αντίθεση με τα αέρια που αυξάνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας.

Όταν το μοριακό ιξώδες μ διαιρεθεί με την πυκνότητα, τότε προκύπτει ένα νέο μέγεθος-ιδιότητα που ονομάζεται κινηματικό ιξώδες ν .

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.13)$$

Μονάδες μέτρησης του κινηματικού ιξώδους στο S.I. είναι m^2/s [5, §1.6], [18, §1.4.3].

3.1.7 Επιφανειακή τάση

Τα μόρια που βρίσκονται στο εσωτερικό ενός υγρού δέχονται συμμετρικές ελκτικές δυνάμεις από τα γειτονικά μόρια, σε αντίθεση με εκείνα που βρίσκονται στις διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ υγρού και αερίου ή μεταξύ δύο μη μιγνυμένων υγρών που δέχονται διαφορετικού μεγέθους δυνάμεις εκατέρωθεν της επιφάνειας. Μία από τις βασικές αρχές κάθε θερμοδυναμικού συστήματος είναι ότι προσπαθεί να ελαττώσει όσο το δυνατόν την ενέργειά του, ώστε να είναι πιο σταθερό. Αποτέλεσμα της αρχής της ελάχιστης ενέργειας και των όσων προαναφέρθηκαν είναι πως τα υγρά προσπαθούν να ελαττώσουν όσο το δυνατόν την εξωτερική τους επιφάνεια. Γι' αυτό και σταγόνες του νερού και άλλων υγρών έχουν σχήμα σφαιρικό, αφού η σφαίρα είναι το σχήμα με το μικρότερο δυνατό εμβαδό εξωτερικής επιφάνειας μεταξύ σωμάτων ίδιου όγκου. Για τη διαστολή μίας τέτοιας επιφάνειας απαιτείται έργο, το οποίο δαπανούν τα μόρια που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια και προκύπτει από ένα είδος δυναμικής ενέργειας που διαθέτουν τα επιφανειακά μόρια. Επιφανειακή τάση $[\sigma]$ των ρευστών αποκαλείται ακριβώς αυτή η ιδιότητα λόγω της επαφής με άλλο μέσο και ορίζεται ως το πηλίκο της δύναμης F που πρέπει να ασκηθεί σε μία επιφάνεια, ώστε να εξουδετερώσει τη δύναμη επιφανειακής τάσης προς το μήκος L της επιφάνειας ή διαφορετικά η ισοδύναμη ενέργεια ελεύθερης επιφάνειας ανά μονάδα επιφάνειας:

$$\sigma_1 = \frac{F}{L} \quad (3.14)$$

Όταν ένα υγρό εφάπτεται ενός στερεού και όχι του αέρα, τότε μεταξύ των μορίων του υγρού αναπτύσσονται δυνάμεις συνοχής και μεταξύ των μορίων υγρού και στερεού δυνάμεις συνάφειας. Εξαιτίας αυτών των δυνάμεων παρατηρείται συχνά η στάθμη του υγρού μέσα σε λεπτούς σωλήνες που βυθίζονται εν μέρει στο υγρό να ανέρχεται ή να κατέρχεται, αντιστοίχως εάν οι δυνάμεις συνάφειας είναι μεγαλύτερες των δυνάμεων συνοχής ή το αντίθετο. Τέτοια φαινόμενα ονομάζονται τριχοειδή [5, §1.7], [18, §1.4.4].

3.1.8 Φυσικές ιδιότητες του νερού

Το πιο συνηθισμένο ρευστό, καθώς επίσης και ένα από τα αντικείμενα αυτής της εργασίας είναι το νερό, γι' αυτό σε αυτήν την παράγραφο αναλύονται οι φυσικές ιδιότητές του. Οι κυριότερες από αυτές είναι η μοριακή δομή, η πυκνότητα, το ιξώδες (κινηματικό και μοριακό), η επιφανειακή τάση και το μέτρο ελαστικότητας. Επίσης στους πίνακες που ακολουθούν φαίνεται το πώς επηρεάζονται οι τιμές αυτών των ιδιοτήτων από τη μεταβολή της θερμοκρασίας και από ενδεχόμενες προσμίξεις.

Μοριακή δομή: Το νερό είναι αποτέλεσμα της ένωσης του υδρογόνου και του οξυγόνου, τα οποία συναντώνται στη φύση υπό τη μορφή δύο ομάδων ισοτόπων (πίνακας 3.1).

Πίνακας 3.1 Τα ισότοπα του υδρογόνου και του οξυγόνου [2, Π.2.1.1.1]

Ισότοπα	Συχνότητα εμφάνισης
Υδρογόνο H ¹ (ή H)	99,986%
Δευτέριο H ² (ή D) ¹	0,014%
Οξυγόνο O ¹⁶	97,760%
Οξυγόνο O ¹⁷	0,040%
Οξυγόνο O ¹⁸	0,200%

Από την ένωση των διαφορετικών ισοτόπων του υδρογόνου και του οξυγόνου προκύπτουν 6 τύποι μορίων νερού (πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2 Οι τύποι μορίων νερού [2, Π.2.1.1.2]

Μόρια	Συχνότητα εμφάνισης
H ₂ O ¹⁶	99,746 034%
H ₂ O ¹⁸	0,199 972%
H ₂ O ¹⁷	0,039 994%
βαρύ ύδωρ D ₂ O ¹⁶	0,013 966%
D ₂ O ¹⁷	0,000 028%
D ₂ O ¹⁸	0,000 006%

Οι υπόλοιπες ιδιότητες που έχουν αναλυθεί σε προηγούμενες ενότητες φαίνονται ενδεικτικά στον πίνακα 3.3 με ορισμένες τιμές τους για διαφορετικές θερμοκρασίες [2, §2.1].

Πίνακας 3.3 Ιδιότητες νερού [18, παράρτημα 3, Π.3.1]

Θερμοκρασία		Πυκνότητα	Ιξώδες	Κινηματικό ιξώδες	Επιφανειακή τάση	Μέτρο ελαστικότητας
[T]		[ρ]	[μ] × 10 ³	[ν] × 10 ⁶	[σ]	[E]
K	°C	Kg/m ³	Pa*s	m ² /s	N/m	Pa
273	0	999	1,790	1,790	0,0762	204 × 10 ⁷
278	5	1000	1,519	1,519	0,0754	206 × 10 ⁷
283	10	999,7	1,308	1,308	0,0748	211 × 10 ⁷
288	15	999,1	1,140	1,140	0,0741	214 × 10 ⁷
293	20	998,2	1,005	1,005	0,0736	200 × 10 ⁷

Πίνακας 3.3 [...συνέχεια]

Θερμοκρασία		Πυκνότητα	Ιξώδες	Κινηματικό ιξώδες	Επιφανειακή τάση	Μέτρο ελαστικότητας	
[T]	[ρ]	[μ] × 10 ³	[ν] × 10 ⁶	[σ]	[E]	[T]	[ρ]
303	30	996,0	0,798	0,798	0,0718	223	× 10 ⁷
313	40	992,2	0,656	0,656	0,0701	227	× 10 ⁷
323	50	988,1	0,549	0,549	0,0682	230	× 10 ⁷
333	60	983,2	0,469	0,469	0,0668	228	× 10 ⁷
343	70	977,8	0,406	0,406	0,0650	225	× 10 ⁷
353	80	971,8	0,357	0,357	0,0630	221	× 10 ⁷
363	90	965,3	0,317	0,317	0,0612	216	× 10 ⁷
373	100	958,4	1,284	1,284	0,0594	207	× 10 ⁷

3.2 Θεμελιώδεις νόμοι και γενικές εξισώσεις

Η μελέτη της ροής των ρευστών είναι βασισμένη σε θεμελιώδεις νόμους της μηχανικής που αφορούν την κίνηση των σωματιδίων του ρευστού. Όπως έχει προαναφερθεί, η κίνηση ενός ρευστού προκαλείται είτε από διατμητικές, είτε από κάθετες τάσεις. Σε αυτό το σημείο είναι αναγκαίο να αποσαφηνιστούν οι τρεις μεγάλες κατηγορίες ανάλυσης, οι οποίες δομούν τη μηχανική των ρευστών. Πρόκειται για τη δυναμική, την κινηματική και τη στατική των ρευστών. Η μεν δυναμική των ρευστών ασχολείται με τη μελέτη και την ανάλυση των δυνάμεων που προκαλούν την κίνηση ενός ρευστού, η δε κινηματική ασχολείται μόνο με τα αποτελέσματα των δυνάμεων αυτών πάνω στο ρευστό που παράγουν κίνηση, περιλαμβάνοντας έτσι βασικές έννοιες, όπως η ταχύτητα και η επιτάχυνση του ρευστού. Όσον αφορά τη στατική των ρευστών, ασχολείται με τα ρευστά που βρίσκονται σε ηρεμία [5, §2.1], [18, §2.1].

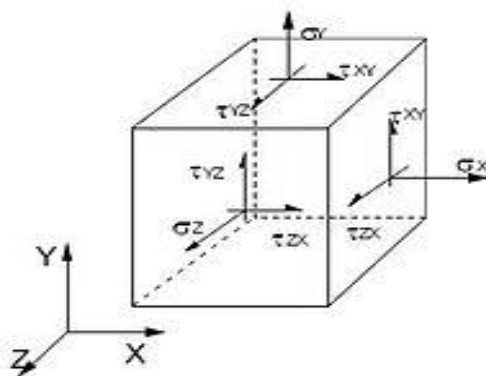
3.2.1 Είδη δυνάμεων

Οι δυνάμεις που μπορούν να ασκηθούν στον όγκο ενός ρευστού μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες:

- *Καθολικές δυνάμεις:* Είναι οι δυνάμεις που δρουν σε όλο το εύρος του όγκου του ρευστού, δηλαδή ασκούνται στο κέντρο βάρους κάθε ρευστού σωματιδίου. Αυτές συνήθως αναπτύσσονται με επίδραση από απόσταση, δηλαδή μπορεί να προέρχονται από το πεδίο βαρύτητας, από φυγοκεντρικό πεδίο δυνάμεων ή από ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ωστόσο μπορεί να είναι και αδρανειακές δυνάμεις, όταν το σύστημα αναφοράς της κίνησης κινείται με επιτάχυνση.
- *Γραμμικές δυνάμεις:* Είναι οι δυνάμεις που εμφανίζονται ως αποτέλεσμα της επιφανειακής τάσης στα όρια επαφής μεταξύ υγρού και αερίου ή δύο μη μιγνυομένων υγρών και γι' αυτό στις εξισώσεις κίνησης δεν συμπεριλαμβάνονται παρά μόνο σαν οριακές συνθήκες.
- *Επιφανειακές δυνάμεις:* Πρόκειται για δυνάμεις που ασκούνται στην επιφάνεια που διαχωρίζει το θεωρούμενο τμήμα του ρευστού από το υπόλοιπο (περιβάλλον) ρευστό.

Για την κατανόηση και τη μελέτη των δυνάμεων αυτών θεωρείται στοιχειώδης όγκος ρευστού μορφής ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με πλευρές Δ_x , Δ_y και Δ_z . Σε κάθε έδρα του παραλληλεπίπεδου ασκούνται από το περιβάλλον ρευστό κάθετες και εφαπτομενικές δυνάμεις, οι οποίες διαιρούμενες με

το εμβαδό της επιφάνειας που αντιστοιχούν μετατρέπονται σε ορθές και διατμητικές τάσεις (σχήμα 3.4). Ως προς το συμβολισμό, η ορθή τάση σ έχει ένα μόνο δείκτη που δηλώνει τον άξονα ως προς τον οποίο είναι παράλληλη, ενώ η διατμητική τάση τ έχει δύο δείκτες, εκ των οποίων ο πρώτος δείχνει την έδρα στην οποία ασκείται και ο δεύτερος, τον άξονα στον οποίο είναι παράλληλη. Επιπλέον οι διατμητικές τάσεις που οι δείκτες τους αποτελούνται από τα ίδια γράμματα, αλλά με διαφορετική σειρά, είναι ίσες μεταξύ τους για ένα απειροστό στοιχείο. Ακόμη όλες οι τάσεις στο σχήματος είναι θετικές, αφού έχουν τη θετική φορά των αντίστοιχων αξόνων συντεταγμένων στους οποίους είναι παράλληλες. Πιο συγκεκριμένα οι ορθές τάσεις είναι θετικές, όταν προκαλούν εφελκυσμό στον όγκο του ρευστού [5, §2.1, §4.1], [18, §2.1].



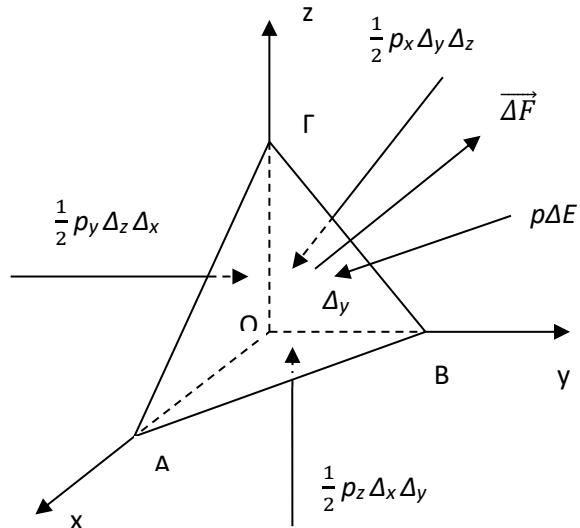
Σχήμα 3.4: Γραφική απεικόνιση των καρτεσιανών συνιστωσών των επιφανειακών δυνάμεων [18, σχ. 2.3].

3.2.2 Εντατική κατάσταση σε σημείο ρευστού που ισορροπεί

Η πίεση p παίζει κυρίαρχο ρόλο σε αυτήν την παράγραφο, εξαιτίας του ότι ευθύνεται για την ισορροπία ενός ρευστού. Το στοιχειώδες τμήμα ενός ρευστού με μορφή τετραέδρου $OAB\Gamma$ (σχήμα 3.5), ισορροπεί υπό την επίδραση των κάθετων δυνάμεων, που προέρχονται από τις πιέσεις που δέχεται ο όγκος του ρευστού στις επιφάνειές του, και των καθολικών δυνάμεων που έχουν συνισταμένη $\overline{\Delta F}$ ανάλογη με τη μάζα του στοιχείου. Τα μεγέθη p_x , p_y και p_z βρίσκονται στα επίπεδα yOz , xOz και xOy αντίστοιχα και p η πίεση που δρα στην έδρα $AB\Gamma$ με τυχαίο προσανατολισμό και κάθετη που σχηματίζει με τους τρεις άξονες γωνίες $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$, $\hat{\gamma}$. Με αναλυτική γραφή των εξισώσεων ισορροπίας προκύπτει ότι:

$$p_x = p_y = p_z = p \quad (3.15)$$

Δηλαδή, η πίεση σε σημείο ισορροπούντος ρευστού είναι ανεξάρτητη της διεύθυνσης της επιφάνειας στην οποία ενεργεί. Η παραπάνω διαπίστωση είναι αποτέλεσμα της απουσίας διατμητικών τάσεων, οπότε οι ορθές τάσεις στις επιφάνειες των υγρών στοιχείων ανάγονται σε πιέσεις.



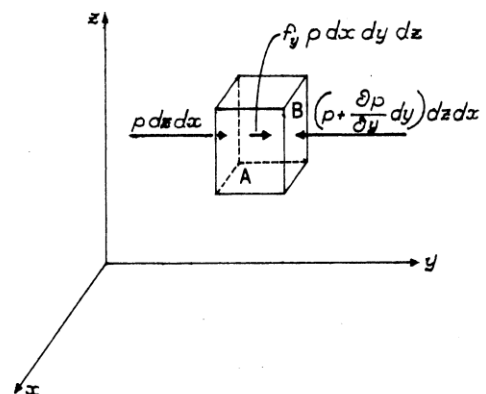
Σχήμα 3.5: Πιέσεις ασκούμενες σε στοιχειώδη όγκο ρευστού [5, σχ. 2.1].

3.2.3 Ισοροπία ρευστών σε πεδίο καθολικών δυνάμεων

Στη συνέχεια εξετάζεται η ισοροπία στοιχειώδους ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με διαστάσεις dx , dy , dz , σε πεδίο καθολικών δυνάμεων χαρακτηριζόμενο από την ανά μονάδα μάζας καθολική δύναμη \vec{f} με συνιστώσες f_x, f_y, f_z (Σχήμα 3.6), που ουσιαστικά έχουν διαστάσεις επιτάχυνσης.

Δεδομένου ότι το ρευστό στοιχείο ισορροπεί υπό την επίδραση της καθολικής δύναμης και των κάθετων δυνάμεων που ασκούνται λόγω πιέσεων στις 6 έδρες του παραλληλεπίπεδου, προκύπτουν κάποιες συγκεκριμένες εξισώσεις ισοροπίας:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} + f_x \cdot \rho &= 0 & \frac{\partial p}{\partial x} &= \rho \cdot f_x \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + f_y \cdot \rho &= 0 & \frac{\partial p}{\partial y} &= \rho \cdot f_y \\ -\frac{\partial p}{\partial z} + f_z \cdot \rho &= 0 & \frac{\partial p}{\partial z} &= \rho \cdot f_z \end{aligned} \quad \text{ή} \quad (3.16)$$



Σχήμα 3.6: Ασκούμενες ορθές πιέσεις επί επί στοιχειώδους ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου [5, σχ. 2.2].

με βάση αυτές τις σχέσεις αλλά λαμβάνοντας υπόψη ότι για τη συνάρτηση $p(x,y,z)$ ισχύει η μαθηματική σχέση:

$$dp = \frac{\partial p}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial p}{\partial y} \cdot dy + \frac{\partial p}{\partial z} \cdot dz \quad (3.17)$$

προκύπτει:

$$dp = \rho \cdot (f_x \cdot dx + f_y \cdot dy + f_z \cdot dz) \quad (3.18)$$

ή με τη διανυσματική της μορφή:

$$dp = \rho \cdot \vec{f} \cdot \vec{dr} \quad (3.19)$$

Οι εξισώσεις (3.18) και (3.19) αποτελούν τη θεμελιώδη σχέση ισοροπίας ρευστού σε πεδίο καθολικών δυνάμεων. Είναι φανερό ότι, εάν το πεδίο των καθολικών δυνάμεων είναι μηδενικό, δηλαδή $\vec{f} = 0$, τότε και $dp = 0$, δηλαδή μεταξύ δύο τυχόντων σημείων δεν υπάρχει διαφορά πίεσης, ώστε, εάν το ρευστό ισορροπεί χωρίς να υπόκειται σε καθολικές δυνάμεις η πίεση είναι ίδια σε κάθε σημείο του ρευστού. Αν όμως $\vec{f} \neq 0$, με βάση τη σχέση (3.19) προκύπτει ότι

$$dp = 0 \Leftrightarrow \vec{f} \perp \vec{dr} \quad (3.20)$$

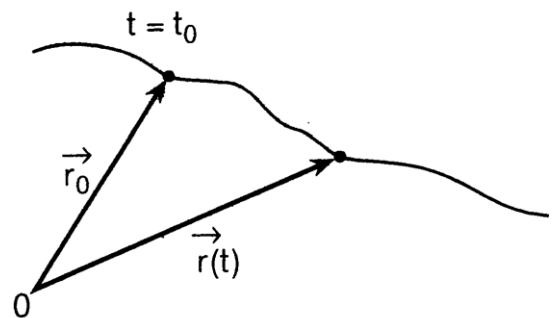
Δηλαδή η πίεση είναι ίδια μεταξύ δύο σημείων μόνο όταν το διάνυσμα που τα συνδέει είναι κάθετο προς τη διεύθυνση του πεδίου καθολικών δυνάμεων. Η εξίσωση $p(x,y,z)=c$ παριστά στο χώρο μία επιφάνεια όπου η πίεση παραμένει σταθερή και ονομάζεται ισοθλιπτική επιφάνεια. Οι ισοθλιπτικές επιφάνειες είναι κάθετες προς τη διεύθυνση του πεδίου. [5, §2.3].

3.2.4 Περιγραφή της κίνησης του ρευστού

3.2.4.1 Μέθοδοι περιγραφής

Δύο είναι οι μέθοδοι για την περιγραφή της κίνησης του ρευστού. Η μέθοδος Lagrange και η μέθοδος Euler.

Αρχικά η μέθοδος **Lagrange** μελετά τα διαδοχικά στάδια ενός ρευστού σωματιδίου, δηλαδή παρουσιάζονται οι διαδοχικές θέσεις του ρευστού με την πάροδο του χρόνου και στη συνέχεια συνάγεται η ταχύτητα και η επιτάχυνσή του. Για να γίνει πλήρως αντιληπτή αυτή η μέθοδος, πρέπει να είναι γνωστή η θέση του κάθε ρευστού στο χώρο σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή t_0 . Έστω ότι για $t=t_0$ οι συντεταγμένες του τυχόντος σωματιδίου M είναι (x_0, y_0, z_0) . Τότε κατά τη μέθοδο Lagrange η θέση του σωματιδίου M δίνεται από συνοπτική διανυσματική μορφή (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Θέσεις ρευστού σωματιδίου κατά τη μέθοδο Lagrange [5, σχ. 3.1].

$$\vec{r} = \varphi \cdot (\vec{r}_0, t) \quad (3.21)$$

Όπου \vec{r}_0 είναι το διάνυσμα με συνιστώσες x_0, y_0, z_0 που ορίζει την αρχική θέση του σωματιδίου του ρευστού στις τρεις διαστάσεις του χώρου σε σχέση με το σημείο 0. Προκύπτει έτσι πως η θέση του σωματιδίου είναι η

εξαρτημένη μεταβλητή του προβλήματος και εξαρτάται από το χρόνο και την αρχική του θέση, η οποία και το προσδιορίζει στο χώρο.

Η ταχύτητα \vec{V} και η επιτάχυνση \vec{a} του σωματιδίου βρίσκονται από τις μεταβολές της θέσης του, συναρτήσει του χρόνου:

$$\vec{V} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (3.22)$$

$$\vec{a} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \quad (3.23)$$

Στη συνέχεια εξετάζεται η μέθοδος **Euler** η οποία ασχολείται με το τι συμβαίνει σε καθορισμένα σημεία του χώρου με την πάροδο του χρόνου. Επεξηγηματικό παράδειγμα αυτής της μεθόδου είναι όταν ένας παρατηρητής είναι ακίνητος και μελετά τα χαρακτηριστικά της ροής στη γειτονιά τυχόντος σταθερού σημείου, καθώς διάφορα ρευστά σωματίδια διέρχονται από αυτό. Επομένως κατά τη μέθοδο αυτήν, η θέση του σημείου $\vec{r}(x, y, z)$ είναι ανεξάρτητη μεταβλητή από το χρόνο, ενώ η ταχύτητα δίνεται ως συνάρτηση της θέσης και του χρόνου

$$\vec{V} = f(\vec{r}, t) \quad (3.24)$$

Είναι φανερό ότι η μεταβολή της ταχύτητας \vec{V} στο σημείο (x, y, z) οφείλεται στο ότι με την πάροδο του χρόνου στο σημείο αυτό βρίσκονται διαφορετικά ρευστά σωματίδια, τα οποία κινούνται εν γένει με διαφορετική ταχύτητα. Η παρατηρούμενη σε συγκεκριμένο σημείο και σε ορισμένη χρονική στιγμή ταχύτητα κατά Euler είναι η ταχύτητα του σωματιδίου που βρίσκεται κατά τη στιγμή εκείνη στο θεωρούμενο σημείο. Η διαπίστωση αυτή συνδέει τις μεθόδους Lagrange και Euler και προκύπτει η σχέση:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{V} = f(\vec{r}, t) \quad (3.25)$$

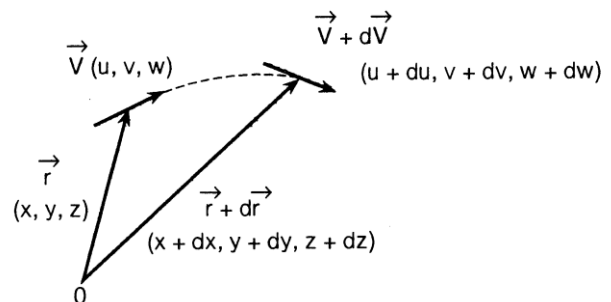
Η επίλυση των ανωτέρω διαφορικών εξισώσεων προϋποθέτει τον ορισμό των αρχικών συνθηκών,

$$t = t_0 \text{ και } r = r_0 \quad (3.26)$$

οδηγεί στη σχέση

$$r = \varphi(\vec{r}_0, t) \quad (3.27)$$

Δηλαδή η περιγραφή κατά Lagrange προκύπτει από αυτήν κατά Euler, επιτρέποντας έτσι τη μετάβαση από τη μία στην άλλη ως ισοδύναμες. Ωστόσο οι δυσχέρειες ολοκλήρωσης είναι μεγάλες, γεγονός που καθιστά περιορισμένη την αξιοποίηση της παραπάνω σύνδεσης. Κατά τη



μέθοδο Euler, η επιτάχυνση του ρευστού σωματιδίου βρίσκεται από την έκφραση της μεταβολής

Σχήμα 3.8: Προσδιορισμός επιτάχυνσης σωματιδίου από τη μεταβολή της ταχύτητας κατά τη μέθοδο Euler [5, σχ. 3.2].

της ταχύτητας $\vec{V}(x, y, z, t)$, καθώς το σωματίδιο μετακινείται από τη θέση (x, y, z) που κατέχει τη χρονική στιγμή t στη γειτονική θέση $(x + dx, y + dy, z + dz)$ κατά τη χρονική στιγμή $t + dt$. Αν θεωρηθεί η συνιστώσα u της ταχύτητας είναι $u = u(x, y, z, t)$, δηλαδή:

$$du = \frac{\partial u}{\partial t} \cdot dt + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial u}{\partial y} \cdot dy + \frac{\partial u}{\partial z} \cdot dz \quad (3.28)$$

Όμως η μετακίνηση των (dx, dy, dz) οφείλεται ακριβώς στην ταχύτητα, δηλαδή:

$$dx = u \cdot dt, dy = v \cdot dt, dz = w \cdot dt \quad (3.29)$$

Επομένως, η επιτάχυνση κατά x δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$a_x = \frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.30)$$

Με ανάλογο τρόπο προκύπτουν και τα a_y, a_z . Η σχέση (3.30) λέγεται υλική παράγωγος, επειδή προκύπτει από την παρακολούθηση της κίνησης του σωματιδίου στη γειτονική περιοχή της αρχικής του θέσης. Ο Stokes συμβολίζει την υλική παράγωγο ως D/Dt και επομένως η (3.30) φράφεται συντομότερα ως εξής:

$$a_x = \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)u \quad (3.31)$$

Παρατηρείται πως η επιτάχυνση του ρευστού κατά τη μέθοδο Euler αποτελείται από δύο μέρη: την τοπική επιτάχυνση που δίνεται από τον όρο $\frac{\partial u}{\partial t}$, και τη μεταθετική επιτάχυνση που εκφράζεται με το δεύτερο όρο $(\vec{V} \cdot \nabla)u$. Η τοπική επιτάχυνση εκφράζει τη μεταβολή της ταχύτητας σε συγκεκριμένο σημείο, ενώ η μεταθετική επιτάχυνση δίνει τη μεταβολή της ταχύτητας που οφείλεται στη μετακίνηση (μετάθεση) του ρευστού σωματιδίου σε γειτονικό χώρο.

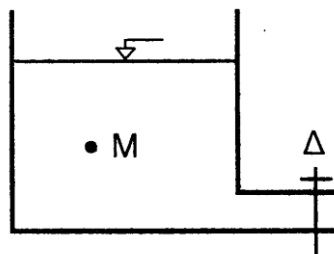
Γενικότερα, κατά τη μέθοδο του Euler η μεταβολή μιας οποιασδήποτε βαθμωτής ή διανυσματικής ιδιότητας του ρευστού, λ , εκφράζεται με ανάλογο τρόπο όπως η μεταβολή της ταχύτητας, δηλαδή:

$$\frac{D\lambda}{Dt} = \frac{\partial \lambda}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \cdot \lambda \quad (3.32)$$

όπου $\partial \lambda / \partial t$ και $(\vec{V} \cdot \nabla) \cdot \lambda$ είναι η μεταθετική μεταβολή [5, §3.1].

3.2.4.2 Κινηματικός χαρακτηρισμός της ροής

Όταν η τοπική επιτάχυνση είναι μηδέν σε κάθε σημείο του πεδίου ροής, δηλαδή $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = 0$ η ροή λέγεται μόνιμη, διαφορετικά μη μόνιμη. Στη μόνιμη ροή η ταχύτητα μπορεί να μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο, αλλά παραμένει αμετάβλητη σε κάθε συγκεκριμένο σημείο με την πάροδο του χρόνου. Με άλλα λόγια, η ταχύτητα είναι συνάρτηση του χώρου. Παράδειγμα μη μόνιμης ροής υπάρχει κατά την εκκένωση δοχείου (Σχήμα 3.9).

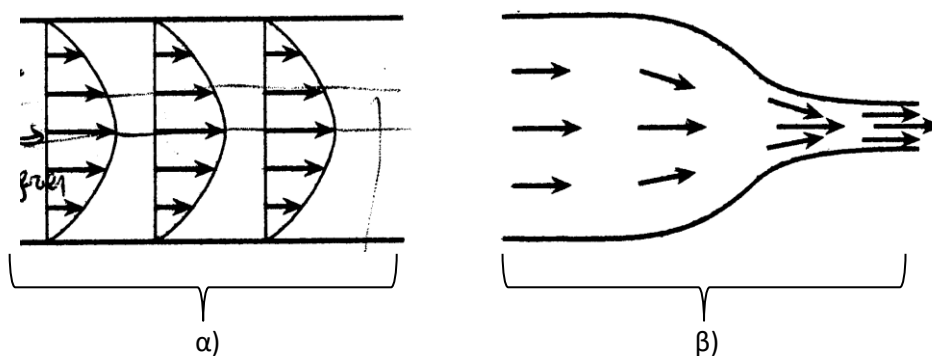


Σχήμα 3.9: Παράδειγμα μη μόνιμης ροής με εκκένωση δοχείου χωρίς πλήρωση [5, σχ. 3.3].

Αν ανοίξει η δικλείδα Δ και αρχίσει η εκροή του υγρού, η ταχύτητα σε τυχόν σημείο M μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου λόγω πτώσης της ελεύθερης επιφάνειας.

Αντίθετα αν κατά τη διάρκεια της εκροής, τροφοδοτείται συγχρόνως το δοχείο κατάλληλα, ώστε η ελεύθερη επιφάνεια να διατηρείται σταθερή, τότε η ταχύτητα στο M δεν αλλάζει και η ροή είναι μόνιμη.

Όταν όλες οι συνιστώσες της μεταθετικής επιτάχυνσης σε δεδομένη χρονική στιγμή είναι μηδέν, δηλαδή $(\vec{V} \cdot \nabla) \cdot \vec{V} = 0$, η ροή λέγεται **ομοιόμορφη**, διαφορετικά **ανομοιόμορφη**. Η μεταθετική επιτάχυνση μηδενίζεται όταν η ταχύτητα έχει την ίδια διεύθυνση και φορά σε όλα τα σημεία του πεδίου ροής, και δε μεταβάλλεται το μέτρο της κατά τη διεύθυνση αυτή. Π.χ. ομοιόμορφη ροή παρατηρείται σε ένα ευθύγραμμο αγωγό σταθερής διατομής όπως στο Σχήμα 3.10α, ενώ στην περιοχή της μεταβαλλόμενης διατομής του Σχήμα 3.10β η ροή είναι ανομοιόμορφη. Θα πρέπει να τονιστεί ότι στην ομοιόμορφη ροή η ταχύτητα δεν έχει το ίδιο μέτρο σε όλα τα σημεία του πεδίου.



Σχήμα 3.10: α) ομοιόμορφη, β) ανομοιόμορφη ροή ενός αγωγού [5, σχ. 3.4].

Μια ροή λέγεται μονοδιάστατη αν οι ταχύτητες και τα λοιπά χαρακτηριστικά της ροής εξαρτώνται μόνο από μια μεταβλητή του χώρου, δηλαδή μεταβάλλονται κατά μία μόνο διεύθυνση. Υπό ευρύτερη έννοια, η ροή θεωρείται ως μονοδιάστατη και όταν υπάρχουν μεν μεταβολές των χαρακτηριστικών της ροής εγκάρσια προς την κύρια διεύθυνση αυτής, αλλά είναι αμελητέες ή δεν ενδιαφέρουν. Κλασικές περιπτώσεις μονοδιάστατης ροής είναι οι ροές σε επιμήκεις κλειστούς αγωγούς (σωλήνες) ή ανοικτές διώρυγες όπου ενδιαφέρουν τα μεγέθη της ροής κατά μήκος του αγωγού και όχι σε εγκάρσιες διατομές, παρόλο που υπάρχουν διαφοροποιήσεις των ταχυτήτων πάνω στη διατομή. Με περαιτέρω επέκταση της έννοιας της μονοδιάστατης ροής αντιμετωπίζεται σε πρώτη προσέγγιση ως τέτοια και η ροή σε επιμήκεις καμπυλόγραμμους αγωγούς, όπου η κύρια διεύθυνση δεν παραμένει σταθερή, αλλά ακολουθεί τον άξονα του αγωγού. Στην τελευταία περίπτωση η ροή είναι στην πραγματικότητα τρισδιάστατη.

Δισδιάστατη ή επίπεδη ροή λέγεται εκείνη της οποίας οι ταχύτητες και τα λοιπά χαρακτηριστικά εξαρτώνται από δύο μεταβλητές (καρτεσιανές συντεταγμένες) του χώρου και δεν μεταβάλλονται κάθετα προς το οριζόμενο από αυτές επίπεδο. Τέλος όταν τα χαρακτηριστικά της ροής εξαρτώνται και από τις τρεις χωρικές μεταβλητές, αυτή λέγεται τρισδιάστατη. Ειδική περίπτωση τρισδιάστατης ροής είναι η αξονοσυμμετρική, η οποία παρουσιάζει άξονα συμμετρίας και μπορεί να περιγραφεί, κατ' αναλογία προς τη δισδιάστατη ροή, με δύο μόνο συντεταγμένες σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων [5, §3.2].

3.2.5 Θεμελιώδης νόμος της αρχής διατήρησης της μάζας

Η μάζα αποτελεί το ποσοτικό μέτρο της ύλης και, σύμφωνα με την κλασική μηχανική, δεν είναι δυνατό ούτε να δημιουργηθεί, ούτε να εξαφανιστεί. Επομένως, αν θεωρηθεί ένα σύνολο συγκεκριμένων ρευστών σωματιδίων με στοιχειώδεις μάζες dm , η συνολική μάζα τους παραμένει αναλλοίωτη κατά την κίνηση τους:

$$\int dm = \text{σταθ.} \quad (3.33)$$

$$\frac{D}{Dt} \int dm = 0 \quad (3.34)$$

όπου η ολοκλήρωση υπονοεί το σύνολο των θεωρούμενων σωματιδίων και D/Dt εκφράζει την ολική παράγωγο, λαμβανομένης υπόψη της τοπικής και της μεταθετικής μεταβολής.

Στα ομογενή ρευστά, δηλαδή εκείνα που υπάρχουν στον εξεταζόμενο χώρο ως ένα απλό είδος, η αρχή διατήρησης της μάζας οδηγεί σε έκφραση συσχετισμού των χρονικών και χωρικών μεταβολών της πυκνότητας και της ταχύτητας του ρευστού, που είναι γνωστή ως εξίσωση συνεχείας. Στην περίπτωση ανομοιογενών ρευστών, όπου στον εξεταζόμενο χώρο συνυπάρχουν περισσότερα από ένα διακεκριμένα είδη, η αρχή διατήρησης της μάζας ισχύει για κάθε ένα είδος ξεχωριστά. Σημειώνεται ότι τα είδη μπορεί να είναι της ίδιας ή και διαφορετικής φάσης [5, §4.2.1].

3.2.6 Θεμελιώδης νόμος της ποσότητας κίνησης – 2ος νόμος του Νεύτωνα

Στην κλασική μηχανική θεμελιώδης νόμος της δυναμικής είναι ο 2ος νόμος του Νεύτωνα, που συνδέει το σύνολο των εξωτερικών δυνάμεων \vec{dF} που ενεργούν σε στοιχείο μάζας dm , με τη μάζα και την επιτάχυνση \vec{a} του στοιχείου και δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{dF} = \vec{a} \cdot dm \quad (3.35)$$

Επομένως για ένα σύνολο μαζών καθορισμένων ρευστών σωματιδίων θα είναι:

$$\vec{F} = \int \vec{a} \cdot dm \quad (3.36)$$

Ο νόμος αυτός διατυπώνεται εναλλακτικά με τη μορφή του θεωρήματος ποσότητας κίνησης, που αποδεικνύεται πιο εύχρηστη στη μηχανική των ρευστών. Η ποσότητα κίνησης (ή ορμή) σωματιδίου μάζας dm ορίζεται ως το γινόμενο $\vec{V} \cdot dm$. Δεδομένου ότι η επιτάχυνση είναι εξ ορισμού $\vec{a} = D\vec{V}/Dt$, ο νόμος του Νεύτωνα εκφράζεται μέσα από τη σχέση:

$$d\vec{F} = \left(\frac{D\vec{V}}{Dt} \right) \cdot m \quad (3.37)$$

και επειδή $D(dm)/Dt = 0$, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης μάζας,

$$d\vec{F} = D \cdot \frac{(\vec{V} \cdot dm)}{Dt} \quad (3.38)$$

Άρα για ένα σύνολο σωματιδίων:

$$\vec{F} = \left(\frac{D}{Dt} \right) \cdot \int \vec{V} \cdot dm \quad (3.39)$$

Δηλαδή, σύμφωνα με το θεώρημα ποσότητας κίνησης, το σύνολο των εξωτερικών δυνάμεων που δρουν σε ένα σύστημα μάζας ρευστού καθορισμένης οντότητας ισούται με τη μεταβολή (παράγωγο) ως προς το χρόνο της ποσότητας κίνησης του συστήματος. Η εφαρμογή του θεωρήματος αυτού στα ρευστά οδηγεί στις εξισώσεις κίνησης που συνδέουν τα κινηματικά με τα δυναμικά χαρακτηριστικά της ροής [5, §4.2.2].

3.2.7 Θεμελιώδες αξίωμα/ αρχής διατήρησης της ενέργειας

Η αρχή της διατήρησης της ενέργειας ή διαφορετικά, πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα, ορίζει ότι η διαφορά μεταξύ του ποσού της θερμότητας που προστίθεται σε ένα σύστημα μάζας ρευστού και του έργου που λαμβάνεται από το σύστημα εξαρτάται μόνον από την αρχική και τελική κατάσταση του

συστήματος και αποτελεί τη μεταβολή της ενέργειας E του συστήματος. Κατά συνέπεια η ενέργεια E αποτελεί ιδιότητα του ρευστού οριζόμενη πλήρως από την κατάσταση του.

Το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα διατυπώνεται υπό μορφή εξίσωσης ως εξής:

$$\delta Q - \delta W = dE \quad (3.40)$$

όπου:

- ◆ δQ χαρακτηρίζεται η προστιθεμένη θερμότητα στο σύστημα
- ◆ δW χαρακτηρίζεται η αποδιδόμενη έργο από το σύστημα
- ◆ dE χαρακτηρίζεται η μεταβολή ενέργειας του συστήματος

Το αποδιδόμενο έργο προς το περιβάλλον μπορεί να αναλυθεί σε:

- έργο κάθετων τάσεων που ενεργούν στα όρια του συστήματος (δW_p)
- έργο διαμηθικών τάσεων που ενεργούν στα όρια του συστήματος (δW_t)
- μηχανικό έργο που παραλαμβάνεται από μηχανικό άξονα (δW_μ). Αυτό είναι το έργο που αποδίδεται από το ρευστό μέσω υδραυλικών μηχανών, π.χ. υδροστροβίλων. Στον όρο αυτόν περιλαμβάνεται επίσης, αλλά με αρνητικό πρόσημο, το μηχανικό έργο που ενδεχομένως προσδίδεται στο ρευστό από το περιβάλλον μέσω αντλίας.

Η ενέργεια E του συστήματος μπορεί να εκφραστεί με την ανά μονάδα μάζας τιμή της, ε , όπου:

$$E = \int \varepsilon \cdot dm \quad (3.41)$$

και αποτελείται από τρεις μορφές:

- **Δυναμική ενέργεια**, λόγω θέσης του ρευστού σωματιδίου. Στην περίπτωση κίνησης στο πεδίο βαρύτητας, η ενέργεια στοιχειώδους μάζας dm εξαρτάται από την υψομετρική θέση h και είναι $dm \cdot g \cdot h$, άρα η ανά μονάδα μάζας δυναμική ενέργεια είναι:

$$\varepsilon_\delta = g \cdot h \quad (3.42)$$

- **Κινητική ενέργεια**, λόγω της ταχύτητας του ρευστού σωματιδίου, όπου ανά μονάδα μάζας είναι ίση με:

$$\varepsilon_k = \frac{V^2}{2} \quad (3.43)$$

- **Εσωτερική ενέργεια**, εξαρτώμενη από την τοπική θερμοκρασία του ρευστού.

$$\varepsilon_l = I \quad (3.44)$$

Η εσωτερική ενέργεια εξαρτάται ειδικότερα από την κινητική κατάσταση των μορίων του ρευστού και από τις διαμοριακές δυνάμεις που αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα μία μορφή κινητικής και δυναμικής ενέργειας. Η πρώτη επηρεάζεται κυρίως από τη θερμοκρασία, ενώ η δεύτερη από τη

φάση της ύλης. Όταν δεν υπάρχει αλλαγή φάσης, οι μεταβολές της εσωτερικής ενέργειας οφείλονται μόνο σε μεταβολές θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αρχή διατήρησης της ενέργειας υπό μορφή χρονικών μεταβολών γράφεται:

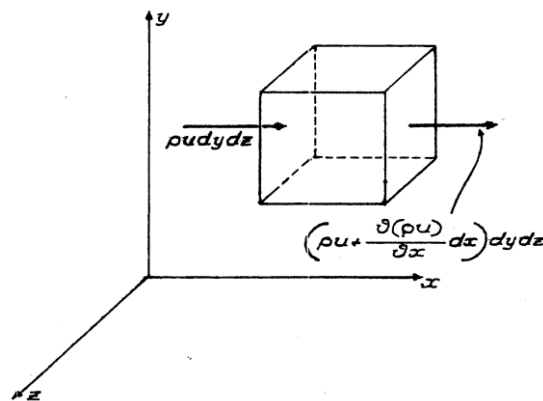
$$\frac{\delta Q}{dt} - \frac{\delta W}{dt} = Dt \int \varepsilon \cdot dm = \frac{D}{Dt} \int \left(g \cdot h + \frac{V^2}{2} + I \right) \cdot dm \quad (3.45)$$

Η εξίσωση ενέργειας (3.45) συσχετίζει τα μεγέθη πυκνότητας, πίεσης, θερμοκρασίας, ταχύτητας, υψομετρικής θέσης, μηχανικού έργου και προστιθέμενης θερμότητας και ισχύει για κάθε ρευστό. Η εξίσωση απλοποιείται στην περίπτωση των υγρών που είναι πρακτικά ασυμπίεστα και έχουν μεγάλη θερμοχωρητικότητα, με συνέπεια η θερμοκρασία και η πυκνότητα να παραμένουν πρακτικά αμετάβλητες, παρά το γεγονός ότι σημαντικά ποσά κινητικής ενέργειας μετατρέπονται σε θερμότητα [5, §4.2.3].

3.2.8 Εξίσωση συνέχειας

Η εξίσωση συνέχειας είναι διαφορική εξίσωση που εκφράζει την αρχή διατήρησης της μάζας του ρευστού. Ας θεωρηθεί ένα διαφορικό σταθερό σώμα αναφοράς μορφής ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου με πλευρές dx, dy, dz , όπως στο σχήμα 3.11.

Εφόσον η μάζα του ρευστού δεν καταστρέφεται, ούτε δημιουργείται, η ενδεχόμενη μεταβολή σε χρόνο Δt της μάζας ($\rho \cdot dU$) που περιέχεται μέσα στο εικονιζόμενο σώμα θα πρέπει να ισούται με τη συνολική εισροή μάζας από την επιφάνεια που περιβάλλει το σώμα αναφοράς κατά το ίδιο χρονικό διάστημα. Λαμβάνοντας υπόψη τον ορισμό της εισροής, δηλαδή:



Σχήμα 3.11: Στοιχειώδης όγκος μορφής ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου για ανάλυση εξίσωσης συνέχειας [5, σχ.4.3].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot dU) = \Sigma \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{E} \quad (3.46)$$

όπου το δεύτερο μέρος είναι το άθροισμα των εισροών από τις έξι έδρες του παραλληλεπιπέδου, και υπολογίζεται ως εξής εαν υπάρχει καθαρή εισροή και στους τρεις άξονες:

$$\Sigma \rho (\vec{V} \cdot d\vec{E}) = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \cdot w) \right] \quad (3.47)$$

Εισάγοντας την έκφραση αυτή στη σχέση (3.46) και παρατηρώντας ότι το dU είναι εξ' υποθέσεως σταθερό και ανεξάρτητο του χρόνου προκύπτει:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = 0 \quad (3.48)$$

Η εξίσωση (3.48) αποτελεί τη γενική εξίσωση συνέχειας που ισχύει για κάθε ρευστό χωρίς κανένα περιορισμό, συνδέοντας τις μεταβολές των ταχυτήτων και της πυκνότητας αυτού.

Η εξίσωση συνέχειας μπορεί να παραχθεί επίσης ακολουθώντας τη μέθοδο του ρευστού σωματιδίου. Πράγματι, αν θεωρηθεί ρευστό σωματίδιο μορφής ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου με όγκο $dU = dx \cdot dy \cdot dz$ που κινείται μέσα στο πεδίο ροής, η αρχή διατήρησης της μάζας απαιτεί:

$$0 = \frac{D}{Dt} \cdot (dm) = \frac{D(\rho \cdot dU)}{Dt} = \rho \cdot \frac{D(dU)}{Dt} + dU \cdot \frac{D\rho}{Dt} \quad (3.49)$$

Η ολική παράγωγος $D(dU)/Dt$ παριστάνει τη μεταβολή του όγκου dU σε χρόνο dt . Η μεταβολή αυτή μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των μεταβολών των γραμμικών διαστάσεων του παραλληλεπιπέδου. Αν $\varepsilon_x = \frac{du}{dx}$ η ανά μονάδα μήκους ταχύτητα γραμμικής παραμόρφωσης της πλευράς dx , το μήκος αυτής μετά από χρόνο dt θα είναι $(1 + \varepsilon_x \cdot dt)dx$. Επομένως, η μεταβολή του όγκου dU είναι:

$$D(dU) = (1 + \varepsilon_x \cdot dt)dx(1 + \varepsilon_y \cdot dt)dy(1 + \varepsilon_z \cdot dt)dz - dx \cdot dy \cdot dz \quad (3.50)$$

Αναπτύσσοντας την παράσταση του δεύτερου μέλους και αμελώντας τους όρους που περιέχουν διαφορικά ανωτέρας τάξεως, προκύπτει:

$$D(dU) = (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \cdot dt \cdot dx \cdot dy \cdot dz = (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \cdot dt \cdot dU \quad (3.51)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση (3.47), προκύπτει:

$$0 = \left[\rho \cdot (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{D\rho}{Dt} \right] \cdot dU \Rightarrow \frac{D\rho}{Dt} + \rho \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.52)$$

Έχοντας υπόψη ότι η ολική παράγωγος $\frac{D\rho}{Dt}$ αναλύεται ως εξής:

$$\frac{D\rho}{Dt} = \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \quad (3.53)$$

Στη συνέχεια, κάνοντας τις πράξεις στη (3.52) προκύπτει η παρακάτω σχέση (3.54), η οποία είναι η γενική εξίσωση της συνέχειας όπως αυτή διατυπώθηκε και από τη σχέση (3.48). Παρατηρείται έτσι ότι η ορθή εφαρμογή των δύο μεθόδων οδηγεί στο ίδιο αποτέλεσμα.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = 0 \quad (3.54)$$

Ακόμη, λαμβάνοντας υπόψη το διανυσματικό συμβολισμό:

$$\operatorname{div} \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.55)$$

και

$$\operatorname{div}(\rho \cdot \vec{V}) = \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} \quad (3.56)$$

μπορεί να γραφτεί η γενική εξίσωση συνεχειάς και με τις εξής μορφές:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \cdot \vec{V}) = 0 \quad (3.57)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \operatorname{div} \vec{V} = 0 \quad (3.58)$$

Ειδικότερα, στα ασυμπίεστα ρευστά ο όγκος μίας καθορισμένης μάζας αυτού παραμένει αμετάβλητος. Παρατηρώντας ότι η μεταβολή όγκου εκφράζεται με την εξίσωση (3.51), συνάγεται ότι για τα ασυμπίεστα ρευστά ισχύει:

$$D(dU) = 0 \quad (3.59) \quad \text{ή} \quad \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (3.60)$$

και επομένως η εξίσωση της συνεχειάς για μόνιμη και μη μόνιμη ροή ασυμπίεστων ρευστών γράφεται:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \operatorname{div} \vec{V} = 0 \quad (3.61)$$

σύμφωνα με τη σχέση (3.58) και αφού $\operatorname{div} \vec{V} = 0$ προκύπτει ότι:

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (3.62)$$

Η σχέση (3.62) εκφράζει το αμετάβλητο της πυκνότητας ενός συγκεκριμένου ρευστού στοιχείου κατά την κίνησή του μέσα στο πεδίο ροής ασυμπίεστου ρευστού. Είναι άμεση συνέπεια της μη

μεταβολής της μάζας και του όγκου του στοιχείου και περιγράφει την κατανομή της πυκνότητας στο χώρο-χρόνο. Παρατηρείται ότι η (3.61) ισχύει τόσο για τη μόνιμη, όσο και για τη μη μόνιμη ροή ασυμπίεστων ρευστών. Προκειμένου ένα πεδίο ταχυτήτων $\vec{V}(u,v,w)$ να είναι δυνατό να παριστά πεδίο ροής ασυμπίεστου ρευστού, θα πρέπει υποχρεωτικά να ικανοποιεί την παραπάνω εξίσωση συνεχείας. Στα συμπίεστα ρευστά ισχύει η γενική εξίσωση (3.57). Αν η ροή είναι μόνιμη, αυτή απλοποιείται, αφού $D\rho/Dt = 0$, οπότε προκύπτει [5, §4.4]:

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (3.63)$$

3.2.9 Εξισώσεις κίνησης

Οι γενικές διαφορικές εξισώσεις κίνησης των ρευστών προκύπτουν ευκολότερα με εφαρμογή του δευτέρου νόμου του Νεύτωνα σε ρευστό σωματίδιο (μέθοδος ρευστού σωματιδίου). Σύμφωνα με το νόμο του Νεύτωνα είναι:

$$d\vec{F} = \vec{a} \cdot dm = \vec{a} \cdot (\rho \cdot dU) \quad (3.64)$$

όπου $d\vec{F}$ η συνισταμένη δύναμη, $dm = \rho \cdot dU$ η μάζα του στοιχείου και \vec{a} η επιτάχυνσή του. Όπως είναι γνωστό από την κινηματική η επιτάχυνση εκφράζεται ως εξής:

$$\vec{a} = \frac{D\vec{V}}{Dt} = \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \cdot \vec{V} \quad (3.65)$$

Πρώτος ο Νεύτωνας συσχέτισε τις διαμητικές τάσεις με την ταχύτητα γωνιακής παραμόρφωσης, ενώ αργότερα ο Stokes γενίκευσε τις παραδοχές για τον συσχετισμό τάσεων-ταχυτήτων παραμορφώσεων. Ο συσχετισμός αυτός στηρίζεται σε τέσσερις βασικές αρχές:

- Το ρευστό είναι ισότροπο υλικό, άρα συμπίπτουν οι κύριοι άξονες τάσεων και παραμορφώσεων.
- Απλή μετάθεση και απλή περιστροφή του στοιχείου δε δημιουργεί τάσεις λόγω συνεκτικότητας. Αντίθετα, κάθε γραμμική ή γωνιακή παραμόρφωση προκαλεί τέτοιες τάσεις, καθεμιά από τις οποίες υποτίθεται ότι εκφράζεται ως γραμμικός συνδυασμός.
- Η μορφή του γραμμικού συσχετισμού τάσεων-ταχυτήτων παραμορφώσεων είναι ανεξάρτητη του προσανατολισμού του συστήματος συντεταγμένων,
- Όταν δεν υπάρχουν παραμορφώσεις, οι τάσεις ανάγονται στην υδροστατική πίεση. [5, §4.5].

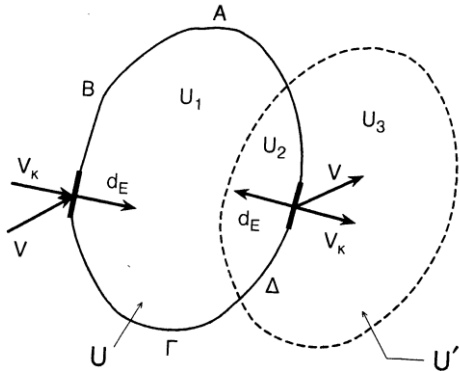
3.3 Μονοδιάστατη ανάλυση

3.3.1 Εισαγωγή

Η μονοδιάστατη ανάλυση αποτελεί μεθοδολογία ανάλυσης-προσδιορισμού-αλληλοσχέτισης ορισμένων γενικών χαρακτηριστικών της ροής που μπορεί να εφαρμοστεί όταν η ροή, σε κάποιες τουλάχιστον περιοχές του πεδίου είναι μονοδιάστατη. Η μέθοδος έχει μεγάλη πρακτική εφαρμογή σε

πλήθος προβλημάτων όπου δεν ενδιαφέρουν όλες οι λεπτομέρειες του πεδίου ροής, για τον προσδιορισμό των οποίων θα χρειαζόταν η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Η μονοδιάστατη ανάλυση βασίζεται στην έννοια του σταθερού πεπερασμένου όγκου αναφοράς και η αξιοποίησή της συνδέεται με κατάλληλη επιλογή του όγκου αυτού, όπως φαίνεται στη συνέχεια.

◇ Θεώρημα Μεταφοράς Reynolds



Σχήμα 3.12: Πεπερασμένος όγκος αναφοράς για τη εφαρμογή θεωρήματος Reynolds [5, σχ.5.1].

Ας θεωρηθεί ένας πεπερασμένος όγκος αναφοράς U (ΑΒΓΔΑ) σταθερός στο χώρο και ευρισκόμενος μέσα σε ένα πεδίο ροής (Σχήμα 3.12). Το ρευστό το οποίο κατά τη χρονική στιγμή t καταλαμβάνει τον όγκο U , μετά από χρονικό διάστημα Δt θα βρίσκεται, λόγω της κίνησής του, σε νέα θέση U' , που σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 3.12. Ονομάζεται U_2 το κοινό εύρος των U και U' και U_1 και U_3 είναι τα μη κοινά τους μέρη αντίστοιχα. Το ρευστό που αρχικά καταλαμβάνει τον όγκο U , έχει διάφορες ιδιότητες, οι οποίες μεταβάλλονται κατά την κίνησή του.

Έστω A η ολική ποσότητα κάποιας ιδιότητας και α η ανά μονάδα μάζας τιμή της ιδιότητας αυτής του ρευστού, δηλαδή:

$$A = \int \alpha \cdot dm = \int \rho \cdot \alpha \cdot dU \quad (3.66)$$

Όπου ρ η πυκνότητα και η ολοκλήρωση νοείται στα όρια που περικλείουν το συγκεκριμένο ρευστό κάθε στιγμή. Η μεταβολή της ποσότητας A λόγω της κίνησης του ρευστού (ολική μεταβολή) είναι:

$$\frac{DA}{Dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{U'(t+\Delta t)} \rho \cdot \alpha \cdot dU - \int_{U(t)} \rho \cdot \alpha \cdot dU}{\Delta t} \quad (3.67)$$

Δεδομένου ότι $U' = U_2 + U_3$ και $U = U_1 + U_2$, η προηγούμενη σχέση διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{DA}{Dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} & \frac{\int_{U_2(t+\Delta t)} \rho \cdot \alpha \cdot dU - \int_{U_2(t)} \rho \cdot \alpha \cdot dU}{\Delta t} \\ & + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{U_3(t+\Delta t)} \rho \cdot \alpha \cdot dU - \int_{U_1(t)} \rho \cdot \alpha \cdot dU}{\Delta t} \end{aligned} \quad (3.68)$$

Επειδή όμως στο όριο $\Delta t \rightarrow 0$ είναι $U_2(t + \Delta t) = U_2(t) = U$, ο πρώτος όρος της εξίσωσης (3.68) γράφεται:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{U_2(t+\Delta t)} \rho \cdot \alpha \cdot dU - \int_{U_2(t)} \rho \cdot \alpha \cdot dU}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_U \rho \cdot \alpha \cdot dU \quad (3.69)$$

Για τον όρο $\int_{U_1(t)} \rho \cdot \alpha \cdot dU$ παρατηρείται με βάση στο σχήμα 3.12 ότι ο όγκος U_1 μπορεί να θεωρηθεί αποτελούμενος από στοιχειώδη πρισματικά τμήματα dU , όπου το καθένα από αυτά έχει εμβαδό βάσης dE και ύψος ds , που αντιστοιχεί στο διάστημα που διανύθηκε από το ρευστό που βρισκόταν αρχικά στην επιφάνεια dE , κάθετα προς αυτήν, ώστε να φθάσει μετά από χρόνο Δt στη νέα θέση του στην επιφάνεια του όγκου U' . Αν \vec{dE} είναι διάνυσμα κάθετο προς την επιφάνεια εμβαδού dE και V_κ η συνιστώσα της ταχύτητας η κάθετη προς τη στοιχειώδη επιφάνεια dE , ο όγκος του στοιχειώδους πρίσματος είναι $dU = dE \cdot V_\kappa \cdot \Delta t$, οπότε:

$$\int_{U_1} \rho \cdot \alpha \cdot dU = \int_{E_1} \rho \cdot \alpha \cdot dE \cdot V_\kappa \cdot \Delta t = \int_{E_1} \rho \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot \vec{V} \cdot \vec{dE} \quad (3.70)$$

όπου η ολοκλήρωση γίνεται στην επιφάνεια $E_1 = (AB\Gamma)$. Με όμοιο τρόπο αναλύεται ο όρος $\int_{U_3} \rho \cdot \alpha \cdot dU$, με την παρατήρηση ότι εδώ η φορά της ταχύτητας είναι αντίρροπη προς το \vec{dE} , διότι εξέρχεται, επομένως:

$$\int_{U_3} \rho \cdot \alpha \cdot dU = \int_{E_3} \rho \cdot \alpha \cdot dE \cdot V_\kappa \cdot \Delta t = \int_{E_3} \rho \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot \vec{V} \cdot \vec{dE} \quad (3.71)$$

όπου η ολοκλήρωση γίνεται στην επιφάνεια $E_3=(\Gamma\Delta A)$. Με αντικατάσταση, ο δεύτερος όρος της εξίσωσης (3.68) γίνεται:

$$\begin{aligned} & \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{U_3} \rho \cdot \alpha \cdot dU - \int_{U_1} \rho \cdot \alpha \cdot dU}{\Delta t} \\ &= - \int_{E_3} (\rho \cdot \alpha) \cdot (\vec{V} \cdot \vec{dE}) - \int_{E_1} (\rho \cdot \alpha) \cdot (\vec{V} \cdot \vec{dE}) \\ &= - \int_E (\rho \cdot \alpha) \cdot (\vec{V} \cdot \vec{dE}) \end{aligned} \quad (3.72)$$

δεδομένου ότι $E = E_1 + E_3$ η ολική επιφάνεια που περιβάλλει τον θεωρηθέντα όγκο U . Επομένως τελικά η εξίσωση (3.68) γράφεται:

$$\frac{DA}{Dt} = \frac{D}{Dt} \int_U \rho \cdot \alpha \cdot dU = \frac{\partial}{\partial t} \int_U \rho \cdot \alpha \cdot dU - \int_E (\rho \cdot \alpha) \cdot (\vec{V} \cdot \vec{dE}) \quad (3.73)$$

Στη συνήθη περίπτωση που το ρευστό καταλαμβάνει μετά από χρόνο Δt (όχι τα ίδια αρχικά σωματίδια) ολόκληρο τον όγκο U , τότε τα όρια ολοκλήρωσης του όγκου δεν μεταβάλλονται με το χρόνο, άρα:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_U \rho \cdot \alpha \cdot dU = \int_U \frac{\partial(\rho \cdot \alpha)}{\partial t} \cdot dU \quad (3.74)$$

και κατά συνέπεια:

$$\frac{DA}{Dt} = \frac{D}{Dt} \int_U \rho \cdot \alpha \cdot dU = \int_U \frac{\partial(\rho \cdot \alpha)}{\partial t} \cdot dU - \int_E \rho \cdot \alpha \cdot (\vec{V} \cdot \vec{dE}) \quad (3.75)$$

Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης (3.73) ή (3.75) εκφράζει την εισροή της ιδιότητας α διαμέσου της επιφάνειας που περιβάλλει τον όγκο αναφοράς. Η παραπάνω σχέση (3.71) είναι γνωστή ως **θεώρημα μεταφοράς του Reynolds**, και διατυπώνεται ως εξής: Η ολική μεταβολή μίας ιδιότητας ρευστού που καταλαμβάνει στιγμή t τον όγκο U ισούται με την ανά μονάδα χρόνου μεταβολής της ιδιότητας μέσα στον όγκο U μείον την καθαρή εισροή της ιδιότητας E που περιβάλλει τον όγκο αναφοράς U .

Με βάση το θεώρημα αυτό παράγονται παρακάτω οι μονοδιάστατες εξισώσεις συνέχειας ποσότητας κίνησης και ενέργειας που αποτελούν ειδικότερες εκφράσεις των τριών θεμελιωδών νόμων της ρευστομηχανικής [5, §5.1-§5.2].

3.3.2 Μονοδιάστατη εξίσωση συνέχειας

Για $\alpha = 1$, η «ιδιότητα» A είναι απλά η μάζα του ρευστού:

$$A = \int dm = \int \rho \cdot dU \quad (3.76)$$

Εφαρμόζοντας το γενικό θεώρημα (3.73) για $\alpha = 1$ προκύπτει:

$$\frac{DA}{Dt} = \frac{D}{Dt} \int dm = \frac{\partial}{\partial t} \int_U \rho \cdot dU - \int_E \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{dE} \quad (3.77)$$

Όμως, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας είναι:

$$\frac{D}{Dt} \int dm = 0 \quad (3.78)$$

άρα η παραπάνω σχέση γράφεται:

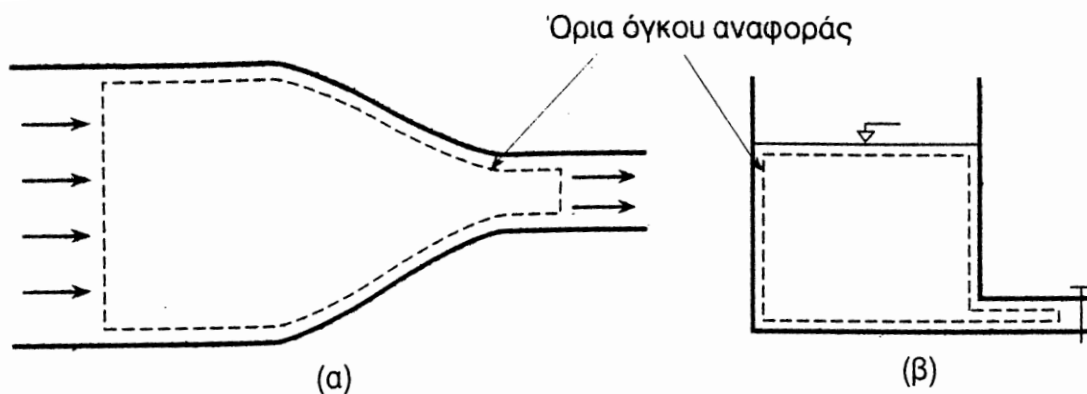
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_U \rho \cdot dU = \int_E \rho \cdot \vec{V} \cdot \overrightarrow{dE} \quad (3.79)$$

Η εξίσωση (3.79) είναι η γενική μονοδιάστατη εξίσωση συνεχείας, σύμφωνα με την οποία η ανά μονάδα χρόνου μεταβολή μάζας μέσα στον όγκο αναφοράς U ισούται με την ολική καθαρή εισροή μάζας από την επιφάνεια E που περιβάλλει τον όγκο αυτόν.

Εναλλακτική μορφή της εξίσωσης συνέχειας προκύπτει θέτοντας $a = 1$ στην εξίσωση (3.75):

$$\int_U \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot dU = \int_E \rho \cdot \vec{V} \cdot \overrightarrow{dE} \quad (3.80)$$

Η μορφή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν καταλαμβάνεται συνεχώς από ρευστό όλος ο όγκος U , π.χ. στην περίπτωση της ροής σε σωλήνα (Σχήμα 3.13α). Αντίθετα, αν με την πάροδο του χρόνου ο εκλεγείς όγκος αναφοράς δεν είναι πάντοτε γεμάτος με ρευστό, όπως π.χ. κατά τη διάρκεια της εκκένωσης του δοχείου (Σχήμα 3.13β) θα πρέπει να χρησιμοποιείται η γενική μορφή (3.79).



Σχήμα 3.13: Όρια όγκου αναφοράς (α) σε σωλήνα (β) σε δεξαμενή [5,σχ.5.2].

Προκειμένου για μόνιμη ροή, εξ ορισμού δεν υπάρχουν μεταβολές, ως προς το χρόνο και επομένως οι αντίστοιχες παράγωγοι των εξισώσεων (3.79) και (3.80) μηδενίζονται, οπότε η μονοδιάστατη εξίσωση συνεχείας καταλήγει:

$$\int_E \rho \cdot \vec{V} \cdot \overrightarrow{dE} = 0 \quad (3.81)$$

Δηλαδή, σε μόνιμη ροή η συνολική καθαρή εισροή μάζας σε οποιονδήποτε σταθερό όγκο αναφοράς είναι μηδέν. Διαφορετικά, όση μάζα εισρέει από μέρος της επιφάνειας του όγκου αναφοράς, θα πρέπει να εκρέει από άλλο μέρος της επιφάνειας αυτού. Τέλος, σε ασυμπίεστα ομογενή ρευστά (υγρά), όπου $\rho = \text{σταθ.}$ η εξίσωση συνεχείας γράφεται:

$$\int_E \vec{V} \cdot \vec{dE} = 0 \quad (3.82)$$

✚ Εξίσωση συνεχείας σε μόνιμη ροή και επιλεγμένους όγκους μεταφοράς

{α} Ροϊκό νήμα

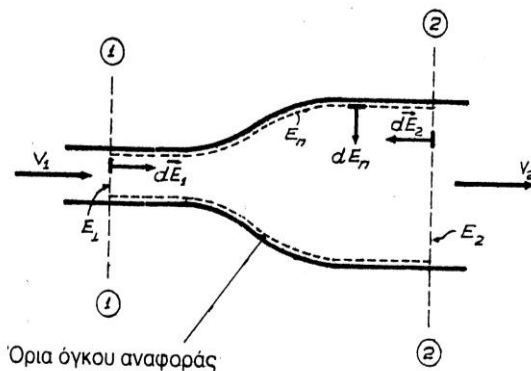


Σχήμα 3.14: Όγκος αναφοράς στο ροϊκό νήμα [5,σχ.5.3].

Εάν ως όγκος αναφοράς επιλεγεί το ροϊκό νήμα (Σχήμα 3.14) με επιφάνειες διατομών dE_1 και dE_2 καθέτων προς τη διεύθυνση της ροής, παρατηρείται ότι η ποσότητα $\vec{V} \cdot \vec{dE}$ μηδενίζεται σε όλη την παράπλευρη επιφάνεια του νήματος, αφού τα ανύσματα της επιφάνειας και της ταχύτητας είναι κάθετα μεταξύ τους. Εξάλλου στις δύο διατομές, τα ανύσματα της επιφάνειας και της ταχύτητας είναι συγγραμμικά και μάλιστα ομόρροπα στη διατομή dE_1 , και αντίρροπα στη διατομή dE_2 . Μετά από τις παραπάνω παρατηρήσεις η εξίσωση συνεχείας για μόνιμη ροή εξίσωση γράφεται:

$$\begin{aligned} 0 &= \int_E \rho \cdot (\vec{V} \cdot \vec{dE}) = \rho_1 \cdot V_1 \cdot dE_1 - \rho_2 \cdot V_2 \cdot dE_2 \\ &\Rightarrow \rho_1 \cdot V_1 \cdot dE_1 = \rho_2 \cdot V_2 \cdot dE_2 \Rightarrow m_1 \cdot V_1 = m_2 \cdot V_2 \end{aligned} \quad (3.83)$$

✚ {β} Όγκος αναφοράς που συμπίπτει με στερεά όρια



Σχήμα 3.15: Όγκος αναφοράς που συμπίπτει με στερεά όρια [5,σχ.5.4].

Αν θεωρηθεί ο αγωγός του σχήματος 3.15 και ο όγκος αναφοράς που σημειώνεται στο σχήμα με διακεκομμένη γραμμή. Η επιφάνεια του όγκου αναφοράς συμπίπτει γενικά με τα στερεά όρια (E_{II}) εκτός από τις δύο διατομές E_1 και E_2 που έχουν επιλεγεί σε περιοχές ομοιόμορφης ροής σε γνωστή διεύθυνση, έτσι ώστε να είναι κάθετες προς τη διεύθυνση της ροής. Πάνω στην επιφάνεια (E_{II}) η ποσότητα είναι μηδέν, αφού είτε η ταχύτητα είναι μηδενική στα στερεά όρια (πραγματικά ρευστά), είτε είναι παράλληλη προς το όριο (ιδεατά ρευστά) και άρα κάθετη προς το άνωσμα \overline{dE} . Επομένως η εξίσωση (3.81) γράφεται [5, §5.3].

$$0 = \int_E \rho \cdot \vec{V} \cdot \overline{dE} = \int_{E_1} \rho \cdot V_1 \cdot dE_1 - \int_{E_2} \rho \cdot V_2 \cdot dE_2 \quad (3.84)$$

$$\text{ή} \quad \int_{E_1} \rho \cdot V_1 \cdot dE_1 = \int_{E_2} \rho \cdot V_2 \cdot dE_2 \quad (3.85)$$

$$\text{ή} \quad \int_E \rho \cdot V \cdot dE = \int_E \rho \cdot dQ = \text{σταθ.} \quad (3.86)$$

3.3.3 Μονοδιάστατη εξίσωση ποσότητα κίνησης

Θέτοντας $\alpha = \vec{V}$ στη γενική εξίσωση (3.75) προκύπτει η έκφραση της ολικής μεταβολής της ποσότητας κίνησης του ρευστού σε πεπερασμένο όγκο αναφοράς:

$$\frac{DA}{Dt} = \frac{D}{Dt} \int \vec{V} \cdot dm = \frac{\partial}{\partial t} \int_U \rho \cdot \vec{V} \cdot dU - \int_E \rho \cdot \vec{V} \cdot (\vec{V} \cdot \overline{dE}) \quad (3.87)$$

Όμως σύμφωνα με το θεώρημα της ποσότητας κίνησης είναι:

$$\sum \vec{F} = \frac{D}{Dt} \int \vec{V} \cdot dm \quad (3.88)$$

Επομένως η μονοδιάστατη ποσότητα κίνησης γράφεται:

$$\sum \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \int_U \rho \cdot \vec{V} \cdot dU - \int_E \rho \cdot \vec{V} \cdot (\vec{V} \cdot \overline{dE}) \quad (3.89)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (3.89) το σύνολο των εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται στο ρευστό που καταλαμβάνει κατά τη χρονική στιγμή t τον όγκο αναφοράς ισούται με την ανά μονάδα χρόνου μεταβολή της ποσότητας κίνησης εντός του όγκου αναφοράς μείον την καθαρή εισροή ποσότητας κίνησης από την επιφάνεια που περικλείει τον όγκο αυτόν.

Η σχέση αυτή είναι διανυσματική, ισχύει δε για ιδεατά και για πραγματικά ρευστά, είτε ασυμπιεστά, είτε συμπιεστά. Οι ασκούμενες δυνάμεις είναι συνήθως τριών ειδών:

- Δυνάμεις λόγω ορθών τάσεων (πιέσεων) επί της επιφάνειας E, \vec{F}_p
- Δυνάμεις λόγω διατμητικών τάσεων επί της επιφάνειας E, \vec{F}_τ
- Καθολικές δυνάμεις ασκούμενες στο σύνολο της μάζας, π.χ. λόγω της βαρύτητας \vec{F}_g

Άρα, στο πεδίο βαρύτητας:

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_g + \vec{F}_p + \vec{F}_\tau \quad (3.90)$$

Όταν πρόκειται για μόνιμη ροή, η εξίσωση ποσότητας κίνησης λαμβάνει την απλούστερη μορφή:

$$\sum \vec{F} = - \int_E \rho \cdot \vec{V} \cdot (\vec{V} \cdot \vec{dE}) \quad (3.91)$$

δηλαδή στην περίπτωση αυτή η συνολική δύναμη που ασκείται στο ρευστό ισούται με την καθαρή εκροή ποσότητας κίνησης από την επιφάνεια του όγκου αναφοράς [5, §5.4].

3.3.4 Μονοδιάστατη εξίσωση ενέργειας

Η γενική εξίσωση ενέργειας σε πεπερασμένο όγκο αναφοράς προκύπτει αν τεθεί $\alpha = \varepsilon$ στο γενικό θεώρημα (3.73) σε συνδυασμό με τον νόμο (3.45):

$$\frac{\delta Q}{dt} - \frac{\delta W}{dt} = \frac{D}{Dt} \int_U \varepsilon \cdot dm = \frac{\partial}{\partial t} \int_U \rho \cdot \varepsilon \cdot dU - \int_E \rho \cdot \varepsilon \cdot \vec{V} \cdot \vec{dE} \quad (3.92)$$

Όπως έχει προαναφερθεί ισχύει:

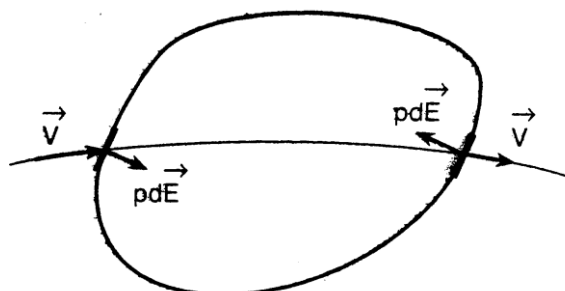
$$\delta W = \delta W_p + \delta W_\tau + \delta W_{μηχ} \quad (3.93)$$

και όταν πρόκειται για το βαρυτικό πεδίο της γης:

$$\varepsilon = g \cdot h + \frac{V^2}{2} + I \quad (3.94)$$

Στον αυθαίρετο όγκο αναφοράς του σχήματος 3.16, το έργο των καθέτων τάσεων (πιέσεων) που ενεργούν σε κάθε στοιχείο της επιφάνειας σε χρονικό διάστημα dt ισούται εξ' ορισμού με το εσωτερικό γινόμενο της δύναμης $[p \cdot \vec{dE}]$ επί τη μετακίνηση $p \cdot [\vec{V} \cdot \vec{dE}] \cdot dt$. Δηλαδή το έργο αυτό προσφέρεται στον όγκο αναφοράς αν $\vec{V} \cdot \vec{dE} > 0$. Αν ισχύει το αντίθετο, είναι το αποδιδόμενο έργο στο περιβάλλον. Επομένως σε χρόνο dt , ισχύει ότι:

$$\frac{\delta W}{dt} = \int_E p \cdot (\vec{V} \cdot d\vec{E}) \quad (3.95)$$



Σχήμα 3.16: Όγκος αναφοράς διατύπωσης της μονοδιάστατης εξίσωσης ενέργειας [5, σχ.5.8].

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (3.93), (3.94), (3.95) η σχέση γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_U \rho \cdot \left(g \cdot h + \frac{V^2}{2} + I \right) \cdot dU - \int_E \rho \cdot \left(g \cdot h + \frac{V^2}{2} + I + \frac{p}{\rho} \right) \cdot (\vec{V} \cdot d\vec{E}) = \frac{\delta Q}{dt} - \frac{\delta W_\tau}{dt} - \frac{\delta W_{μηχ}}{dt} \quad (3.96)$$

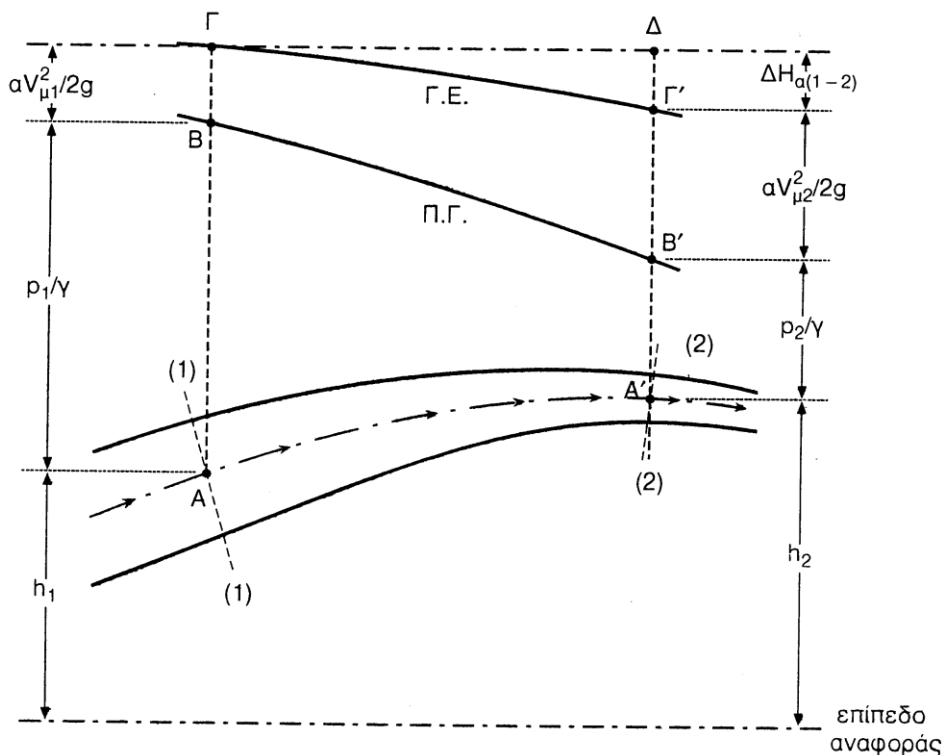
Η σχέση (3.96) αποτελεί τη γενική μορφή της εξίσωσης ενέργειας σε πεπερασμένο όγκο αναφοράς [5, §5.5].

3.3.5 Γραμμή ενέργειας και πιεζομετρική γραμμή

Δεδομένου ότι όλοι οι όροι της εξίσωσης ενέργειας έχουν εκφραστεί υπό μορφή ενεργειακών υψών και έχουν διαστάσεις μήκους (ενέργεια ανά μονάδα βάρους ρέοντος ρευστού), είναι εύκολο να παρασταθούν γραφικά με τρόπο, ώστε να δίνουν μία εποπτική παράσταση βασικών χαρακτηριστικών της ροής κατά μήκος μονοδιάστατων αγωγών, όπως είναι οι σωλήνες, διώρυγες κλπ.

Ας θεωρηθεί ο αγωγός του σχήματος 3.17 και ας υποθεθεί ότι οι διατομές 1-1 και 2-2 βρίσκονται σε περιοχές ομοιόμορφης ροής και ότι μεταξύ τους δεν παρεμβάλλεται μηχανικός άξονας. Οι κατακόρυφες αποστάσεις h_1 και h_2 από αυθαίρετο οριζόντιο επίπεδο αναφοράς μέχρι τον άξονα Α ή Α' της κάθε διατομής χαρακτηρίζουν την υψομετρική θέση του αγωγού και συγχρόνως παριστάνουν το ύψος δυναμικής ενέργειας της αντίστοιχης διατομής. Αν στο υψόμετρο προστεθεί το αντίστοιχο ύψος πίεσης, p_1/γ ή p_2/γ ορίζονται τα σημεία Β και Β' των οποίων η κατακόρυφη απόσταση από το επίπεδο αναφοράς ισούται με το πιεζομετρικό ύψος της αντίστοιχης διατομής, $(h_1 + \frac{p_1}{\gamma})$ ή $(h_2 + \frac{p_2}{\gamma})$. Η γραμμή ΒΒ' λέγεται **πιεζομετρική γραμμή** (συμβολικά Π.Γ.) και δείχνει σε κάθε θέση το πιεζομετρικό ύψος $(h + \frac{p}{\gamma})$ της ροής στον αγωγό. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το άθροισμα $(h + \frac{p}{\gamma})$ σε ορισμένη διατομή είναι σταθερό, όπως αποδείχτηκε προηγουμένως, αν η διατομή βρίσκεται σε

περιοχή ομοιόμορφης (παράλληλης) ροής. Κατά συνέπεια δεν έχει σημασία αν θα επιλεγεί το υψόμετρο και η αντίστοιχη πίεση στον άξονα ή σε άλλο σημείο της διατομής.



Σχήμα 3.17: Αγωγός και αντίστοιχες γραμμές ενέργειας και πιεζομετρικές [5, σχ.5.12].

Αν στο πιεζομετρικό ύψος προστεθεί το ύψος κινητικής ενέργειας $\alpha \cdot V_{\mu}^2/2 \cdot g$ σε κάθε διατομή ορίζονται τα σημεία Γ και Γ' που απέχουν από το επίπεδο αναφοράς όσο το συνολικό ύψος μηχανικής ενέργειας της διατομής, $H_i = h_i + \frac{p_i}{\gamma} + \frac{\alpha V_{\mu}^2}{2 \cdot g}$ ($i = 1, 2$).

Επομένως, η γραμμή $\Gamma\Gamma'$ καλείται γραμμή ενέργειας (συμβολικά Γ.Ε.). Είναι φανερό ότι η απόσταση ($\Gamma'\Delta$) της γραμμής ενέργειας από την οριζόντια $\Gamma\Delta$ παριστάνει την απώλεια ενέργειας μεταξύ των δύο διατομών 1-1 και 2-2. Δεδομένου ότι στη ροή πραγματικών ρευστών συμβαίνει πάντοτε απώλεια ενέργειας, συνάγεται ότι **εν γένει το υψόμετρο της γραμμής ενέργειας μειώνεται κατά τη διεύθυνση ροής**. Αν αμεληθούν οι απώλειες ενέργειας, τότε η Γ.Ε. είναι οριζόντια. Ουδέποτε όμως μπορεί το υψόμετρο της Γ.Ε. να αυξάνεται προς τα κατάντη της ροής παρά μόνον αν προστίθεται ενδιάμεσα ενέργεια στο σύστημα με μηχανικό άξονα (αντλία).

Η μεταβολή του ενεργειακού ύψους κατά μήκος του αγωγού, δηλαδή η κλίση της γραμμής ενέργειας, είναι ίση με:

$$J_E = -\frac{dH}{ds} \quad (3.97)$$

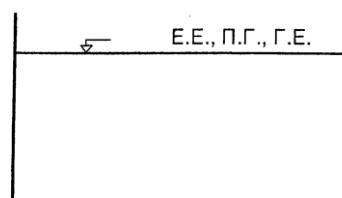
όπου s η κατεύθυνση της ροής. Η μεταβολή J_E παριστάνει το ύψος απωλειών ανά μονάδα μήκους του αγωγού (γραμμικές απώλειες). Σε θέσεις αλλαγών διατομής, εισόδους ή εξόδους από δεξαμενές υπάρχουν πρόσθετες απώλειες ενέργειας που χαρακτηρίζονται ως τοπικές απώλειες. Επισημαίνεται ότι το αρνητικό πρόσημο στη σχέση 3.97 εισάγεται συμβατικά, ώστε η μείωση της ενέργειας κατά τη διεύθυνση της ροής να εκφράζεται με θετική κλίση της γραμμής ενέργειας ($J_E > 0$).

Η (κατακόρυφη) απόσταση μεταξύ της Γ.Ε. και της Π.Γ. παριστάνει το ύψος κινητικής ενέργειας στην αντίστοιχη διατομή. Είναι φανερό ότι οι ενδεχόμενες μεταβολές του εμβαδού της διατομής κατά μήκος του αγωγού συνεπάγονται λόγω της εξίσωσης συνεχείας-μεταβολές της μέσης ταχύτητας και άρα και του ύψους της κινητικής ενέργειας. Έτσι, στο σχήμα 3.17 είναι $E_1 > E_2$ και άρα $V_1 < V_2$, επομένως η Π.Γ. απέχει περισσότερο από τη Γ.Ε. στη θέση 2-2 σε σύγκριση με τη θέση 1-1. Είναι ευνόητο ότι το απόλυτο υψόμετρο της Π.Γ. είναι δυνατό να αυξάνεται ή να μειώνεται κατά τη διεύθυνση της ροής ανάλογα με τις μεταβολές της διατομής του αγωγού. Σε περίπτωση σταθερής διατομής η Γ.Ε. και η Π.Γ. είναι ευθείες παράλληλες, που απέχουν μεταξύ τους $\alpha \cdot V_m^2 / 2 \cdot g$. Αν και είναι αδύνατο να υπερβεί η Π.Γ. τη Γ.Ε. σε δεδομένη θέση, είναι εντούτοις ενδεχόμενο να ευρεθεί χαμηλότερα από τον άξονα του θεωρούμενου αγωγού. Αυτό δείχνει ότι:

$$h + \frac{p}{\gamma} < h, \quad \text{δηλαδή } p < 0$$

Δεδομένου ότι συμβατικά οι πιέσεις μετρούνται έχοντας ως πίεση αναφοράς την ατμοσφαιρική πίεση ($p_{\text{atm}} = 0$), η παραπάνω ανισότητα σημαίνει απλά ότι η πίεση στη συγκεκριμένη διατομή είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική. Θεωρητικά η ελάχιστη σχετική πίεση μπορεί να φθάσει μέχρι -1 Atm, η οποία διαιρούμενη με το ειδικό βάρος γ του υγρού δίνει και το μέγιστο δυνατό υποβιβασμό της Π.Γ. κάτω από τον άξονα του αγωγού. Τέτοια προβλήματα εμφάνισης υποπίεσεων μπορούν να παρουσιαστούν σε υψηλά σημεία της χάραξης των αγωγών και θα πρέπει κατά κανόνα να αποφεύγονται λόγω συσσώρευσης αέρα που διακόπτουν τη συνέχεια της ροής.

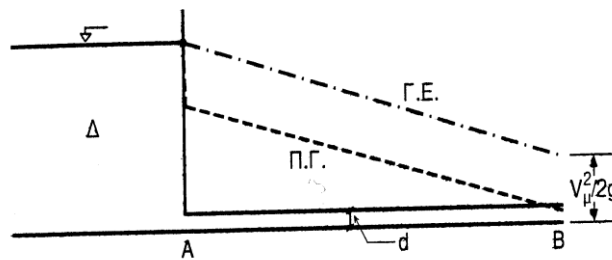
Οι έννοιες της Γ.Ε. και της Π.Γ. δεν περιορίζονται βέβαια στους αγωγούς υπό πίεση, αλλά εφαρμόζονται κατά ανάλογο τρόπο και σε μονοδιάστατους αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια. Στην ειδική περίπτωση στάσιμου υγρού, όπως π.χ. στη δεξαμενή του σχήματος 3.18, δεδομένου ότι $V = 0$ και η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια είναι μηδενική (ατμοσφαιρική), η Γ.Ε. ταυτίζεται με την Π.Γ. και την ελεύθερη επιφάνεια (Ε.Ε.) του υγρού.



Σχήμα 3.18: Ταύτιση γραμμής ενέργειας, πιεζομετρικής γραμμής και ελεύθερης επιφάνειας σε μονοδιάστατο αγωγό με ελεύθερη επιφάνεια για $V=0$ [5, σχ.5.13].

Στο σχήμα 3.19 δίνεται ένα παράδειγμα χάραξης της Π.Γ. και της Γ.Ε. σε αγωγό σταθερής διατομής που αρχίζει από μεγάλη δεξαμενή Δ και καταλήγει στην ατμόσφαιρα. Επειδή η ταχύτητα παραμένει

σταθερή κατά μήκος του αγωγού οι δύο γραμμές είναι παράλληλες και απέχουν κατά $V_{\mu}^2/2 \cdot g$ (υποθέτοντας $\alpha \approx 1$). Η Π.Γ. πρέπει να καταλήγει στον άξονα του αγωγού στη διατομή εξόδου (σημείο B), δεδομένου ότι η πίεση εκεί είναι ίση με την ατμοσφαιρική (συμβατικά $p = 0$), ενώ η Γ.Ε. πρέπει να ξεκινά από τη στάθμη της δεξαμενής (σημείο A), αφού εκεί βρίσκεται η ενεργειακή στάθμη μέσα στη δεξαμενή. Στην αρχή της Π.Γ. παρατηρείται πρακτικά μια ασυνέχεια καθώς αμέσως πριν τη διατομή A θα πρέπει να ταυτίζεται με την E-E. και άρα με τη Γ.Ε. ενώ αμέσως μετά το A θα πρέπει να απέχει από τη Γ.Ε. και $V_{\mu}^2/2 \cdot g$. Στην πραγματικότητα η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη γίνεται σε πολύ μικρό μήκος όπου επιταχύνεται το υγρό που εκρέει από τη δεξαμενή μέχρις ότου αποκτήσει την ταχύτητα του σωλήνα. Το μήκος αυτό είναι πρακτικά αμελητέο σε συνήθη προβλήματα με σημαντικά μήκη αγωγών [5, §5.6].



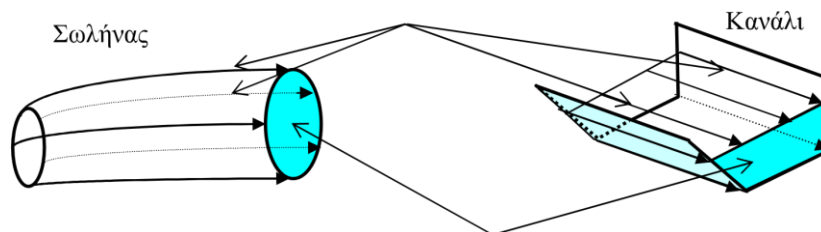
Σχήμα 3.19: Πιεζομετρική γραμμή και γραμμή ενέργειας σε αγωγό σταθερής διατομής που ξεκινά από μεγάλη δεξαμενή και καταλήγει στην ατμόσφαιρα [5, σχ.5.14].

3.4 Ροή σε κλειστούς αγωγούς

3.4.1 Εισαγωγή

3.4.1.1 Σωληνοειδής (μονοδιάστατη) ροή

Σωληνοειδής ορίζεται η ροή ενός ρευστού εντός αγωγών των οποίων η μορφή έχει σχήμα σωλήνα. Η σωληνοειδής ροή έχει ακριβώς την ίδια σημασία με τη μονοδιάστατη ροή, δηλαδή αυτή που αναλύεται σε μία μόνο διάσταση.

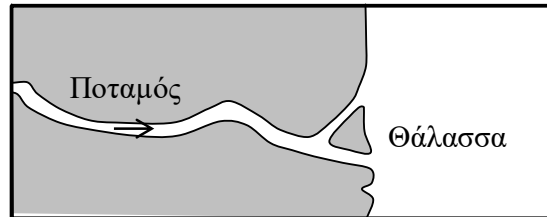


Σχήμα 3.20: Σωληνοειδής ροή σε αγωγό υπό πίεση (σωλήνα) και αγωγό με ελεύθερη επιφάνεια. [6, σχ. 1.1].

Σωληνοειδής ροή είναι η ροή μέσα στα εξωτερικά υδραγωγεία, στα δίκτυα ύδρευσης και στα ποτιστικά κανάλια. Τα όρια του ροϊκού σωλήνα είναι τα τοιχώματά του και ο ίδιος διαχωρίζεται σε

βρεχόμενη περίμετρο και ελεύθερη επιφάνεια.

Πολλές φορές, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με τον ποταμό, μπορεί να θεωρηθεί μονοδιάστατη ροή και να αναλυθεί με βάση τις σχέσεις αυτής, παρόλο που δε διατηρείται η ίδια διατομή σε όλο το μήκος του ποταμού.



Σχήμα 3.21: Μονοδιάστατη ροή ποταμού, με ελεύθερη επιφάνεια και μεταβαλλόμενη διατομή [6, σχ. 1.3].

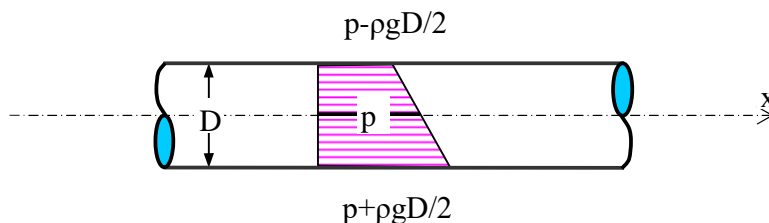
Η σωληνοειδής ροή χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, που είναι οι κλειστοί αγωγοί ή αλλιώς αγωγοί υπό πίεση και οι ανοιχτοί αγωγοί ή αλλιώς αγωγοί που διαθέτουν ελεύθερη επιφάνεια [6, §1.1].

3.4.1.2 Ροή σε κλειστούς (υπό πίεση) αγωγούς

Ροή σε κλειστούς αγωγούς ορίζεται η ροή στην οποία το ρευστό καλύπτει ολη τη διατομή του αγωγού και έχει πίεση διαφορετική από αυτή της ατμόσφαιρας. Χρήσιμοι όροι που εξυπηρετούν την καλύτερη ανάλυση και μελέτη της ροής σε κλειστούς αγωγούς είναι οι εξής:

- Ομοιόμορφος αγωγός: Είναι εκείνος που διατηρεί σταθερή τη διατομή του και την κλίση του.
- Σωλήνας: Είναι ο αγωγός με κυκλική διατομή
- Στη πράξη: Χρησιμοποιούνται σωλήνες ή αγωγοί τετραγωνικής διατομής.
- Πίεση: Είναι συνήθως η υδροστατική πίεση στον άξονα του αγωγού.

Συνήθως η πίεση έχει υδροστατική κατανομή, δηλαδή διαφέρει από την πίεση του άξονα του αγωγού κατά $\pm \rho \cdot g \cdot D/2$ στην ανώτερη και κατώτερη επιφάνεια του σωλήνα όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.22 . [6, §1.2].

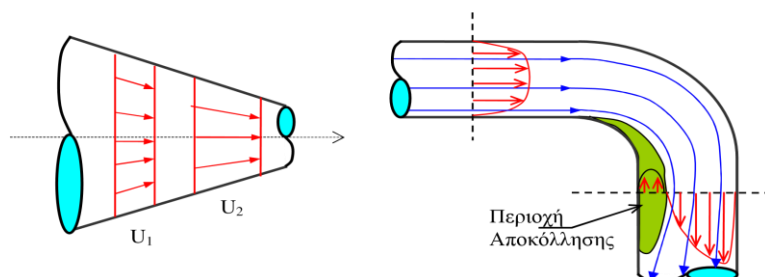


Σχήμα 3.22: Κατανομή υδροστατικής πίεσης σε κλειστό αγωγό [6, σχ.1.4].

3.4.2 Χαρακτηρισμός ροής

Η ροή μπορεί να χαρακτηριστεί ως μόνιμη και μη μόνιμη. Αυτό σημαίνει είτε ότι διατηρείται σταθερή παροχή εντός ενός κλειστού αγωγού, είτε ότι η παροχή αλλάζει ανάλογα με το χρόνο αντίστοιχα. Η μη μόνιμη ροή είναι και αυτή που προκαλεί υδραυλικά πλήγματα και δεν είναι καλό να συμβαίνει.

Η μόνιμη ροή μπορεί με τη σειρά της να χαρακτηριστεί ως ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή. Στην ομοιόμορφη ροή, οι γραμμές ροής είναι παράλληλες μεταξύ τους και έτσι διατηρείται σταθερή ταχύτητα καθ'όλο το μήκος του αγωγού, ενώ ανομοιόμορφη ροή υπάρχει κυρίως σε γωνίες, εισόδους και εξόδους αγωγών ή σε σημεία όπου τοποθετούνται μετρητικά όργανα, όπου η ταχύτητα αλλάζει τοπικά (επιταχύνεται ή επιβραδύνεται), λόγω αλλαγής της διατομής στα σημεία αυτά.



Σχήμα 3.23: Τοπικά παραδείγματα ανομοιόμορφης μόνιμης ροής σε κωνικό αγωγό (αριστερά) και σε γωνία (δεξιά) [6, σχ.1.5].

Ο αριθμός **Reynolds** που συμβολίζεται με (**Re**) είναι ένας αριθμός που μπορεί να περιγράψει το είδος της ροής. Έτσι όταν ο αριθμός Reynolds που ορίζεται ως:

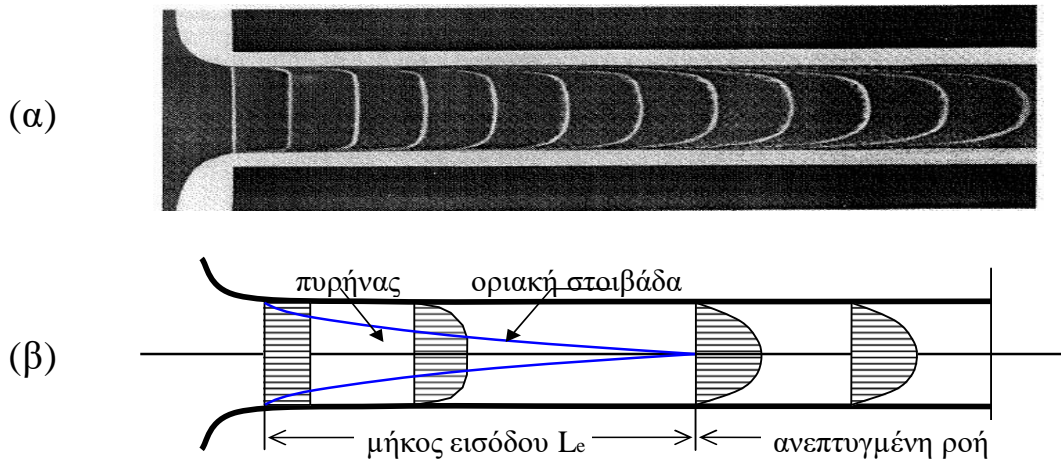
$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (3.98)$$

όπου V η μέση ταχύτητα ροής σε διατομή D και $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ το κινηματικό ιξώδες του ρευστού, είναι μικρότερος από μία κρίσιμη τιμή, τότε η ροή μπορεί να χαρακτηριστεί ως στρωτή, ενώ, όταν είναι μεγαλύτερος, τότε η ροή ονομάζεται τυρβώδης. Τις περισσότερες φορές, τα προβλήματα που καλείται να επιλύσει ένα μηχανικός αφορούν σε αγωγούς με τυρβώδη ροή [6, §1.3].

3.4.3 Ανάπτυξη τυρβώδους οριακού στρώματος

Ανάπτυξη οριακού στρώματος παρατηρείται κατά την είσοδο ενός ρευστού σε σωλήνα. Το σχήμα 3.24 βοηθάει ιδιαίτερα στην κατανόηση αυτής της έννοιας. Στο σχήμα 3.24 (α) φαίνεται η κατανομή της ταχύτητας ροής μέσω οπτικοποίησης φυσαλίδων υδρογόνου. Παρατηρείται πως η ροή αλλάζει ανάλογα με την απόσταση από το αρχικό στρογγυλεμένο τμήμα εισόδου του ρευστού εντός του σωλήνα. Συγκεκριμένα η ροή έχει αρχικά σχήμα ορθογώνιο, ενώ μετά αποκτά σχήμα παραβολής το οποίο αρχίζει και παραμένει σταθερό και ίδιο μετά από συγκεκριμένο μήκος αγωγού L_e . Το μήκος αυτό ονομάζεται μήκος εισόδου και μέσα σε αυτό παρατηρείται η δημιουργία ενός οριακού στρώματος με χαρακτηριστικό την αύξηση της ταχύτητας επίσης ανάλογα με την απόσταση από την είσοδο του ρευστού. Για $x > L_e$ η μόνιμη ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη και η κατανομή της αξονικής ταχύτητας δεν παρουσιάζει καμία μεταβολή. Ο τρόπος υπολογισμού του μήκους εισόδου εξαρτάται από τον αριθμό Re και δίνεται από τη σχέση [6, §1.4]:

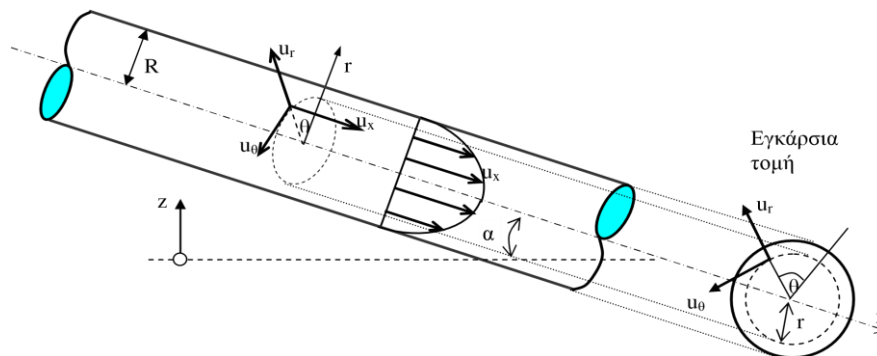
$$L_e = (0.06Re) \cdot D \quad (3.99)$$



Σχήμα 3.24: Οπτικοποίηση και σχηματική απεικόνιση ανάπτυξης τυρβώδους ροής κατά τη είσοδο ρευστού σε σωλήνα [6, σχ. 1.6].

3.4.4 Μόνιμη ομοιόμορφη ροή σε σωλήνες

Από τα όσα ισχύουν για τη ροή στο σωλήνα του σχήματος 3.25 μπορεί να εξαχθούν εξισώσεις που διέπουν την μόνιμη ομοιόμορφη ροή σε σωλήνες.



Σχήμα 3.25: Πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδης ροή σε σωλήνα. [6, σχ. 1.7].

Συγκεκριμένα ισχύει ότι στον ανωτέρω κεκλιμένο σωλήνα, η ροή είναι μόνιμη, δηλαδή έχει σταθερή παροχή επομένως από την εξίσωση της συνέχειας ισχύει:

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0 \Rightarrow u_r = 0 \text{ (επειδή } \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0) \quad (3.100)$$

Επίσης ισχύει πως η ροή είναι ομοιόμορφη με $\frac{\partial}{\partial x} = 0$ και πλήρως ανεπτυγμένη, με κυλινδρική συμμετρία κατά μήκος του άξονα, ενώ ταυτόχρονα είναι και τυρβώδης. Οι εξισώσεις Reynolds είναι εξισώσεις συνέχειας και ορμής της ροής και γράφονται ως εξής σε επίπεδο αξονικής και ακτινικής διεύθυνσης:

- Ορμή σε αξονική διεύθυνση:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(u_x \cdot u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(u_x \cdot u_r)}{\partial r} \\
 &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - g \cdot \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left\{ \frac{\partial^2 u_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_x}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \right\} - \frac{\overline{\partial(u'_x \cdot u'_r)}}{\partial r} \\
 & \quad - \frac{\overline{\partial(u'_x \cdot u'_x)}}{\partial x} \\
 &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{\rho \cdot r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \mu \cdot \left(r \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \rho \cdot r \overline{(u' \cdot u'_r)} \right\} \\
 & \quad + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} - \frac{\overline{\partial(u'_x \cdot u'_x)}}{\partial x} \\
 & \Rightarrow 0 = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - g_x + \frac{1}{\rho \cdot r} \frac{\partial}{\partial r} \cdot (r \cdot \tau)
 \end{aligned} \tag{3.101}$$

Οι ταχύτητες που φέρουν τόνο αποτελούν την ταχύτητα στο συγκεκριμένο σημείο στο οποίο αναφέρονται κάθε φορά μείον τη μέση ταχύτητα στο σημείο αυτό.

- Ορμή σε ακτινική διεύθυνση:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(u_r \cdot u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_r \cdot u_x)}{\partial x} \\
 &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} - g \cdot \frac{\partial z}{\partial r} + \frac{\mu}{\rho} \left\{ \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \right\} \\
 & \quad - \frac{\overline{\partial(u'_r \cdot u'_r)}}{\partial r} - \frac{\overline{\partial(u'_r \cdot u'_x)}}{\partial x} \\
 & \Rightarrow 0 = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - g_r - \frac{\overline{\partial(u'_r \cdot u'_r)}}{\partial r}
 \end{aligned} \tag{3.102}$$

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.25, οι εξισώσεις της ορμής στις διευθύνσεις r και θ , περιλαμβάνουν μόνο την πίεση, με αποτέλεσμα οι μερικές παράγωγοι ως προς τις διευθύνσεις που προαναφέρθηκαν μηδενίζονται και προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{p}{\rho \cdot g} + z \right) = -\frac{1}{\rho \cdot g \cdot r} \cdot \frac{d}{dr} (\tau \cdot r) \tag{3.103}$$

Η εξίσωση της ενέργειας για δύο διαφορετικά κοντινά σημεία ενός αγωγού σε διαφορική μορφή υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{p}{\rho \cdot g} + z \right) \quad (3.104)$$

Από την παραπάνω σχέση μπορεί εύκολα να οριστεί και η κλίση της γραμμής ενέργειας της ροής ως εξής:

$$J_E = -\frac{dH}{dx} = -\frac{d}{dx} \left(\frac{p}{\rho \cdot g} + z \right) \quad (3.105)$$

Έπειτα από ολοκλήρωση στη σχέση 3.103, προκύπτει μία σταθερά C , η οποία όμως μηδενίζεται λόγω μη ύπαρξης διατμητικών τάσεων. Έτσι συγκεκριμένα για τα τοιχώματα ενός αγωγού όπου η ακτίνα $r=D/2$ ισχύει:

$$\tau_0 = -\rho \cdot g \cdot \frac{R}{2} \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{p}{\rho \cdot g} + z \right) = -\rho \cdot g \cdot \frac{D}{4} \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{p}{\rho \cdot g} + z \right) \quad (3.106)$$

Επαναπροσδιορίζοντας τώρα την κλίση της γραμμής ενέργειας προκύπτει:

$$J_E = \frac{4}{\rho \cdot g \cdot D} \cdot \tau_0 \quad (3.107)$$

Ακόμη από τη μηχανική ρευστών ισχύει πως η αντίσταση λόγω τριβών στην επιφάνεια σώματων ορίζεται ως:

$$\tau_0 = C_f \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} \quad (3.108)$$

Έτσι συνδυάζοντας τις σχέσεις 3.107 και 3.108 προκύπτει ότι:

$$J_E = \frac{4 \cdot C_f}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \xrightarrow{f=4 \cdot C_f} J_E = \frac{f}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (3.109)$$

Η τελευταία ονομάζεται σχέση Darcy και Weisbach και αποτελεί τρόπο προσδιορισμού και υπολογισμού των απωλειών ενέργειας και του συντελεστή τριβών f ανά μονάδα μήκους του αγωγού έχοντας σαν δεδομένα την παροχή και τη διάμετρο του αγωγού αυτού [6, §1.5].

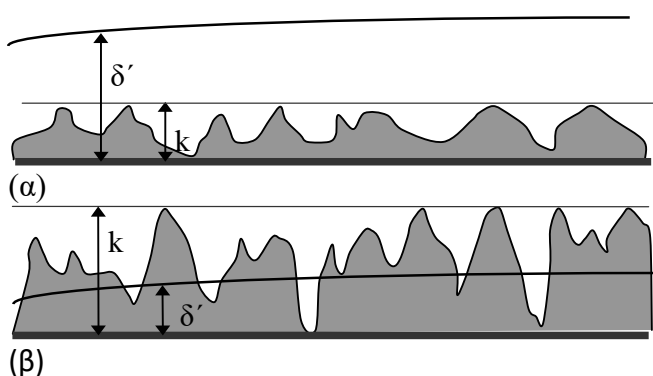
3.4.5 Συντελεστής τριβών σε τυρβώδη ροή

Βασικός στόχος για τη μελέτη των απωλειών σε σωλήνες είναι ο προσδιορισμός του συντελεστή απωλειών f . Σε περίπτωση στρωτής ροής αυτός δίνεται εύκολα από τη σχέση:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.110)$$

Στην περίπτωση όμως της τυρβώδους ροής ο συντελεστής τριβής εξαρτάται από την τραχύτητα του οριου και από τον αριθμό Reynolds.

- Κατανομή μέσης ταχύτητας σε τραχείς σωλήνες



Σχήμα 3.26: Απεικόνιση (α) λείων και (β) τραχεών τοιχωμάτων σε σωλήνες [6, σχ. 2.3].

Για τον χαρακτηρισμό ενός σωλήνα ως τραχύ δύο είναι τα μεγέθη που εξυπηρετούν. Το ένα μέγεθος είναι το πάχος του οριακού στρωτού στρώματος και συμβολίζεται με δ' . Το δεύτερο είναι το χαρακτηριστικό ύψος τραχύτητας που συμβολίζεται με k . Έτσι, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.26 (α) όταν το χαρακτηριστικό ύψος τραχύτητας ενός τοιχώματος είναι μικρότερο από το πάχος οριακού στρώματος στρωτής ροής τότε ο αγωγός χαρακτηρίζεται ως λείος. Αντίθετα, (σχήμα 3.26 (β)), όταν το k ξεπερνά το οριακό στρώμα στρωτής ροής, δηλαδή τα τοιχώματα παρουσιάζουν αρκετές προεξοχές-εξογκώματα, τότε ο αγωγός χαρακτηρίζεται ως τραχύς.

Έπειτα από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώθηκε πως υπάρχουν τρεις περιοχές τυρβώδους ροής σε αγωγούς με τραχείς επιφάνειες και είναι οι εξής:

- Υδραυλικώς λεία περιοχή, μέσα στην οποία ο συντελεστής τριβών εξαρτάται μόνο από τον αριθμό Reynolds και δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{Re \cdot \sqrt{f}}{2,51} \right) \quad (3.111)$$

- Περιοχή μεταβατικού σταδίου, μέσα στην οποία ο συντελεστής τριβών εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds αλλά και από τη σχετική τραχύτητα και ουσιαστικά αναφέρεται σε αγωγούς που μόνο κατά τόπους οι ανωμαλίες της επιφάνειας ξεπερνούν το οριακό στρώμα στρωτής ροής και δίνεται από τη σχέση 3.112 η οποία αποτελεί την πιο ικανοποιητική προσέγγιση των Colebrook-White.

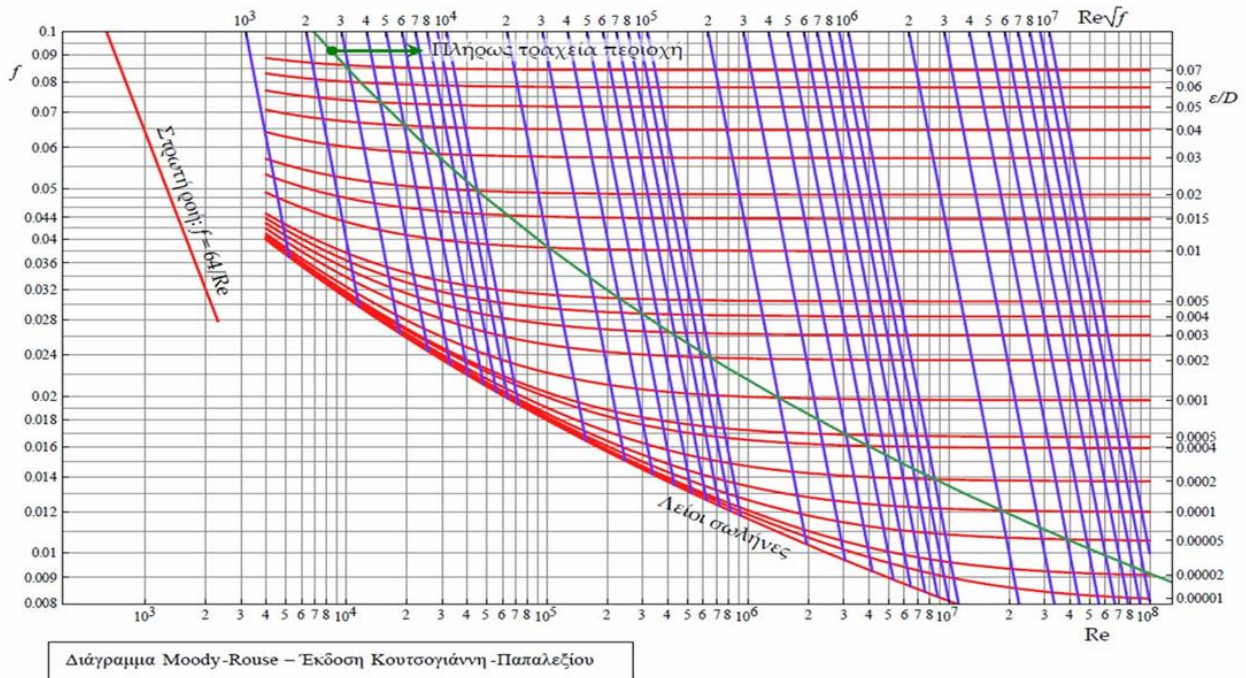
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,14 - 2 \log \left[\frac{k_s}{D} + \frac{9,35}{Re \cdot \sqrt{f}} \right] \quad (3.112)$$

Όπου, k_s η ισοδύναμη τραχύτητα κατά Nikuradse.

- Περιοχή πλήρους τραχύτητας, μέσα στην οποία όλες οι ανωμαλίες της επιφάνειας των τοιχωμάτων ξεπερνούν το όριο στρωτής ροής. Είναι η μοναδική περιοχή στην οποία ο συντελεστής τριβής δεν εξαρτάται καθόλου από τον αριθμό Reynolds, παρά μόνο από τη σχετική τραχύτητα και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{k_s}{D} \right] + 1,14 \quad (3.113)$$

Οι παραπάνω σχέσεις προέκυψαν έπειτα από αρκετή ανάλυση και αρκετές πράξεις. Πιο εύκολος είναι ο γραφικός προσδιορισμός του συντελεστή απωλειών f συναρτήσει του αριθμού Reynolds και της σχετικής τραχύτητας k_s/D , μέσω του διαγράμματος Moody (Σχήμα 3.27), [6, §2.2-2.3-2.4].



Σχήμα 3.27: Προσδιορισμός συντελεστή απωλειών μέσω διαγράμματος Moody [6].

- **Κατανομή μέσης ταχύτητας σε λείους σωλήνες**

Έπειτα από τον ορισμό του λείου σωλήνα που πραγματοποιήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, χρήσιμο είναι να αναφερθούν κάποια παραδείγματα σωλήνων που χαρακτηρίζονται ως λείοι. Τέτοιοι είναι οι σωλήνες χαλκού, οι σωλήνες που είναι κατασκευασμένοι από πλαστικό PVC ή πολυαιθυλένιο HDPE, καθώς επίσης και εξολοκλήρου γυάλινοι σωλήνες ή έστω με εσωτερική γυάλινη επένδυση. Για τους σωλήνες αυτούς έπειτα από διαστατική ανάλυση και μία πληθώρα πράξεων, προκύπτει ότι ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται από τη (σχέση 3.111) [6, §2.1-2.3].

3.4.6 Επίλυση τυπικών προβλημάτων σε αγωγούς υπό πίεση

Όπως προδίδει και ο τίτλος της ενότητας, εδώ αναφέρονται κάποια τυπικά προβλήματα σε αγωγούς υπό πίεση, των οποίων οι απώλειες στους αγωγούς είναι και οι μοναδικές απώλειες που υπάρχουν. Οι κατηγορίες των προβλημάτων που υφίστανται είναι κυρίως δύο και αυτές διαχωρίζονται κυρίως με βάση τα ζητούμενα αλλά και τα δεδομένα που λαμβάνονται κάθε φορά.

- *1^ο χαρακτηριστικό πρόβλημα:*

Αρχικά, το πρώτο χαρακτηριστικό-τυπικό πρόβλημα σε αγωγούς υπό πίεση είναι αυτό που έχει ως *ζητούμενο* τον υπολογισμό των *γραμμικών απωλειών* h_f , ενώ είναι γνωστά η παροχή του ρευστού

Q , το ιξώδες μ ή το κινηματικό ιξώδες ν , το μήκος του αγωγού L , η διάμετρος του αγωγού D καθώς επίσης και η τραχύτητα του αγωγού k_s . Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιούνται κατά σειρά οι παρακάτω σχέσεις:

1) Προσδιορισμός ταχύτητας ροής $V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$ (3.114)

2) Προσδιορισμός αριθμού $Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$ (3.115)

3) Προσδιορισμός του λόγου $\frac{k_s}{D}$ (3.116)

4) Προσδιορισμός του συντελεστή απωλειών τριβής f Γραφικά μέσω του διαγράμματος Moody (Σχήμα 3.27)

5) Προσδιορισμός των γραμμικών απωλειών ενέργειας $h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = J_E \cdot L$ (3.117)

➤ 2^ο χαρακτηριστικό πρόβλημα:

Το δεύτερο χαρακτηριστικό-τυπικό πρόβλημα σε αγωγούς υπό πίεση είναι αυτό που έχει ως **ζητούμενο** τον υπολογισμό της **παροχής του ρευστού** Q , ενώ είναι γνωστά, οι γραμμικές απώλειες h_f , το ιξώδες μ ή το κινηματικό ιξώδες ν , το μήκος του αγωγού L , η διάμετρος του αγωγού D καθώς επίσης και η τραχύτητα του αγωγού k_s . Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιούνται κατά σειρά οι παρακάτω σχέσεις: [6, §3.4].

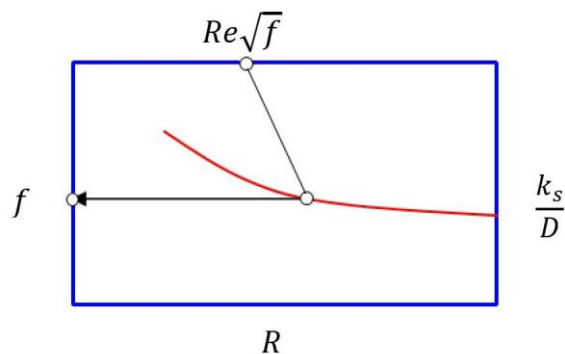
1) Επίλυση ως προς V της σχέσης Darcy και Weisbach (σχέση 3.109) $V = \left[2 \cdot g \cdot h_f \cdot \frac{D}{L} \right]^{1/2} \cdot \frac{1}{\sqrt{f}}$ (3.118)

2) Αντικατάσταση της σχέσης 3.118 και προσδιορισμός του αριθμού $Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = \left[\frac{2 \cdot g \cdot h_f}{L} \right]^{1/2} \cdot \frac{D^{3/2}}{\nu \cdot \sqrt{f}}$ (3.119)

3) Προσδιορισμός του όρου $Re \sqrt{f} = \left[\frac{2 \cdot g \cdot h_f}{L} \right]^{1/2} \cdot \frac{D^{3/2}}{\nu}$ (3.120)

4) Προσδιορισμός του λόγου $\frac{k_s}{D}$ (3.121)

5) Προσδιορισμός του συντελεστή απωλειών τριβής f γραφικά μέσω του διαγράμματος Moody (Σχήμα 3.28) (ή μέσω αριθμητικής ανάλυσης ως προς τη σχέση Colebrook-White



Σχήμα 3.28: Προσδιορισμός συντελεστή απωλειών μέσω διαγράμματος Moody [6].

6) Προσδιορισμός της παροχής Q

$$Q = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot V \quad (3.122)$$

3.4.7 Μόνιμη ανομοιόμορφη ροή

Με τον όρο ανομοιόμορφη ροή χαρακτηρίζεται η ροή που είναι μεν μόνιμη, ωστόσο της οποίας το διάνυσμα της ταχύτητας κατά μήκος της ροής αλλάζει είτε ως προς το μέγεθος είτε ως προς την κατεύθυνση, είτε ως προς και τα δύο. Ανομοιόμορφη ροή συνήθως προκαλείται από μεταβολές στα στερεά όρια της ροής, είτε λόγω αλλαγών της διατομής με συστολή ή διαστολή, είτε λόγω παρεμβολής οργάνων μέτρησης ή συσκευών ελέγχου, είτε λόγω παρεμβολής εξαρτημάτων αλλαγής της διεύθυνσης (γωνίες, καμπύλες), είτε λόγω παρεμβολής εξαρτημάτων διακλάδωσης (ταφ) και δικλίδων ασφαλείας (βάνες). Αυτές οι γεωμετρικές μεταβολές έχουν ως αποτέλεσμα την πρόκληση τύρβης και τη δημιουργία απωλειών λόγω αυτής, αφού κάποιο μέρος της κινητικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα. Οι απώλειες αυτές σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να συγχέονται με τις απώλειες που εμφανίζονται εξαιτίας της τριβής στα τοιχώματα των αγωγών, διότι αυτές αποτελούν μία άλλη κατηγορία απωλειών και ορίζονται ως απώλειες σχήματος. Επειδή οι απώλειες σχήματος εμφανίζονται σε μικρό μήκος, καλούνται επίσης και τοπικές απώλειες. Συνήθως εκφράζονται υπό τη μορφή:

$$h_a = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (3.123)$$

Όπου K είναι ο συντελεστής που εξαρτάται από τη γεωμετρία του εξαρτήματος και τον αριθμό Reynolds, ενώ η ταχύτητα V είναι η ταχύτητα σε χαρακτηριστική διατομή, π.χ. στη διαστολή στην είσοδο του εξαρτήματος, στη συστολή στην έξοδο του εξαρτήματος, σε στροφή σωλήνα σταθερής διατομής και παντού είναι η ίδια.

Εξαιτίας της πληθώρας των σχέσεων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να υπολογιστούν οι εκάστοτε τοπικές απώλειες, εισάγεται η έννοια του ισοδύναμου μήκους που αντιστοιχεί σε ένα μήκος αγωγού όπου οι γραμμικές του απώλειες ισούνται με τις τοπικές απώλειες που προκαλεί το εξάρτημα που βρίσκεται υπό μελέτη. Το ισοδύναμο μήκος συμβολίζεται με L_e και δίνεται από τη σχέση:

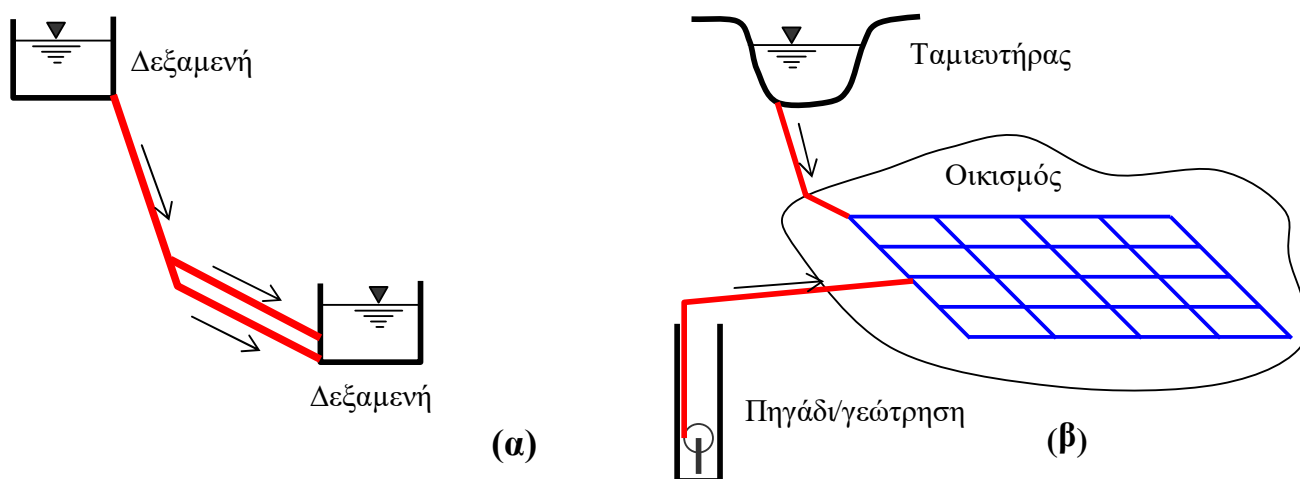
$$L_e = \frac{K \cdot D}{f} \quad (3.124)$$

Με αυτόν τον τρόπο οι τοπικές απώλειες μετατρέπονται σε γραμμικές και εάν βρίσκονται σε ποσοστό μικρότερο από του 5% των γραμμικών απωλειών, τότε μπορούν και να μη λαμβάνονται υπόψιν [6, §6.1-6.5].

3.4.8 Σύστημα σωλήνων

Δύο είναι οι κατηγορίες στις οποίες ανήκουν τα συστήματα σωληνώσεων, αυτές είναι η απλή και η σύνθετη κατηγορία με τα συστήματα σωλήνων να χαρακτηρίζονται ως απλά και σύνθετα αντίστοιχα. Η διαφορά τους είναι πως στο απλό σύστημα σωλήνων υπάρχει μόνο ένα μέρος υδροληψίας και μόνο ένα μέρος υδροδότησης, ενώ σε ένα σύνθετο σύστημα σωλήνων υπάρχουν περισσότερα από ένα τέτοια μέρη. Αυτό γίνεται κατανοητό και από το σχήμα 3.29, όπου στην περίπτωση (α) το σημείο υδροδότησης είναι ένα και μοναδικό και είναι μία δεξαμενή και το σημείο υδροληψίας είναι επίσης

ένα και μοναδικό και πρόκειται για μία δεύτερη δεξαμενή. Αντίθετα στο (β) υφίστανται δύο σημεία υδροληψίας συγκεκριμένα ένας ταμιευτήρας και μία γεώτρηση και αρκετά σημεία υδροδότησης μέσα σε έναν ολόκληρο οικισμό.



Σχήμα 3.29: Αποτύπωση ενδεικτικών (α) απλών και (β) σύνθετων συστημάτων σωλήνων [6, σχ. 7.1].

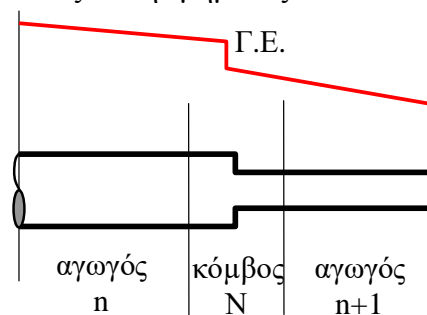
Κάθε είδους συστήματος σωλήνων αποτελείται από μέρη που διαθέτουν σταθερή διάμετρο και παροχή τα οποία καλούνται αγωγοί και από μέρη στα οποία αλλάζει η γεωμετρία τους και η παροχή τους, τα οποία ονομάζονται κόμβοι.

Σε προσπάθεια να γίνει καταγραφή σχέσεων που διέπουν τα συστήματα σωλήνων, λαμβάνονται υπόψη οι γραμμικές απώλειες των αγωγών και οι τοπικές απώλειες των κόμβων. Αρχικά η εξίσωση ενέργειας μεταξύ δύο σημείων των σωλήνων δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$H_1 = H_2 + \Delta H_m + \Delta H_{(1-2)} \quad (3.125)$$

όπου H_1, H_2 τα ύψη της ενέργειας του ανώτερου και του κατώτερου σημείου αντίστοιχα, ΔH_m η μηχανική ενέργεια που προσδίδεται στο σύστημα και $\Delta H_{(1-2)}$ είναι ουσιαστικά ο όρος που περιλαμβάνει όλες τις τοπικές και γραμμικές απώλειες του υπό εξέταση τμήματος.

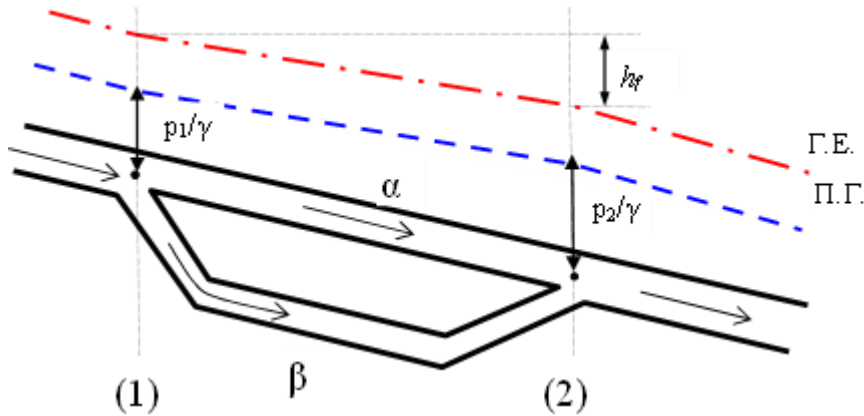
Οι αγωγοί μπορεί να συνδέονται μεταξύ τους είτε σε σειρά (Σχήμα 3.30), είτε παράλληλα (Σχήμα 3.31). Το μέγεθος που διατηρείται σταθερό στην σύνδεση σε σειρά είναι η παροχή Q , ενώ το σύνολο των απωλειών είναι το άθροισμα των επιμέρους τοπικών και γραμμικών απωλειών. Συγκεκριμένα και παίρνοντας σαν δεδομένα κάποια στοιχεία από το σχήμα 3.30, οι σχέσεις που ισχύουν στη σύνδεση αγωγών σε σειρά είναι οι ακόλουθες:



Σχήμα 3.30: Σύνδεση αγωγών σε σειρά [6, σχ.7.2].

$$Q_n = Q_{n+1} \quad (3.126)$$

$$H_L = h_f(n) + h_m(N) + h_\alpha(N) + h_f(n+1) \quad (3.127)$$



Σχήμα 3.31: Σύνδεση αγωγών (α) και (β) παράλληλα [6, σχ.7.3].

Αντίθετα, στην παράλληλη σύνδεση αγωγών το μέγεθος που παραμένει ίδιο είναι το σύνολο των ολικών απωλειών ανά αγωγό, ενώ η ολική παροχή Q , είναι το άθροισμα των επιμέρους παροχών των αγωγών. Οι μαθηματικές σχέσεις που εκφράζουν τα ανωτέρω λόγια, με τη βοήθεια του σχήματος 3.31 είναι οι ακόλουθες [6, κεφ.7].

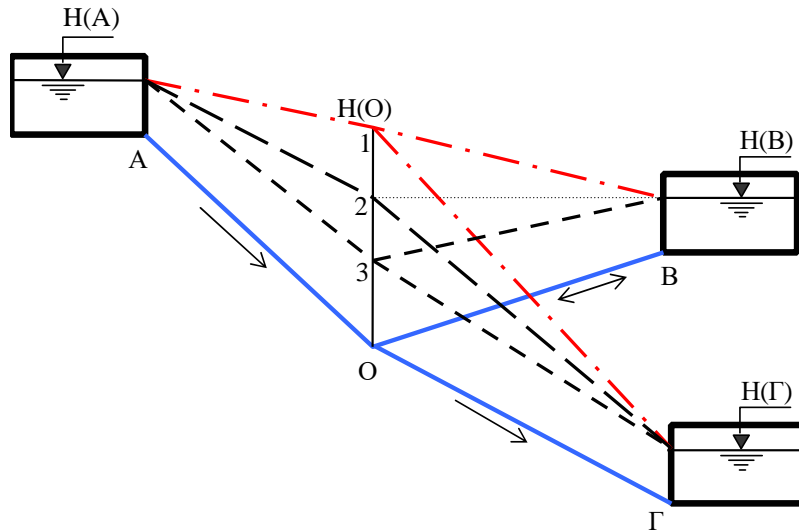
$$Q_1 = Q_2 = Q_\alpha + Q_\beta \quad (3.128)$$

$$h_{f\alpha} + h_{m(1-\alpha-2)} = h_{f\beta} + h_{m(1-\beta-2)} \quad (3.129)$$

3.4.9 Δεξαμενές

Με τον όρο δεξαμενή ορίζεται ένα οριοθετημένο σημείο συγκέντρωσης ύδατος που έχει ως κυρίαρχο σκοπό τη διαθεσιμότητά του στους καταναλωτές όταν αυτό ζητηθεί. Ωστόσο υπάρχουν δεξαμενές που εξυπηρετούν και άλλους σκοπούς εκτός της ύδρευσης και αυτές μπορεί να είναι αποθήκευσης, πυρόσβεσης, άρδευσης, αναρρόθμισης κ.α.

Στην πραγματικότητα η σύνδεση μεταξύ δύο δεξαμενών αποτελεί μία απλή υπόθεση. Η πολυπλοκότητα και η δυσκολία στους υπολογισμούς της παροχής που δέχονται ή προσδίδουν οι δεξαμενές βρίσκεται σε περιπτώσεις σύνδεσης τριών και άνω δεξαμενών που συνδέονται μεταξύ τους σε κοινό κόμβο με συγκεκριμένους αγωγούς, γνωστούς ως προς τη διάμετρο και το μήκος τους. Στην περίπτωση σύνδεσης τριών δεξαμενών σε κοινό κόμβο (σχήμα 3.32), η επίλυση του προβλήματος του προσδιορισμού των παροχών επιτυγχάνεται με τη μέθοδο των παραδοχών και των δοκιμών. Γνωρίζοντας ότι με βάση την εξίσωση της συνέχειας, το σύνολο των εισροών και των εκροών ενός κόμβου πρέπει να ισούνται με το μηδέν, δηλαδή για τη συγκεκριμένη περίπτωση του σχήματος 3.32 $Q_{AO} + Q_{OB} + Q_{OG} = 0$, διαχωρίζονται οι παρακάτω τρεις περιπτώσεις:



Σχήμα 3.32: Σύνδεση τριών δεξαμενών σε κοινό κόμβο [6, σχ.8.2].

- Α' περίπτωση: $H(O) > H(B) > H(\Gamma)$ όπου η ροή επιτυγχάνεται από τη δεξαμενή A στις δεξαμενές B και Γ.
- Β' περίπτωση: $H(O) = H(B) > H(\Gamma)$ όπου η ροή επιτυγχάνεται απευθείας από τη δεξαμενή A προς τη δεξαμενή Γ.
- Γ' περίπτωση: $H(B) > H(O) > H(\Gamma)$ όπου η ροή επιτυγχάνεται από τις δεξαμενές A και B προς τη δεξαμενή Γ.

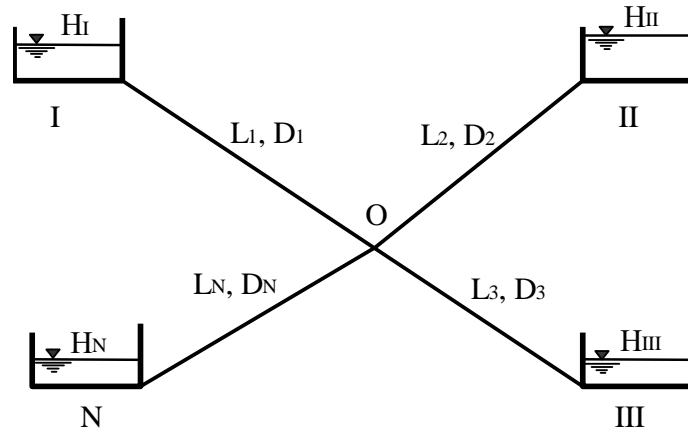
Στη συνέχεια και με απώτερο σκοπό τον υπολογισμό των επιμέρους παροχών λαμβάνεται ως υπόθεση πως $H(O) = H(B)$, ενώ ταυτόχρονα ισχύει και ότι $Q_{OB} = 0$. Κατόπιν εξετάζεται εάν ισχύει $Q_{AO} = Q_{O\Gamma}$. Εάν ισχύει τότε έχει τελειώσει η διαδικασία υπολογισμού. Εάν $Q_{AO} > Q_{O\Gamma}$ τότε το $H(O)$ της αρχικής υπόθεσης, πρέπει να αυξηθεί και η πορεία που ακολουθεί η ροή είναι από τη δεξαμενή A προς τις δεξαμενές B και Γ. Εάν $Q_{AO} < Q_{O\Gamma}$ τότε το $H(O)$ της αρχικής υπόθεσης πρέπει να μειωθεί και η πορεία που ακολουθεί η ροή είναι από τις δεξαμενές A και B προς τη Γ.

Στην περίπτωση σύνδεσης περισσότερων από τρεις δεξαμενές, τότε οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για N παραδείγματος χάρη δεξαμενές (Σχήμα 3.33) είναι πιο γενικευμένες. Πρόκειται για εξισώσεις ενέργειας, οι οποίες στο πλήθος τους είναι κατά έναν αριθμό μικρότερες από το σύνολο των δεξαμενών και για εξισώσεις συνέχειας, οι οποίες στο πλήθος τους ισούνται με το πλήθος των κόμβων. Συγκεκριμένα δίνονται από τις σχέσεις:

$$\Delta H_{(I,II)} = \left(\sum K_{I-O} + L_I \frac{f_I}{D_I} \right) \cdot \frac{V_I^2}{2 \cdot g} + \left(\sum K_{O-II} + L_{II} \frac{f_{II}}{D_{II}} \right) \cdot \frac{V_{I \rightarrow II}^2}{2 \cdot g} \quad (3.130)$$

Και η εξίσωση της συνέχειας για τον κόμβο O είναι η εξής [6, §8.1].

$$\sum_N Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0 \quad (3.131)$$

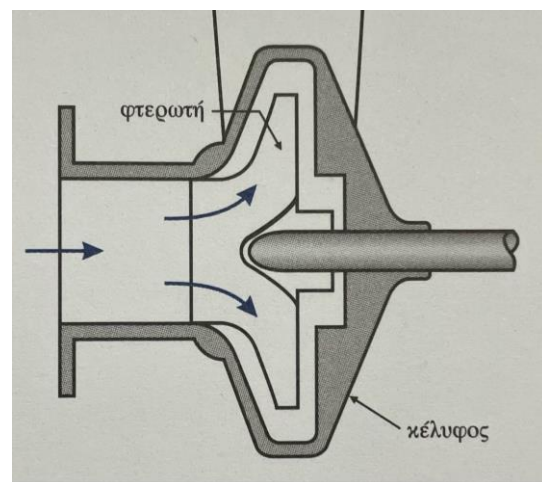


Σχήμα 3.33: Σύνδεση N δεξαμενών [6, σχ.8.3].

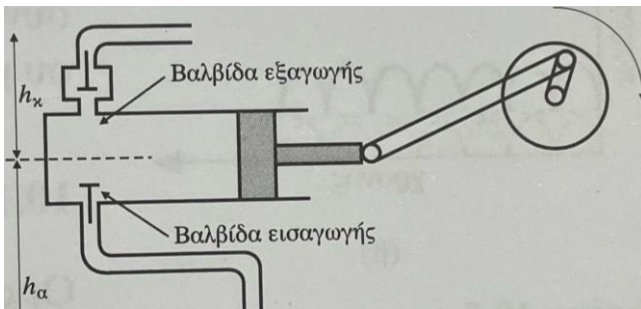
3.4.10 Υδροδυναμικές μηχανές

Οι υδροδυναμικές μηχανές ανάλογα με το αν προσδίδουν ή εάν δεσμεύουν ποσά ενέργειας από το σύστημα και κατ'επέκταση από το ρευστό, χωρίζονται σε αντλίες και στρόβιλοι αντίστοιχα. Κύρια χρήση των αντλιών γίνεται όταν από ένα σημείο σε ένα άλλο είτε δεν μπορεί να φτάσει το υγρό με φυσική ροή λόγω διαφοράς ύψους, είτε επειδή φτάνει μεν το υγρό, αλλά δεν διαθέτει την απαραίτητη παροχή.

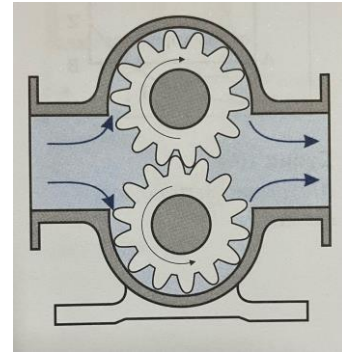
Οι αντλίες χωρίζονται κυρίως σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Αυτές είναι οι *αντλίες θετικής μετατόπισης* και οι *δυναμικές αντλίες*. Οι αντλίες θετικής μετατόπισης με τη σειρά τους χωρίζονται σε *παλινδρομικές* (Σχήμα 3.35) και *περιστροφικές* (Σχήμα 3.36). Οι αντλίες θετικής μετατόπισης επειδή στηρίζονται στη χρήση εμβόλου, με αύξηση της ταχύτητας του εμβόλου αυτού, είναι δυνατό να αυξήσουν σημαντικά την πίεση στο ρευστό. Οι δυναμικές αντλίες με τη σειρά τους, κυρίως με κριτήριο την κατεύθυνση της ροής στο εσωτερικό της αντλίας, χωρίζονται σε *φυγοκεντρικές* (Σχήμα 3.34) και *αξονικής ροής*. Εξαιτίας της ύπαρξης πτερυγίων χρησιμοποιούνται κυρίως για να αυξήσουν την παροχή ενός ρευστού.



Σχήμα 3.34: Φυγοκεντρική αντλία [18,σχ.10.6]



Σχήμα 3.35: Παλινδρομική αντλία [18,σχ.10.3]



Σχήμα 3.36: Περιτροφική αντλία [18,σχ.10.2]

Οι αντλίες είναι απαραίτητο να διαθέτουν κάποια διαγράμματα τα οποία ονομάζονται χαρακτηριστικές καμπύλες, οι οποίες όπως προδίδεται και από την ονομασία τους, χαρακτηρίζουν και προσδιορίζουν ακριβώς την αντλία και παρέχονται από τον κατασκευαστή. Η πρώτη καμπύλη είναι αυτή που συνδυάζει το μανομετρικό ύψος με την παροχή (καμπύλη H-Q), η δεύτερη είναι αυτή που παρουσιάζει τον βαθμό απόδοσης της αντλίας σε σχέση με την παροχή (καμπύλη η-Q) και η τρίτη είναι η καμπύλη ισχύος που προσδιορίζει την ισχύ που καταναλώνει η αντλία σε σχέση με την παροχή (καμπύλη P-Q) [6, §9.1-9.2-9.3], [18, §10.1].

3.5 Ροή σε ανοικτούς αγωγούς

3.5.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της ενότητας 3.4 ανοικτός αγωγός θεωρείται κάθε αγωγός που διαθέτει ελεύθερη επιφάνεια και το ρευστό, που συνήθως είναι νερό, ρέει μέσα του και εφάπτεται μόνο σε μέρος των τοιχωμάτων του αγωγού. Βασική διαφοροποίηση από τους κλειστούς αγωγούς είναι πως η πίεση που υφίσταται στην επιφάνεια του ρευστού σε αυτήν την περίπτωση ισούται με την ατμοσφαιρική και αυτό διότι έρχονται σε άμεση επαφή. Σε έναν ανοικτό αγωγό η υγρή διατομή με εμβαδόν A επί την μέση ταχύτητα V που διαθέτει το υγρό υπολογίζει την παροχή του ανοικτού αγωγού:

$$Q = V \cdot A \quad (3.132)$$

Ο υπολογισμός του εμβαδού της υγρής διατομής εξαρτάται τόσο από το σχήμα και κατ'έκταση από τη γεωμετρία του αγωγού, όσο και από το σημείο που βρίσκεται η ελεύθερη επιφάνεια. Στις περιπτώσεις που η στάθμη του ρευστού αλλάζει με το πέρασμα του χρόνου τότε το εμβαδόν εξαρτάται από μία ακόμη παράμετρο, δηλαδή το χρόνο. Τέτοια περίπτωση μπορεί να είναι η υπερχειλίση ενός ποταμού εξαιτίας ακραίων καιρικών φαινομένων.

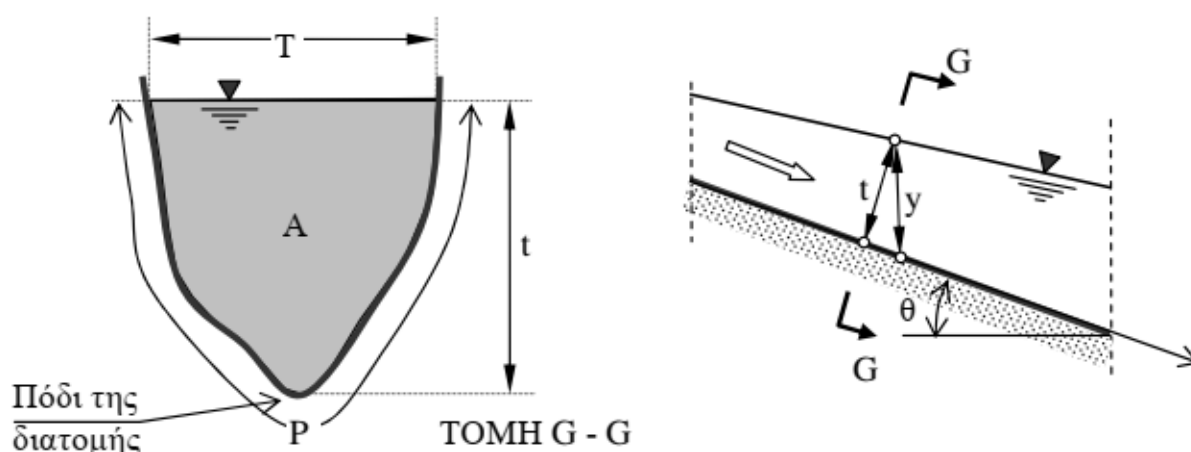
Σε ανοικτούς αγωγούς ο βασικός, αν όχι ο μοναδικός, τρόπος μεταφοράς του ρευστού είναι η φυσική ροή, όπου το ρευστό υπακούοντας στο νόμο της βαρύτητας κινείται από ανώτερα σε κατώτερα σημεία. Περιπτώσεις ανοικτών αγωγών αποτελούν τα ποτάμια, τα κανάλια, οι αγωγοί αποστράγγισης κ.α. [6, β' μέρος §1.1-1.2].

3.5.2 Χαρακτηριστικά αγωγών

Οι ανοικτοί αγωγοί ανάλογα με το αν έχουν σχηματιστεί από μόνοι τους στη φύση ή εάν έχουν σχηματιστεί με την επέμβαση του ανθρώπου, χωρίζονται σε φυσικούς αγωγούς και τεχνητούς αντίστοιχα. Παραδείγματα φυσικών αγωγών αποτελούν οι ποταμοί, τα ρέματα, τα ρυάκια κ.α. Οι αγωγοί αυτοί δε διατηρούν σταθερή διατομή και μορφή, συνήθως υφίστανται αλλοιώσεις και μεταβολές σε συνάρτηση με το χρόνο.

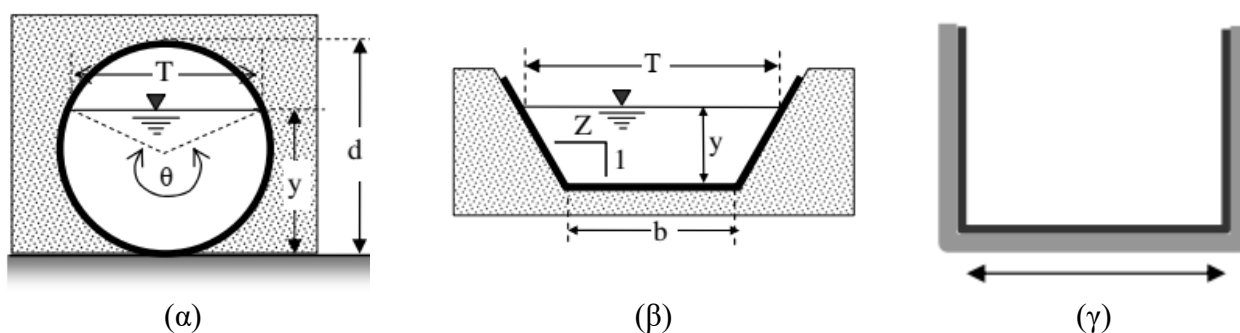
Από την άλλη πλευρά, οι τεχνητοί αγωγοί είναι αγωγοί που έχουν προκαθορισμένο και συγκεκριμένο σχήμα, αφού είναι κατασκευασμένοι από σκυρόδεμα ή σαρζανέτ γεγονός που συγκεκριμενοποιεί τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά.

Οι ανοικτοί αγωγοί διατηρούν κάποια φυσικά μεγέθη ή αλλιώς χαρακτηριστικά, που διακρίνονται πιο εύκολα με τη βοήθεια του σχήματος 3.37, και αυτά είναι η στάθμη ροής ενός αγωγού σε σύγκριση πάντα με ένα αναφορικό επίπεδο, η κλίση στον πυθμένα που συμβολίζεται με J_0 , η διατομή του αγωγού που σχηματίζει ορθή γωνία σε σχέση με τη ροή του αγωγού (τομή G-G) και η κατακόρυφη διατομή (κατεύθυνση διανύσματος \vec{y}).



Σχήμα 3.37: Φυσικά χαρακτηριστικά ανοικτού αγωγού [6, β' μέρος σχ.1.1].

Ως προς τη γεωμετρία τους οι ανοικτοί αγωγοί μπορεί να ανήκουν στους ορθογωνικούς, τριγωνικούς, τραπεζοειδείς ή και παραβολικούς, ενώ οι κλειστοί αγωγοί μπορεί να ανήκουν στους κυκλικούς ή στους ελλειπτικούς (Σχήμα 3.38).



Σχήμα 3.38: Κατηγοριοποιήσεις αγωγών ως προς τη γεωμετρία τους (α) κυκλικός, (β) τραπεζοειδής, (γ) ορθογωνικός [6].

Ανοικτοί αγωγοί που διατηρούν τη διατομή τους αμετάβλητη σε όλο τους το μήκος ονομάζονται πρισματικοί.

Στο σχήμα 3.37 διακρίνονται επίσης και τα γεωμετρικά μεγέθη των ανοικτών αγωγών που είναι τα εξής:

- Εγκάρσιο βάθος της ροής και συμβολίζεται με t .
- Κατακόρυφο βάθος της ροής που συμβολίζεται με y .
- Εμβαδόν υγρής διατομής που συμβολίζεται με A .
- Πλάτος ελεύθερης επιφάνειας που συμβολίζεται με T .
- Βρεχόμενη περίμετρος που συμβολίζεται με P .

Ενώ από συνδυασμούς αυτών των μεγεθών προκύπτουν και ορίζονται η υδραυλική ακτίνα ως $R = A/P$ και το υδραυλικό βάθος ως $D = A/T$ [6, β' μέρος §1.3-1.4].

3.5.3 Κατηγορίες ροής αγωγών ελεύθερης επιφάνειας

Προκειμένου να γίνει διαχωρισμός σε κατηγορίες της ροής, αρχικά πρέπει να ξεκαθαριστεί η βάση στην οποία μπορεί να στηριχτεί ο διαχωρισμός αυτός. Το πρώτο κριτήριο ταξινόμησης είναι κινηματικό, δηλαδή πως μεταβάλλεται η ροή χρονικά και χωρικά, ενώ το δεύτερο είναι δυναμικό, δηλαδή ανάλογα πως επηρεάζεται η ροή από δυνάμεις που ασκούνται στο ρευστό συνήθως λόγω της αδράνειας και της βαρύτητας.

Με βάση το κινηματικό κριτήριο διαμορφώνονται οι ακόλουθες κατηγορίες:

- Ροή μόνιμη και ομοιόμορφη: η ροή στην οποία το εγκάρσιο βάθος παραμένει σταθερό τόσο χρονικά όσο και χωρικά.
- Ροή μόνιμη και ανομοιόμορφη: η ροή στην οποία το εγκάρσιο βάθος παραμένει σταθερό στο χρόνο, ωστόσο αλλάζει από σημείο σε σημείο του αγωγού.
- Ροή μη μόνιμη και ομοιόμορφη: η ροή στην οποία συμπεριλαμβάνονται δύο αντικρουόμενες έννοιες με αποτέλεσμα να την καθιστά κυριολεκτικά αδύνατη, δεδομένου ότι δε γίνεται να μένει σταθερό το εγκάρσιο βάθος σε όλο το μήκος ενώ ταυτόχρονα να μεταβάλλεται με το χρόνο.
- Ροή μη μόνιμη και ανομοιόμορφη: η ροή στην οποία το εγκάρσιο βάθος αλλάζει με το πέρασμα του χρόνου αλλά και ανάλογα με το σημείο του αγωγού.

Οι δυνάμεις που δέχεται ή προκαλεί η ροή ενός ρευστού σε έναν αγωγό ελεύθερης επιφάνειας είναι κυρίως βαρυτικές, ιξώδους ή αδράνειας. Συνδυάζοντας τους λόγους των δυνάμεων αυτών προκύπτουν δύο μεγέθη πολύ χαρακτηριστικά για τη ροή σε ελεύθερη επιφάνεια. Έτσι δημιουργώντας το λόγο της δύναμης αδράνειας προς τη δύναμη ιξώδους σε μία ροή με ταχύτητα V σε έναν αγωγό με μήκος L προκύπτει ο αριθμός *Reynolds* ως:

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (3.133)$$

ο οποίος με τρόπο παρόμοιο με αυτόν στους κλειστούς αγωγούς ανάλογα με το αν υπερβαίνει μία κρίσιμη τιμή ή όχι, χαρακτηρίζει τη ροή ως στρωτή ή ως τυρβώδη αντίστοιχα.

Συνεχίζοντας με παρόμοια μεθοδολογία, δημιουργώντας το λόγο της δύναμης αδράνειας προς τη βαρυτική δύναμη προκύπτει ένα καινούριο, χαρακτηριστικό μέγεθος που δεν υπάρχει στη ροή των κλειστών αγωγών και ονομάζεται αριθμός *Froude* και συμβολίζεται με Fr και ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση 3.134.

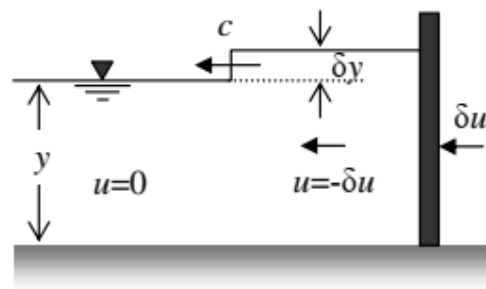
$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (3.134)$$

Το σύμβολο L στην παραπάνω σχέση ισούται με $L = \frac{A}{T} = D$, δηλαδή με το υδραυλικό βάθος που ορίζεται και σε προηγούμενη ενότητα.

Ανάλογα με τις τιμές που παίρνει ο αριθμός Froude, χαρακτηρίζει και αυτός με τη σειρά του τη ροή δυναμικά. Συγκεκριμένα εάν αυτός είναι μικρότερος από τη μονάδα τότε η ροή χαρακτηρίζεται υποκρίσιμη. Εάν αυτός είναι μεγαλύτερος της μονάδας τότε η ροή χαρακτηρίζεται υπερκρίσιμη, ενώ αν ισούται με τη μονάδα τότε η ροή χαρακτηρίζεται κρίσιμη [6, β' μέρος §1.5].

3.5.4 Ταχύτητα μετάδοσης κύματος ανοικτού αγωγού

Σύμφωνα με το σχήμα 3.39 και με απώτερο σκοπό τη δημιουργία ενός μικρού κύματος ή αλλιώς μιας μικροδιαταραχής, σε αγωγό με ελεύθερη επιφάνεια τοποθετείται ένα έμβολο. Έτσι δημιουργείται στον ανοικτό αγωγό με βάθος y , ένα κύμα με ύψος δy . Με την παραδοχή πως το έβδολο προσδίδει το ρευστό ταχύτητα, τότε το κύμα κινείται με ταχύτητα c . Παίρνοντας επίσης ως δεδομένο πως το μέγεθος του βάθους ροής είναι μικρό και πως το ύψος του κύματος που διαμορφώνεται είναι αρκετά μικρότερο σε σύγκριση με το βάθος ροής, προκύπτει έπειτα από αρκετούς υπολογισμούς η σχέση που προσδιορίζει την ταχύτητα του κύματος που αναπτύσσεται.



Σχήμα 3.39: Δημιουργία κύματος από την τοποθέτηση εμβόλου [6, β' μέρος σχ. 1.3].

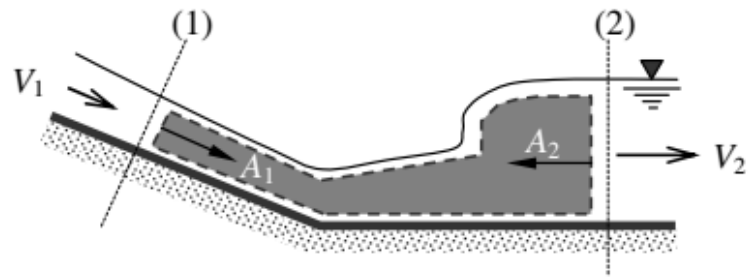
$$c = \sqrt{g \cdot y} \quad (3.135)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.134) και (3.135) προκύπτει και πάλι ο χαρακτηρισμός της ροής ως υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη και κρίσιμη, απλά αυτή τη φορά συμβαίνει έπειτα από τη σύγκριση της ταχύτητας του κύματος με την ταχύτητα της μέσης ροής. Έτσι για την υποκρίσιμη ροή ισχύει ότι η ταχύτητα του κύματος που δημιουργείται είναι μεγαλύτερη από την μέση ταχύτητα ροής του ρευστού, ενώ στην υπερκρίσιμη ροή ισχύει το ακριβώς αντίθετο. Ωστόσο στην κρίσιμη ροή όπου ισχύει ότι $V = c$ η ταχύτητα μετάδοσης της μικροδιαταραχής αμφιταλαντεύεται στα όρια της υπερκρίσιμης και της υποκρίσιμης κατάστασης, δηλαδή εσυνεχώς λίγο μικρότερη ή λίγο μεγαλύτερη αντίστοιχα από τη μέση ροή ρευστού [6, β' μέρος §1.6].

3.5.5 Μεθοδολογία ανάλυσης ροής

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των διαφορών μεγεθών της μόνιμης ροής ρευστών με ελεύθερη επιφάνεια είναι η μονοδιάστατη ανάλυση της ροής αυτού, λαμβάνοντας ως αναφορά έναν όγκο που έχει υποστεί ολοκλήρωση και εφαρμόζοντας σε αυτόν τις στοιχειώδεις σχέσεις της μηχανικής των ρευστών.

Στην περίπτωση που ο όγκος αναφοράς έχει πεπερασμένα όρια (Σχήμα 3.40) με απόσταση Δx , τότε ακολουθείται η μεθοδολογία πεπερασμένου όγκου αναφοράς. Σε άλλη περίπτωση, όπου η απόσταση μεταξύ της οριοθετημένης περιοχής είναι εξαιρετικά μικρή της τάξεως του dx , τότε ακολουθείται μεθοδολογία διαφορικού όγκου αναφοράς. Έτσι για τον όγκο αναφοράς του σχήματος ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:



Σχήμα 3.40: Όγκος αναφοράς πεπερασμένων ορίων για την ανάπτυξη μεθοδολογίας ροής. [6, β' μέρος σχ. 1.4].

- Εξίσωση της συνέχειας:

$$\int_A \rho \cdot \bar{V} \cdot d\bar{A} = 0 \Leftrightarrow A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 = Q \quad (3.136)$$

- Εξίσωση της ορμής:

$$\Sigma \bar{F} = \bar{F}_g + \bar{F}_\tau + \bar{F}_p = \rho \cdot Q \cdot (\beta_2 \cdot \bar{V}_2 - \beta_1 \cdot \bar{V}_1) \quad (3.137)$$

Όπου β είναι ο συντελεστής διόρθωσης που υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\beta = \frac{\int_A u^2 \cdot dA}{V^2 \cdot A} \quad (3.138)$$

- Εξίσωση της ενέργειας:

$$H_1 = H_2 + \Delta H_{(1-2)} \quad (3.139)$$

Όπου $H_i = a_i \cdot \frac{V_i^2}{2 \cdot g} + z_i + \frac{p_i}{\rho \cdot g}$, $\Delta H_{(1-2)}$ οι συνολικές απώλειες ενέργειας του πεπερασμένου όγκου και a_i ένας συντελεστής για διόρθωση που ορίζεται ως [6, β' μέρος §1.6]:

$$\alpha = \frac{\int_A u^3 \cdot dA}{V^3 \cdot A} \quad (3.140)$$

3.5.5.1 Ειδική ενέργεια

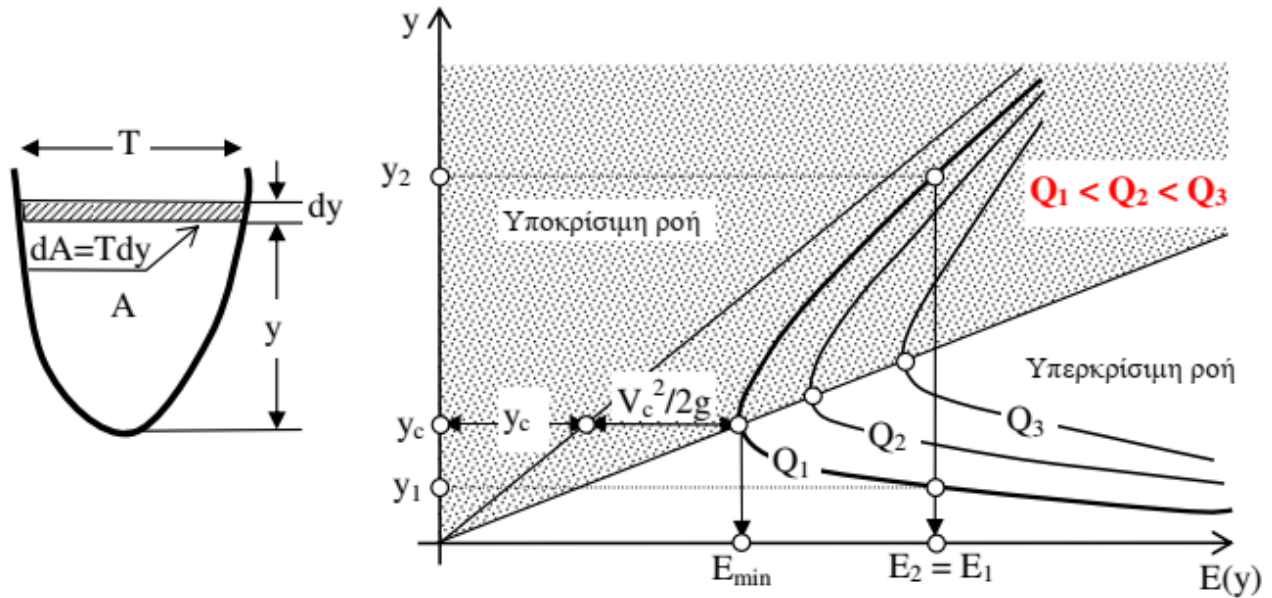
Η ειδική ενέργεια συμβολίζεται με E και καλείται η ενέργεια που έχει διατομή ανοικτού αγωγού ακριβώς επάνω από το ύψος του τυθμένα z και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E = y + a \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (3.141)$$

Η ειδική ενέργεια συναρτήσσει του βάθους με γνωστό εμβαδόν διατομής $A(y)$ και περίμετρο της επιφάνειας που βρέχεται $P(y)$ για κάθε ένα από τα βάθη ροής y , δίνεται από την εξίσωση:

$$E = E(y) = y + a \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2(y)} = y + a \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2} \quad (3.142)$$

Ως διάγραμμα ειδικής ενέργειας (Σχήμα 3.41) ορίζεται το διάγραμμα το οποίο δείχνει την ειδική ενέργεια E συναρτήσει του βάθους ροής y για συγκεκριμένες παροχές Q_i



Σχήμα 3.41: Διάγραμμα της ειδικής ενέργειας για παροχές Q_i [6, β' μέρος σχ. 2.2].

Όπως φανερώνεται και από το παραπάνω διάγραμμα, για κάθε μία διαφορετική τιμή της παροχής Q_i υπάρχει ένα συγκεκριμένο βάθος ροής, για το οποίο η ειδική ενέργεια ελαχιστοποιείται. Το βάθος ροής αυτό ονομάζεται κρίσιμο βάθος ροής και συμβολίζεται με y_c και προκύπτει επίσης από υπολογισμούς πως όταν $y = y_c$ τότε $Fr = 1$, δηλαδή ο ροή χαρακτηρίζεται κρίσιμη.

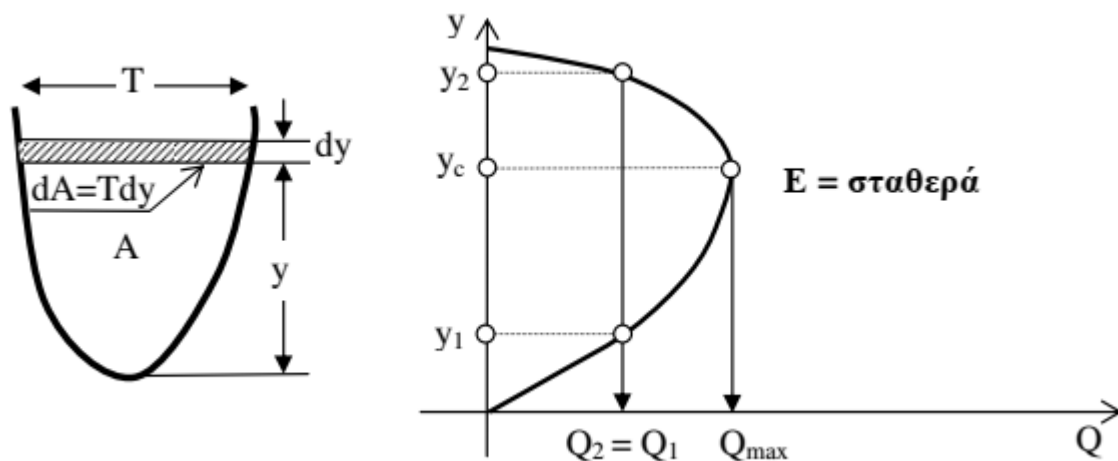
Για ενέργεια μεγαλύτερη της ελάχιστης υπάρχουν δύο μόνο τιμές παροχής Q που επαληθεύουν την εξίσωση της ειδικής ενέργειας, τα βάθη ροής των οποίων ονομάζονται εναλλακτά βάθη ροής [6, β' μέρος §2.1].

3.5.5.2 Διάγραμμα παροχής

Με επίλυση της σχέσης 3.142 ως προς Q και για $a = 1$, προκύπτει η σχέση:

$$Q = \sqrt{2 \cdot g \cdot A^2 \cdot (E - y)} \quad (3.143)$$

Ως διάγραμμα παροχής (Σχήμα 3.42) ορίζεται το διάγραμμα το οποίο δείχνει την παροχή Q συναρτήσει του βάθους ροής y για συγκεκριμένη ειδική ενέργεια. Παρατηρείται πως η παροχή μεγιστοποιείται σε κρίσιμο βάθος ροής y_c για το οποίο ισχύει και πάλι πως η ροή είναι κρίσιμη, δηλαδή $Fr = 1$. Τα δύο υπολειπόμενα βάθη που ικανοποιούν την εξίσωση της παροχής, ονομάζονται και πάλι εναλλακτά και δηλώνουν υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη ροή [6, β' μέρος §2.2].



Σχήμα 3.42: Διάγραμμα της παροχής για σταθερή ενέργεια [6, β' μέρος σχ. 2.3].

3.5.5.3 Εξίσωση ορμής

Σε έναν αγωγό ελεύθερης επιφάνειας και μεταξύ δύο πεπερασμένων ορίων η εξίσωση της ποσοτικής κίνησης ή αλλιώς ορμής δίνεται από τη σχέση:

$$F_{px} + F_{gx} + F_{\tau x} = \rho \cdot Q \cdot (V_2 - V_1) \quad (3.144)$$

Όπου F_{px} καλείται το αποτέλεσμα της υδροστατικής πίεσης στο ρευστό ως δύναμη και ορίζεται ως:

$$F_{px} = \rho \cdot g \cdot \bar{y} \cdot A \quad (3.145)$$

Όπου \bar{y} θεωρείται η μέση απόσταση της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού από το σημείο του κέντρου βάρους της διατομής του ρευστού. Έπειτα από αντικατάσταση της σχέσης (3.145) στην (3.144), προκύπτει [6, β' μέρος §2.3]:

$$\frac{F_{gx}}{g} + \frac{F_{\tau x}}{g} + \left(\frac{Q^2}{g \cdot A_1} + \bar{y}_1 \cdot A_1 \right) - \left(\frac{Q^2}{g \cdot A_2} + \bar{y}_2 \cdot A_2 \right) = 0 \quad (3.146)$$

3.5.5.4 Διάγραμμα ειδικής δύναμης

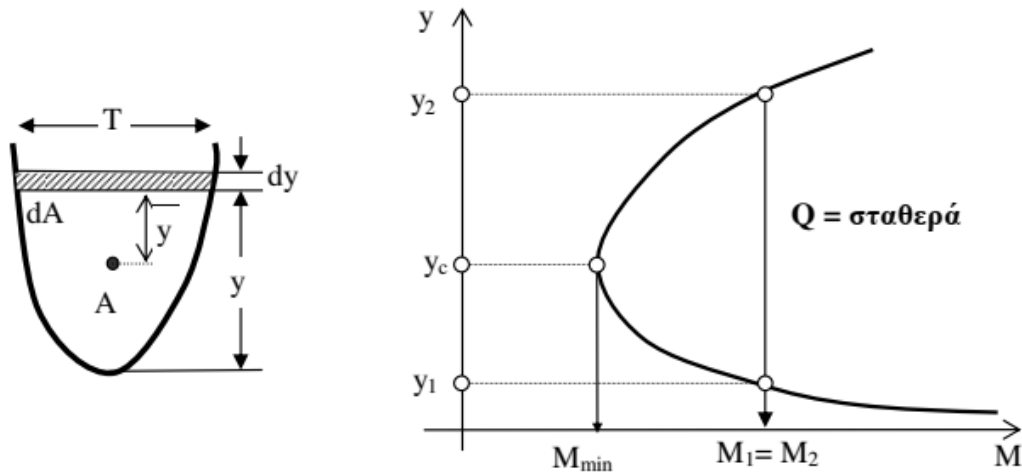
Ειδική δύναμη ονομάζεται μία ποσότητα που συμβολίζεται με M και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$M = \left(\frac{Q^2}{g \cdot A} \bar{y} \cdot A \right) \quad (3.147)$$

Έπειτα από αντικατάσταση της παραπάνω σχέσης (3.147) στη σχέση (3.146), με την παραδοχή πως η δύναμη της ορμής στον πυθμένα είναι μηδενική και πως οι δυνάμεις τριβής είναι πολύ μικρές, τότε η σχέση (3.146) γράφεται:

$$\left(\frac{Q^2}{g \cdot A_1} + \bar{y}_1 \cdot A_1 \right) - \left(\frac{Q^2}{g \cdot A_2} + \bar{y}_2 \cdot A_2 \right) \Rightarrow M_1 - M_2 = 0 \Rightarrow M_1 = M_2 \quad (3.148)$$

Ως διάγραμμα ειδικής δύναμης (Σχήμα 3.43) ορίζεται το διάγραμμα το οποίο δείχνει την ειδική δύναμη M συναρτήσει του βάθους ροής y για συγκεκριμένη και σταθερή παροχή Q .



Σχήμα 3.43: Διάγραμμα της ειδικής δύναμης για δεδομένη παροχή [6, β' μέρος σχ. 2.4].

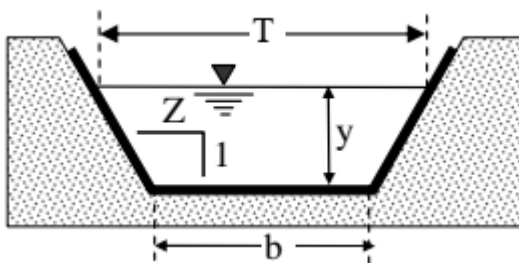
Παρατηρείται πως η ειδική δύναμη ελαχιστοποιείται σε κρίσιμο βάθος ροής y_c για το οποίο ισχύει και πάλι πως η ροή είναι κρίσιμη, δηλαδή $Fr = 1$. Όταν η ειδική δύναμη έχει μεγαλύτερη τιμή από την ελάχιστη M_{min} , τότε τα δύο βάθη ροής που ικανοποιούν ταυτόχρονα την εξίσωση (3.148) καλούνται ως συζυγή βάθη [6, β' μέρος §2.4].

3.5.5.5 Υπολογισμός του κρίσιμου βάθους

Ο υπολογισμός του κρίσιμου βάθους εξαρτάται μόνο από την παροχή και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός αγωγού. Επομένως παρακάτω φαίνονται οι σχέσεις που διέπουν ενδεικτικά σχήματα αγωγών και έχουν προκύψει από εφαρμογή των σχέσεων της ενότητας 3.5 [6, β' μέρος §2.6-2.8].

Γεωμετρία αγωγού

Κρίσιμο βάθος y_c

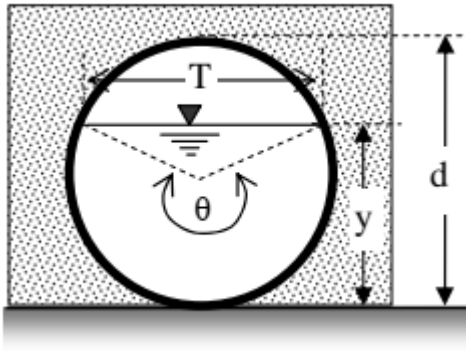


Τραπεζοειδής διατομή

$$y_c = \frac{1}{(b + Zy_c)} \cdot \left(\frac{Q^2}{g} \cdot (b + Zy_c) \right)^{1/3}$$

Διατομή ισοσκελούς τριγώνου

$$y_c = \frac{1}{(b - Zy_c)} \cdot \left(\frac{Q^2}{g} \cdot (b - Zy_c) \right)^{1/3}$$



Κυκλική διατομή

$$y_c = \frac{d}{2} \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$$

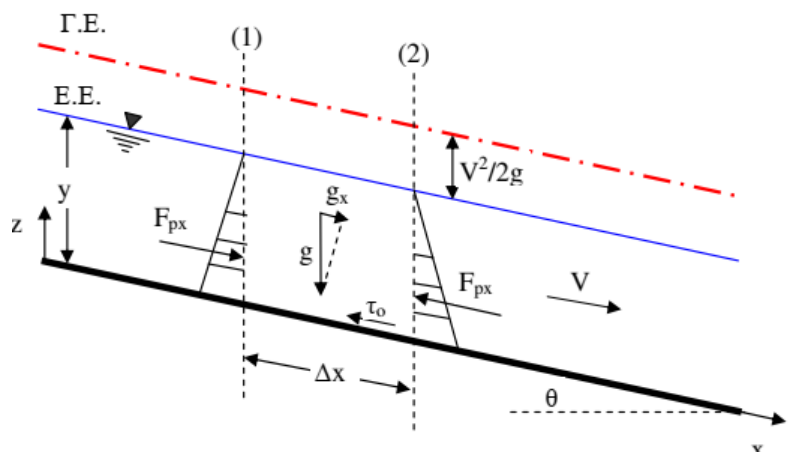


Ορθογωνική διατομή

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 \cdot g}}$$

3.5.6 Ομοιόμορφη ροή σε απλές διατομές

Πρακτικά ομοιόμορφη ροή είναι η ροή που πραγματοποιείται παράλληλα με τη διεύθυνση του αγωγού και επομένως μπορεί να υπάρξει μόνο σε αγωγούς που διατηρούν το βάθος ροής σταθερό και τη μέση ταχύτητα της ροής αμετάβλητη χωρίς να επάρχει επιτάχυνση (Σχήμα 3.44). Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει πως η γραμμή της ενέργειας, η ελεύθερη επιφάνεια και η γραμμή της κλίσης πυθμένα είναι παράλληλες μεταξύ τους και επομένως οι κλίσεις τους είναι ίσες και ισχύει:



Σχήμα 3.44: Ομοιόμορφη ροή σε ανοικτό αγωγό και παράλληλες ευθείες ενέργειας, επιφάνειας και πυθμένα [6, β' μέρος σχ. 4.1].

$$J_E = J_o = J \tag{3.149}$$

Σύμφωνα με την παραπάνω ισότητα και με εφαρμογή των εξισώσεων ορμής και συνέχειας και της σχέσης Darcy-Weisbach, προκύπτει μία σχέση που δίνει τη μέση ταχύτητα της ροής V (Σχέση 3.150), συναρτήσει της υδραυλικής ακτίνας R και του συντελεστή των τριβών f .

$$V = \sqrt{\frac{8}{f}} \cdot g \cdot \sqrt{R \cdot J_E} \quad (3.150)$$

Η σχέση 3.150, δίνει ορθά αποτελέσματα κατά κύριο λόγο, όταν πρόκειται για αγωγούς μικρών διαστάσεων. Για αγωγούς που διαθέτουν μεγαλύτερες διαστάσεις τότε ο προσδιορισμός της ταχύτητας και του συντελεστή των τριβών πραγματοποιείται από εμπειρικούς τύπους που αναφορικά είναι οι εξής:

- Τύπος Chezy
- Τύπος Kutter-Ganguilet
- Τύπος Bazin
- Τύπος Manning

με τον τελευταίο να είναι και ο επικρατέστερος έναντι των υπολοίπων [6, β' μέρος §4.1].

3.5.7 Τεχνικά στοιχεία διωρύγων ομοιόμορφης ροής

Κατασκευαστικά, οι περισσότεροι ανοικτοί αγωγοί διαθέτουν επένδυση κυρίως για την ελαχιστοποίηση των απωλειών τριβής, για την αποφυγή διαρροών και την αποφυγή δημιουργίας διαβρώσεων. Μερικά από τα στοιχεία που καθορίζουν την κατασκευή των επενδεδυμένων ανοικτών αγωγών είναι τα παρακάτω:

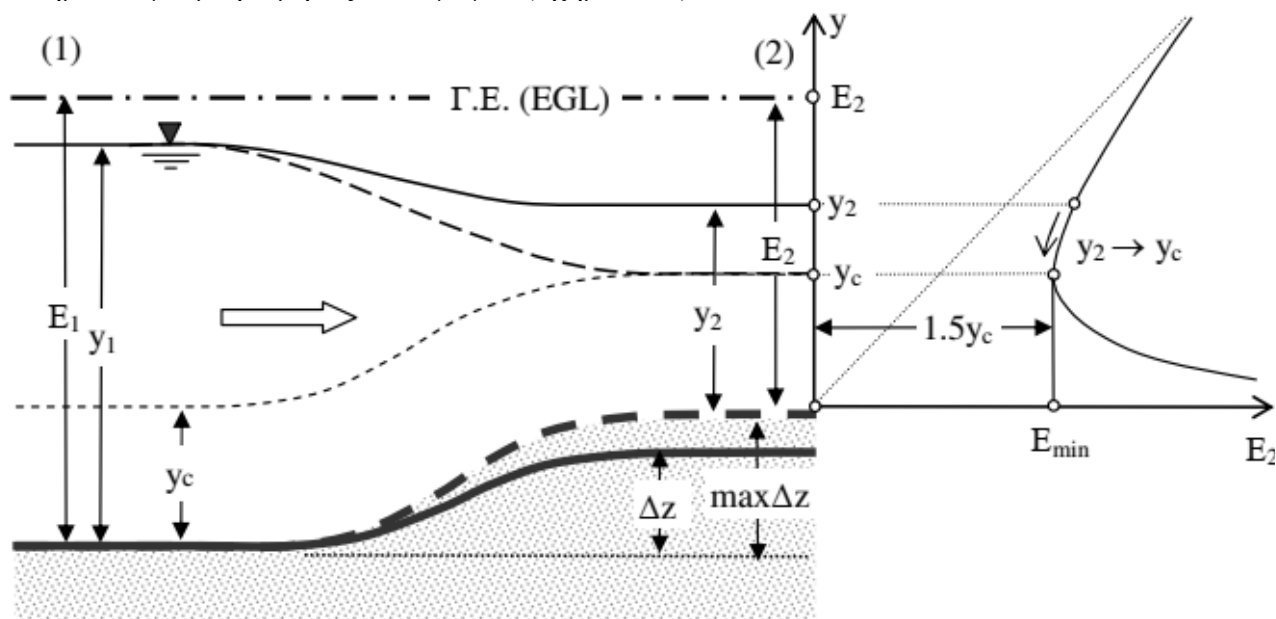
- *Το υλικό της επένδυσης.* Η επιλογή του κατάλληλου υλικού κάθε φορά για επένδυση είναι πολύ σημαντική, διότι μπορεί να εμποδίσει τη διοχέτευση του ρευστού προς το έδαφος. Επικρατέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται ως επένδυση είναι το μπετό, τα συρματοκιβώτια ή δομές από λίθους.
- *Η πιο μικρή επιτρεπόμενη ταχύτητα.* Πρόκειται για την ελάχιστη ταχύτητα που πρέπει να έχει το ρευστό ώστε να αποφεύγεται η κατακρήνη υλικών που παρασέρνει το ρευστό.
- *Η κλίση πυθμένα.* Εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους στην εκάστοτε περιοχή ενώ πρέπει να προσδιορίζεται κυρίως με βάση το που πρέπει να καταλήξει το ρευστό και επομένως πόση ενέργεια (δυναμική) χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί αυτό.
- *Η κλίση των πρανών.* Ουσιαστικά είναι ένας λόγος 1: z που ορίζεται από πίνακα και εξαρτάται από τα υλικά που αποτελείται το εκάστοτε έδαφος στο οποίο γίνεται εκσκαφή.
- *Το ελεύθερο ύψος F .* Πρόκειται για την ελάχιστη απόσταση που πρέπει να έχει η κορυφή μιας διώρυγας από την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού με απώτερο σκοπό να αφομοιώνονται οι διακυμάνσεις στη στάθμη του [6, β' μέρος κεφ.5].

3.5.8 Εφαρμογές της θεωρίας κρίσιμου βάθους

Αρκετές εφαρμογές που αλλάζουν τη διατομή ενός ανοικτού αγωγού, έχουν ως καθοριστικό μέγεθος το κρίσιμο βάθος y_c . Τέτοια αλλαγή μπορεί να επιτευχθεί είτε με μικροαλλαγές στο ύψος πυθμένα, είτε με αλλαγή στο πλάτος διατομής είτε και με τις δύο αλλαγές ταυτόχρονα. Ξεχωρίζουν οι παρακάτω εφαρμογές:

α) Ανύψωση πυθμένα

Θεωρώντας ανοικτό αγωγό με ορθογωνική διατομή, πραγματοποιείται ανύψωση πυθμένα κατά διάστημα Δz για μικρό μήκος του αγωγού (Σχήμα 3.45)



Οι σχέσεις από τις οποίες προκύπτει το νέο βάθος ροής στο σημείο (2) είναι οι ακόλουθες:

$$E_1 = \Delta z + E_2 \Rightarrow y_1 + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = \Delta z + y_2 + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \quad (3.151)$$

Δεδομένου ότι υπάρχει μία συγκεκριμένη παροχή, για την οποία η ειδική ενέργεια ελαχιστοποιείται E_{min} σε κρίσιμο βάθος ροής y_c , υπάρχει και ένα μέγιστο βύθος ανύψωσης του πυθμένα, πάνω από το οποίο δεν μπορεί να υπάρξει ροή. Αυτό δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta z_{max} = E_1 - E_{2min} = E_1 - \frac{3}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 \cdot g}} \quad (3.152)$$

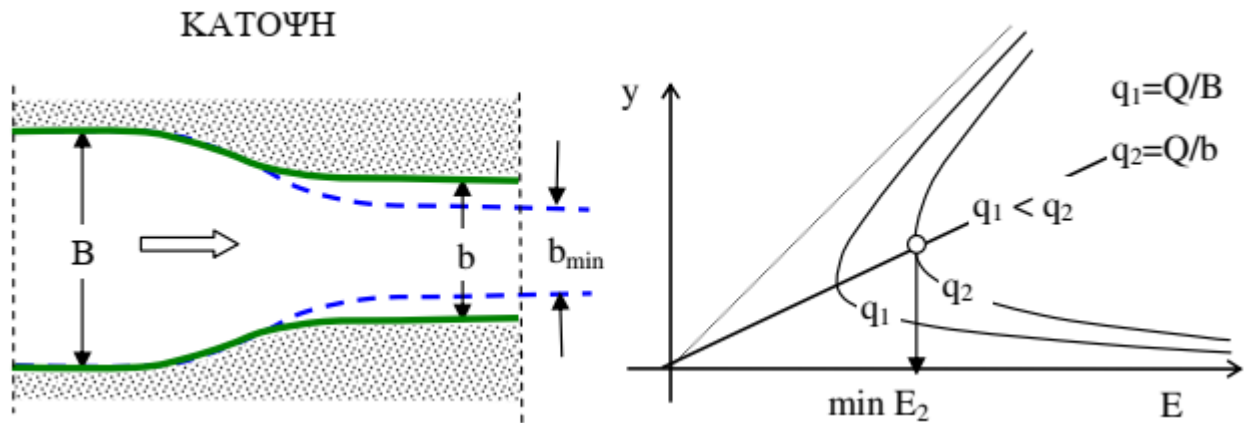
Στην περίπτωση που η ανύψωση του πυθμένα είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη τότε η παροχή που διέρχεται από το σημείο (2) θα είναι μειωμένη, εκτός και εάν αυξηθεί η ειδική ενέργεια στο σημείο (1), οπότε η παροχή βάσει ανάλυσης σχέσεων διατηρείται σταθερή ωστόσο υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης ή αποκόλλησης [6, β' μέρος §3.3].

β) Στένωση διατομής

Πραγματοποιείται στένωση διατομής ενός αγωγού (Σχήμα 3.46) από ένα αρχικό πλάτος B σε ένα μικρότερο b , ενώ η ροή είναι υποκρίσιμη και ομαλή με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν απώλειες ενέργειας μεταξύ των δύο σημείων. Έτσι, από την αρχή διατήρησης της ενέργειας μεταξύ των δύο σημείων, δηλαδή μεταξύ αρχικού και μεταγενέστερου που υπέστη μείωση πλάτους, ισχύει η εξής σχέση:

$$E_1 = E_2 \Rightarrow y_1 + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot B^2 \cdot y_1^2} = y_2 + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot b^2 \cdot y_2^2} \quad (3.153)$$

Όπως προκύπτει από την παραπάνω σχέση, το βάθος ροής στο σημείο (2) μειώνεται τόσο ώστε η ειδική ενέργεια να παραμείνει σταθερή.



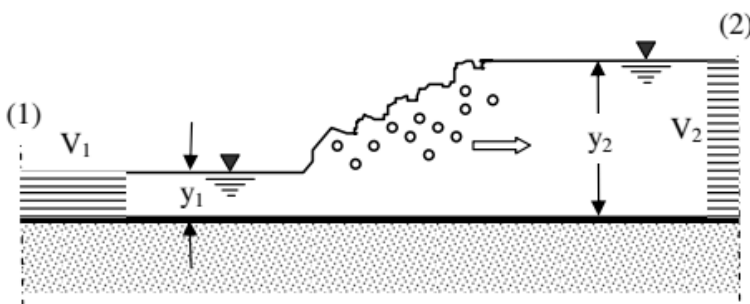
Σχήμα 3.46: Κάτοψη στένωσης αγωγού, συνοδευόμενο από διάγραμμα ειδικής ενέργειας [6, β' μέρος σχ. 3.3].

Υπάρχει ωστόσο μία ελάχιστη τιμή για το πλάτος η οποία μπορεί να εξασφαλίζει τη διέλευση της αρχικής παροχής και υπολογίζεται ως εξής:

$$b_{min} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q}{E_1^{3/2}} \sqrt{\frac{3}{2 \cdot g}} \quad (3.154)$$

Σε περίπτωση που η ροή δεν είναι υποκρίσιμη, αλλά υπερκρίσιμη, δεν ισχύουν οι παραπάνω σχέσεις [6, β' μέρος §3.4].

γ) Υδραυλικό άλμα



Σχήμα 3.47: Σχηματική απεικόνιση υδραυλικού άλματος [6, β' μέρος σχ. 3.6].

Αρκετές είναι οι αλλαγές συνθηκών που συνοδεύουν ένα υδραυλικό άλμα (Σχήμα 3.47). Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται μεταβολή ροής από υπερκρίσιμη ροή σε υποκρίσιμη, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιείται μεγάλη και απότομη αύξηση στο βάθος ροής με αρκετή αύξηση απωλειών ενέργειας εξαιτίας της δημιουργίας τύρβης.

Υδραυλικό άλμα μπορεί να υπάρξει κατά την τοποθέτηση ενός φράχτη σε κάποιο σημείο ενός ανοικτού καναλιού ή στην κατάληξη αυτού του καναλιού σε μία δεξαμενή ελεύθερης επιφάνειας που λειτουργεί ως ταμιευτήρας που πρέπει να γεμίσει με νερό.

Το μέγεθος που διατηρείται σταθερό σε αυτή τη μετάβαση είναι η ορμή και έτσι ισχύει η σχέση:

$$M_2 = M_1 \Rightarrow \left(\frac{Q^2}{g \cdot A_2} + \bar{y}_2 \cdot A_2 \right) = \left(\frac{Q^2}{g \cdot A_1} + \bar{y}_1 \cdot A_1 \right) \quad (3.155)$$

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις προσδιορισμού του βάθους ροής στο σημείο (2). Έτσι εάν το βάθος της ροής στο σημείο (1) είναι μικρότερο από το κρίσιμο τότε μετά από αρκετούς υπολογισμούς προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις.

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot y_1}} \quad (3.156)$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \cdot F_1^2} - 1 \right] \quad (3.157)$$

Ενώ εάν ισχύει πως $F_1 > 2$ τότε για τον λόγο $\frac{y_2}{y_1}$ ισχύει:

$$\frac{y_2}{y_1} = \sqrt{2} \cdot F_1 - \frac{1}{2} \quad (3.158)$$

Τα υδραυλικά άλματα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την τιμή του αριθμού Froude. Έτσι εάν $1 < Fr_1 < 1,7$, τότε το υδραυλικό άλμα χαρακτηρίζεται ως κυματοειδές, εάν $1,7 < Fr_1 < 2,5$, τότε το υδραυλικό άλμα χαρακτηρίζεται ασθενές, εάν $2,5 < Fr_1 < 5,5$, τότε το υδραυλικό άλμα ονομάζεται δονούμενο, εάν $5,5 < Fr_1 < 9$, τότε το υδραυλικό άλμα ονομάζεται μόνιμο, ενώ εάν $Fr_1 > 9$ τότε το άλμα είναι ισχυρό [6, β' μέρος §3.6-3.7].

3.5.9 Υπολογιστική διαδικασία μεταβαλλόμενης ροής

Πρακτικά η ροή δεν μπορεί να είναι ομοιόμορφη σε όλο το μήκος ενός υδατορεύματος ή μίας τεχνητής διώρυγας, ενώ ταυτόχρονα υπάρχουν πολύ μικρές αλλαγές στο βάθος ροής. Έτσι η βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή (BMP) και η μελέτη της είναι σημαντική για την επίτευξη υδραυλικών υποδομών και έργων.

Αρκετές είναι οι παραδοχές που γίνονται προκειμένου να υπάρξουν σχέσεις που περιγράφουν τη BMP. Αρχικά, οι καμπυλότητες που σχηματίζονται στην ελεύθερη επιφάνεια θεωρούνται αμελητέες με αποτέλεσμα κάθε στιγμή η ροή να θεωρείται παράλληλη και να επιτρέπεται ο ολοκληρωματικός λογισμός της μονοδιάστατης ροής. Επιπλέον, η κλίση που έχει η γραμμή ενέργειας υπολογίζεται κάθε φορά από τη σχέση Manning ως:

$$J_E = \frac{n^2 \cdot V^2}{R^{4/3}} \quad (3.159)$$

Επίσης η κλίση πυθμένος θεωρείται ελάχιστη δηλαδή το εγκάρσιο βάθος της ροής και το κατακόρυφο βάθος ταυτίζονται. Ακόμη, οι συντελεστές διόρθωσης α (της κίνησης) και n (της τραχύτητας) παραμένουν σταθεροί σε όλο τον αγωγό.

Από την εξίσωση της ενέργειας προκύπτει πως το ύψος της ενέργειας για τυχαίο σημείο υπολογίζεται ως:

$$H = z + y + a \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (3.160)$$

Μετατρέποντας της παραπάνω εξίσωση σε διαφορική προκύπτει ότι:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{J_0 - J_E}{1 - Fr^2} \quad (3.161)$$

Ανάλογα με το αποτέλεσμα που δίνει ο λόγος $\frac{dy}{dx}$ εξάγονται συμπεράσματα για την καμπύλη ελεύθερης επιφάνειας. Επομένως εάν ο παραπάνω λόγος ισούται με το μηδέν, τότε η ροή είναι όντως ομοιόμορφη όπως στην αρχική παραδοχή. Εάν $\frac{dy}{dx} > 0$, τότε υπάρχει αύξηση του βάθους ροής και η μορφή της καμπύλης της επιφάνειας χαρακτηρίζεται ως καμπύλη υπερύψωσης. Αντίθετα, εάν $\frac{dy}{dx} < 0$, τότε υπάρχει μείωση του βάθους ροής και η μορφή της καμπύλης της επιφάνειας χαρακτηρίζεται ως καμπύλη κατάπτωσης.

Το μέγεθος της κλίσης του πυθμένα, μπορεί να πάρει είτε θετικές τιμές, είτε αρνητικές, είτε να ισούται με το μηδέν. Ορίζεται κρίσιμη κλίση αγωγού και συμβολίζεται με J_c η κλίση στην οποία το βάθος ροής ενός συγκεκριμένου τμήματος ισούται με το κρίσιμο βάθος ροής. Στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 3.4) ορίζονται οι καμπύλες της ελεύθερης επιφάνειας, όπως αυτές προκύπτουν έπειτα από σύγκριση της κλίσης πυθμένα με την κρίσιμη κλίση [6, β' μέρος κεφ.6].

Πίνακας 3.4 Καμπύλες ελεύθερης επιφάνειας σε εξάρτηση με κλίση πυθμένα.

Κλίση αγωγού (χαρακτηρισμός)	Σχέση κλίσης πυθμένα και κρίσιμης κλίσης	Σχέση βάθους ροής και κρίσιμου βάθους	Καμπύλη επιφάνειας (χαρακτηρισμός)
Υποκρίσιμη	$0 < J_0 < J_c$	$y_0 > y_c$	Καμπύλη M
Κρίσιμη	$J_0 = J_c$	$y_0 = y_c$	Καμπύλη C
Υπερκρίσιμη	$J_0 > J_c$	$y_0 < y_c$	Καμπύλη S
Οριζόντια	$J_0 = J_c$	$y_0 \rightarrow \infty$	Καμπύλη H
Αρνητική	$J_0 < 0$	y_0 (φανταστικός)	Καμπύλη A

3.6 Συμπεράσματα

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μία προσπάθεια παράθεσης των βασικών χαρακτηριστικών των ρευστών, γίνεται δηλαδή μία εισαγωγή στη ρευστομηχανική, εναλύνοντας βασικούς όρους όπως το ειδικό βάρος, η πυκνότητα, η πίεση, η συμπιεστότητα ενός ρευστού καθώς επίσης και οι βασικές ιδιότητες που διαθέτει το νερό.

Κατόπιν, αναλύονται οι νόμοι και οι αρχές που διέπουν τη ρευστομηχανική. Έτσι αφότου επεξηγούνται οι δυνάμεις που δέχονται τα ρευστά και ποιες είναι αυτές σε επίπεδο ισοροπίας,

αναλύονται οι βασικές αρχές διατήρησης μάζας, διατήρησης ορμής και διατήρησης ενέργειας. Εισάγονται δε, οι βασικές εξισώσεις της συνέχειας και της κίνησης.

Έπειτα, γίνεται μία εισαγωγή στη μελέτη της κίνησης των ρευστών με τη μεθοδολογία της μονοδιάστατης ανάλυσης και η εφαρμογή των βασικών θεωρημάτων και αρχών της ρευστομηχανικής στη μονοδιάστατη αυτή ανάλυση, ενώ παράλληλα γίνεται προσπάθεια γραφικής απεικόνισης των εξισώσεων που προαναφέρθηκαν με την εισαγωγή των εννοιών της πιεζομετρικής γραμμής και της γραμμής ενέργειας.

Στη συνέχεια, αναλύονται οι δύο καταστάσεις ροής που μπορεί να υπάρξουν σε δύο μεγάλες υποενότητες, αναφερόμενες στη ροή σε κλειστούς και σε ανοικτούς γωγούς με βασικό στόχο την επίλυση βασικών προβλημάτων υδροδότησης περιοχών και κατανόησης της συμπεριφοράς και της κίνησης του ρευστού κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και προϋποθέσεις. Σημαντικό ρόλο επίσης στην ανάλυση αυτή κατέχει ο υπολογισμός των απωλειών ενέργειας ανάλογα με τις συνθήκες της ροής, ενώ γίνεται και μία μικρή αναφορά στους τρόπους μεταφοράς και αποθήκευσης του ρευστού επεξηγώντας συνοπτικά το σύνολο των υδροδυναμικών μηχανών και των καταστάσεων που ισχύουν στις δεξαμενές.

Τελικά, πραγματοποιείται μία ανάλυση της ροής που μεταβάλλεται στους ανοικτούς αγωγούς, δηλαδή στους αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, προσεγγίζοντας την ανάλυση της ροής αυτής κυρίως αναλύοντας τον υπολογισμό του κρίσομου βάθους και των καμπυλών που σχηματίζει η ελεύθερη επιφάνεια.

(ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Διαμόρφωση δικτύων διανομής

4.1.1 Εισαγωγή

Με γνώμονα το κριτήριο της κατασκευής τα Δίκτυα Διανομής χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα εναέρια και τα υπόγεια δίκτυα.

Τα εναέρια δίκτυα διανομής είναι πιο εύκολα εκμεταλλεύσιμα και έχουν χαμηλότερο κόστος από τα υπόγεια. Παλαιότερα οι αγωγοί των εναέριων δικτύων ήταν γυμνοί, γεγονός που περιόριζε τη χρήση τους. Με την εξέλιξη της τεχνικής των καλωδίων οι γυμνοί αγωγοί έχουν αντικατασταθεί σχεδόν ολοκληρωτικά από καλώδια τόσο στη χαμηλή όσο και στη μέση τάση, χωρίς ιδιαίτερη αύξηση του κόστους, επιτρέποντας έτσι τη στήριξή τους ακόμα και σε προσόψεις κτιρίων που οδηγεί σε ακόμη μικρότερες δαπάνες. Ακόμη με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται η αισθητική του περιβάλλοντος. Ένα μειονέκτημα των εναέριων δικτύων είναι πως καταλαμβάνουν αρκετό χώρο γεγονός που στις πυκνοκατοικημένες περιοχές καθιστά αδύνατη την εγκατάστασή τους, ενώ αντίθετα προσφέρονται για αγροτικές περιοχές με μικρή πυκνότητα φορτίου ή για περιοχές όπου μπορούν να τηρηθούν οι ελάχιστες αποστάσεις εγκατάστασης αγωγών με άνεση. Τα δίκτυα αυτά που εξυπηρετούν αγροτικές περιοχές και βιοτεχνικές μονάδες, χωριά και αρδευτικές περιοχές, ονομάζονται αγροτικά ή και υπεραστικά δίκτυα. Οι υποσταθμοί μέσης και χαμηλής τάσης μέχρι 400kVA κατασκευάζονται συνήθως εναέριοι, ενώ οι μεγαλύτεροι επίγειοι.

Υπόγεια δίκτυα χαμηλής και μέσης τάσης κατασκευάζονται κυρίως στα κέντρα των πόλεων. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό ποικίλουν. Αυτοί είναι προβλήματα στην αισθητική, δυσκολία εύρεσης του απαραίτητου χώρου που απαιτούν τα εναέρια δίκτυα και ακόμη ζήτηση μεγάλης πυκνότητας φορτίου στις πόλεις που από κατασκευαστικής πλευράς δεν μπορεί να υποστηριχτεί από τους αγωγούς των εναέριων δικτύων αφού οι ίδιοι δεν μπορεί να έχουν μεγαλύτερη διατομή από 50mm². Σε μικρές πόλεις ή προάστια πόλεων τα δίκτυα συχνά κατασκευάζονται μερικώς υπόγεια και μερικώς εναέρια, με το υπόγειο τμήμα να καλύπτει τη μέση τάση, ενώ το εναέριο τη χαμηλή.

Η επιλογή κατάλληλου δικτύου για μια συγκεκριμένη περιοχή είναι σύνθετη και εξαρτάται τόσο από τεχνικούς, όσο και από οικονομικούς παράγοντες, αλλά και από την εξέλιξη που πρόκειται να δεχτεί αργότερα το συγκεκριμένο δίκτυο [1, §2.1].

4.1.2 Δομή δικτύων διανομής

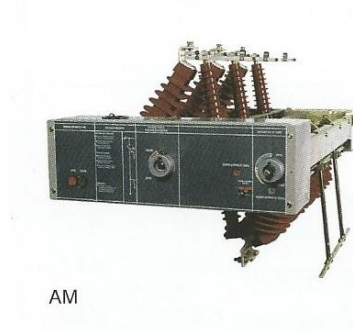
Με σκοπό την κατανόηση της δομής των δικτύων διανομής πρέπει να αναλυθούν πρωτίστως κάποιοι όροι που χρησιμοποιούνται ως βασικός τους εξοπλισμός. Σε αυτόν ανήκουν τα μέσα ζεύξεως συνδυασμένα ή μη με μέσα προστασίας.

Τα μέσα ζεύξεως χρησιμοποιούνται στα δίκτυα για την εξέλιξη των διαφόρων χειρισμών, είναι δηλαδή συσκευές που κάνουν ζεύξη ή απόζευξη τμημάτων του δικτύου. Τα κυριότερα μέσα ζεύξης είναι τα εξής:

α) Διακόπτες φορτίου. Ονομάζονται οι συσκευές που έχουν την ικανότητα να διακόπτουν ή να αποκαθιστούν εντάσεις ρευμάτων υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος και επίσης να αποκαθιστούν αλλά όχι να διακόπτουν, εντάσεις ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

β) Διακόπτες ισχύος. Ονομάζονται οι συσκευές που καλύπτουν τις λειτουργίες των διακοπών φορτίου με επιπλέον δυνατότητα ταχείας διακοπής μεγάλων εντάσεων ρευμάτων που ρέουν σε δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης σε περίπτωση βραχυκύκλωσης.

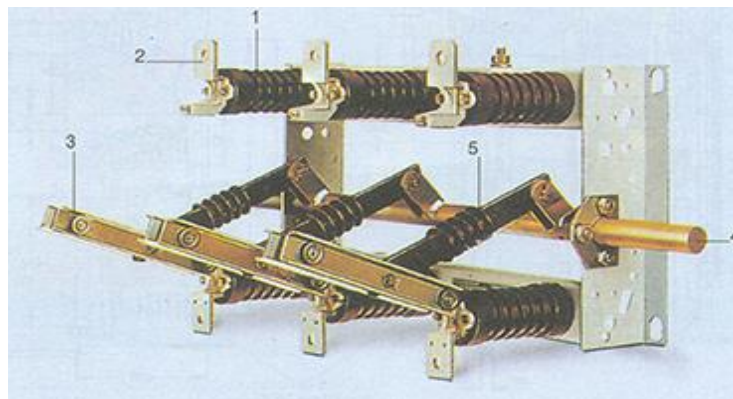
γ) Αποζεύκτες. Ονομάζονται οι συσκευές που έχουν τη δυνατότητα να διακόπτουν ή να αποκαθιστούν τη συνέχεια κυκλωμάτων που διαρρέονται από ρεύματα μικρού φορτίου ή κυκλωμάτων που δε διαθέτουν φορτίο. Διαθέτουν μαχαίρια και μπορεί να είναι μονοπολικοί ή τριπολικοί. Ο τρόπος με τον οποίο είναι σχεδιασμένοι και τοποθετημένοι προσδίδει μία ασφάλεια κατά τη διακοπή ή αποκατάσταση, καθώς βρίσκονται σε εμφανές σημείο.



Σχήμα 4.1: Περιστροφικός διακόπτης φορτίου 24kV [26, §7].



Σχήμα 4.2: Αυτόματος διακόπτης ισχύος 24kV [26, §7].



Σχήμα 4.3: Αποζεύκτης μέσης τάσης 24kV με μαχαίρια. [28]

δ) Ασφαλειοαποζεύκτες. Πρόκειται για συσκευές που λειτουργούν και ως αποζεύκτες για τη διακοπή ή αποκατάσταση κυκλωμάτων με μικρές εντάσεις ρευμάτων, αλλά και ως ασφάλειες με δυνατότητα διακοπής υπερεντάσεων ρευμάτων. Κατασκευαστικά ο αποζεύκτης προηγείται των ασφαλειών βλέποντας το κύκλωμα ως προς την παροχή της τάσης,



Σχήμα 4.4: Ασφαλειοαποζεύκτης 24kV [26, §7].

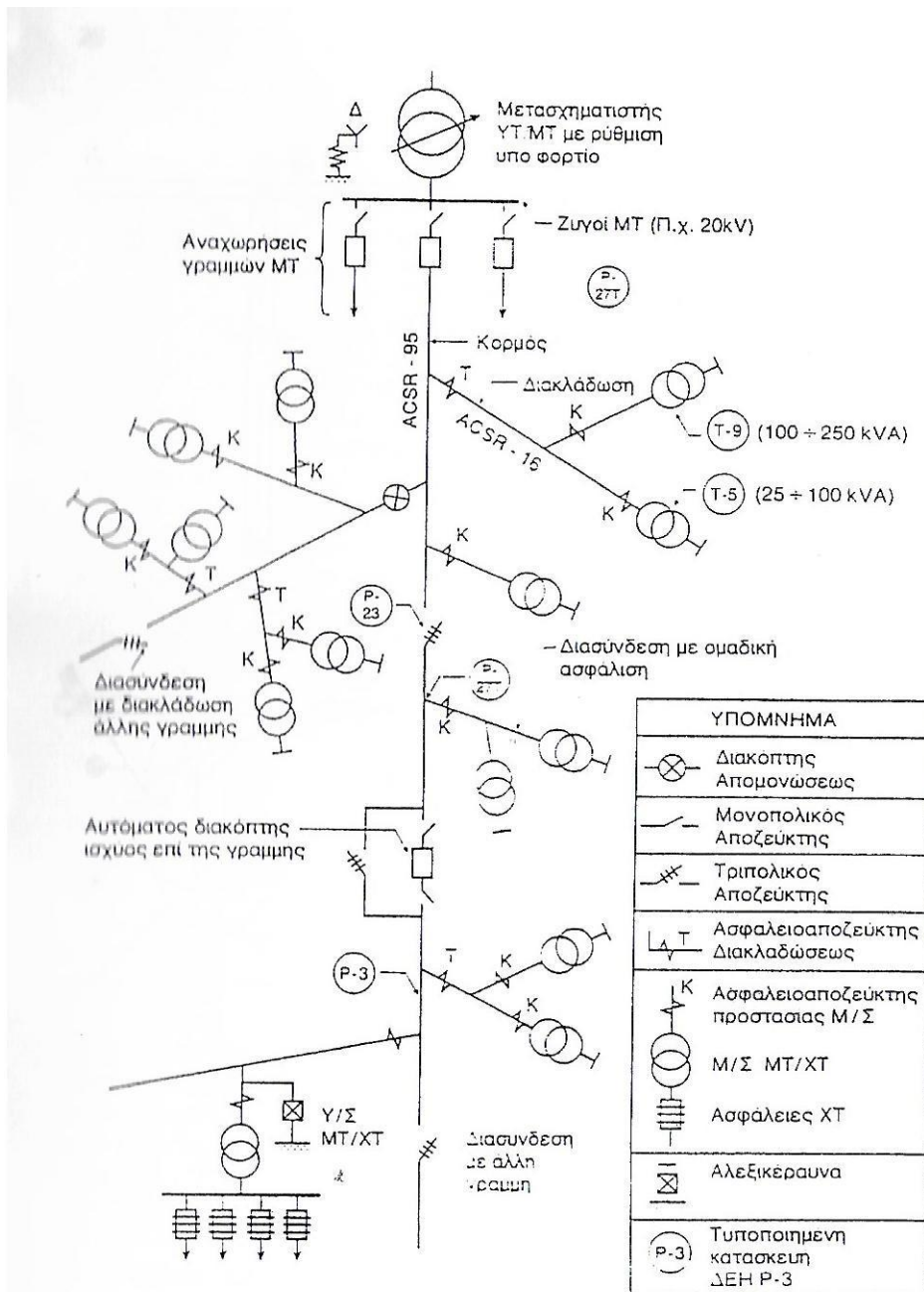
γιατί διευκολύνει περισσότερο από αυτές την απομόνωση του κυκλώματος του φορτίου από το δίκτυο, ώστε να γίνονται ακίνδυνα οι διάφορες εργασίες συντήρησης και επισκευών, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνεται και η αλλαγή των ασφαλειών [1, κεφ.2].

4.1.2.1 Εναέρια δίκτυα μέσης τάσης

Τα εναέρια δίκτυα μέσης τάσης συνήθως έχουν δενδροειδή μορφή. Αποτελούνται δηλαδή από έναν κυρίως κορμό, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από αγωγούς με μεγάλη διατομή της τάξεως των 95mm^2 ισοδύναμου χαλκού. Ακόμη διαθέτει διακλαδώσεις που χρησιμεύουν κυρίως για σύνδεση του δικτύου με υποσταθμούς μέσης/χαμηλής τάσης. Η διατομή των αγωγών που χρησιμοποιούνται στις διακλαδώσεις είναι συνήθως 35mm^2 ή 16mm^2 ισοδύναμου χαλκού. Εξαιτίας της μορφής τους, είναι εύκολη η εγκατάστασή τους σε αγροτικές περιοχές, αλλά όχι και στις ημιαστικές, όπου υπάρχουν περιορισμοί στην όδευση των γραμμών. Η λειτουργία των δικτύων μέσης τάσης επιτυγχάνεται κυρίως ακτινικά ή αλλιώς ανοιχτά, δηλαδή με τροφοδότηση των γραμμών μόνο από το ένα άκρο τους. Πιο συγκεκριμένα, η τροφοδότηση του κορμού του δικτύου γίνεται από τους ζυγούς μέσης τάσης στο ένα άκρο και στο άλλο ο κορμός συνδέεται ενδεχομένως με άλλη γραμμή του ίδιου ή άλλου υποσταθμού μέσης/υψηλής τάσης. Αποζεύκτες, διακόπτες φορτίου και διακόπτες ισχύος είναι εγκατεστημένοι κατά μήκος του κορμού σε συνδυασμό με τα κατάλληλα μέσα προστασίας ώστε να καθίσταται δυνατή η απομόνωση τμημάτων της γραμμής είτε για προληπτικούς λόγους, όπως εργασίες συντήρησης, είτε για αποκατάσταση βλαβών. Στις περισσότερες χώρες, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας με το δίκτυο της ΔΕΔΔΗΕ, με εξαίρεση κάποιες ευρωπαϊκές γίνεται εκτεταμένη χρήση ασφαλειοαποζευκτών και για προστασία και για απομόνωση (σχήμα 4.5).

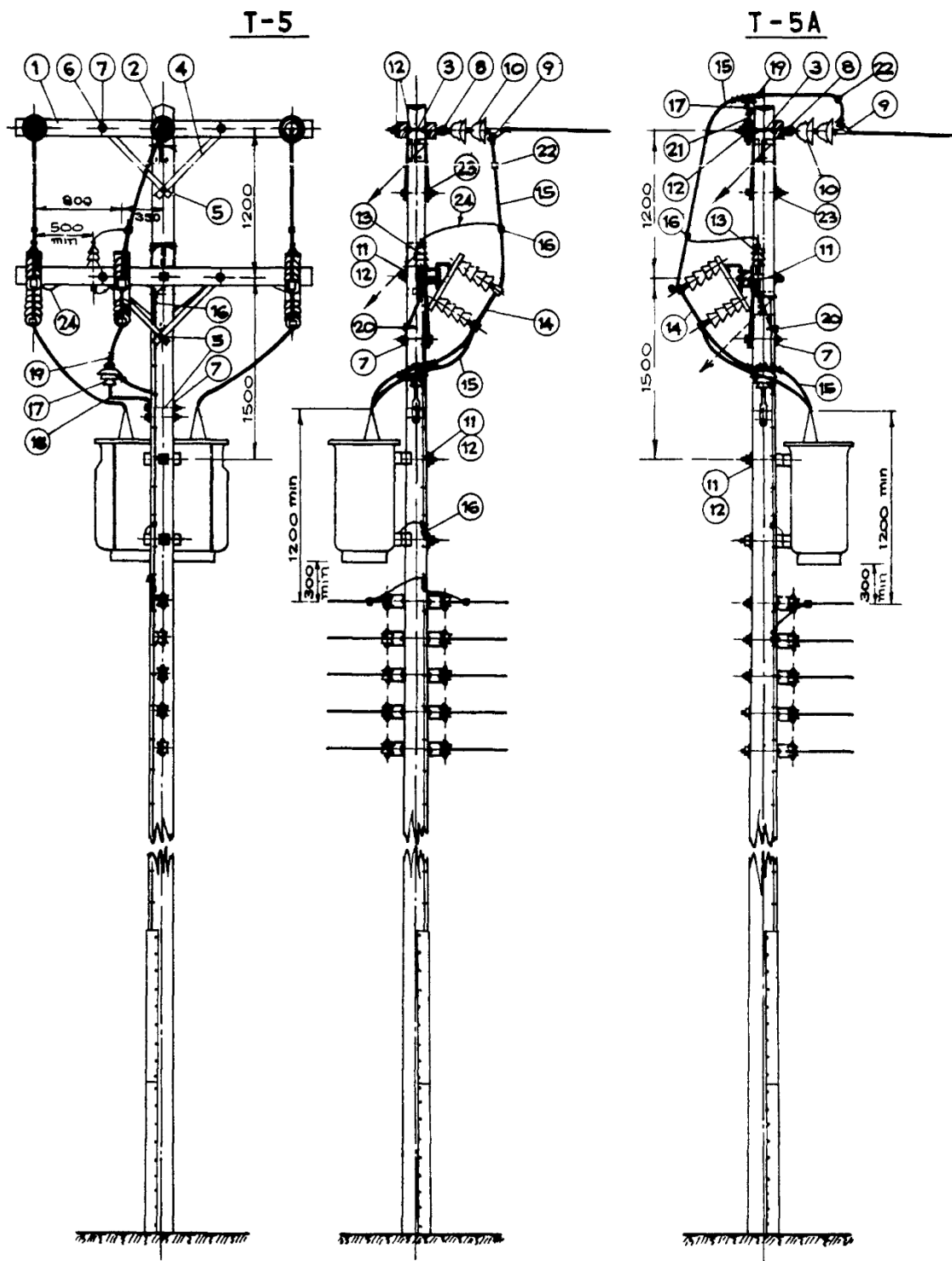
Στα εναέρια δίκτυα διανομής μέσης τάσης της Ευρώπης ο κορμός αποτελείται κυρίως από τρεις αγωγούς, δηλαδή από τις τρεις φάσεις, χωρίς τον ουδέτερο, σε αντίθεση με την Αμερική όπου ο ουδέτερος διανέμεται μαζί με τις φάσεις και γειώνεται κατά διαστήματα. Στην Ευρώπη, στον κορμό των δικτύων συμπεριλαμβάνεται και ο ουδέτερος μόνο στις γραμμές χαμηλής τάσης.

Οι διακλαδώσεις περιλαμβάνουν μόνο δύο αγωγούς, δηλαδή μία φάση και τον ουδέτερο, μόνο στην περίπτωση που δεν απαιτείται τριφασική τάση από τους καταναλωτές. Ειδική περίπτωση αποτελεί η Μ. Βρετανία και η Ιρλανδία, όπου οι διακλαδώσεις αποτελούνται μεν από δύο αγωγούς, αλλά αυτοί είναι δύο φάσεις και όχι μία φάση και ένας ουδέτερος.



Σχήμα 4.5: Τυπικό σχήμα εναερίου αγροτικού δικτύου μέσης τάσης [1,σχ.2.1].

Στο κάτω αριστερό άκρο του σχήματος 4.5 διακρίνεται ο συμβολισμός ενός υποσταθμού μέσης/χαμηλής τάσης, ο οποίος κατά κανόνα εγκαθίσταται εναέρια πάνω σε στύλους. Η ισχύς των υποσταθμών αυτών κυμαίνεται μεταξύ 25 και 250kVA. Μία τυπική μορφή ενός εναερίου υποσταθμού μέσης τάσης φαίνεται στο σχήμα 4.6 [1, κεφ.2].



Σχήμα 4.6: Εναέριος υποσταθμός μέσης τάσης επί ξύλινου στύλου 25-250 kVA [1,κεφ.2]

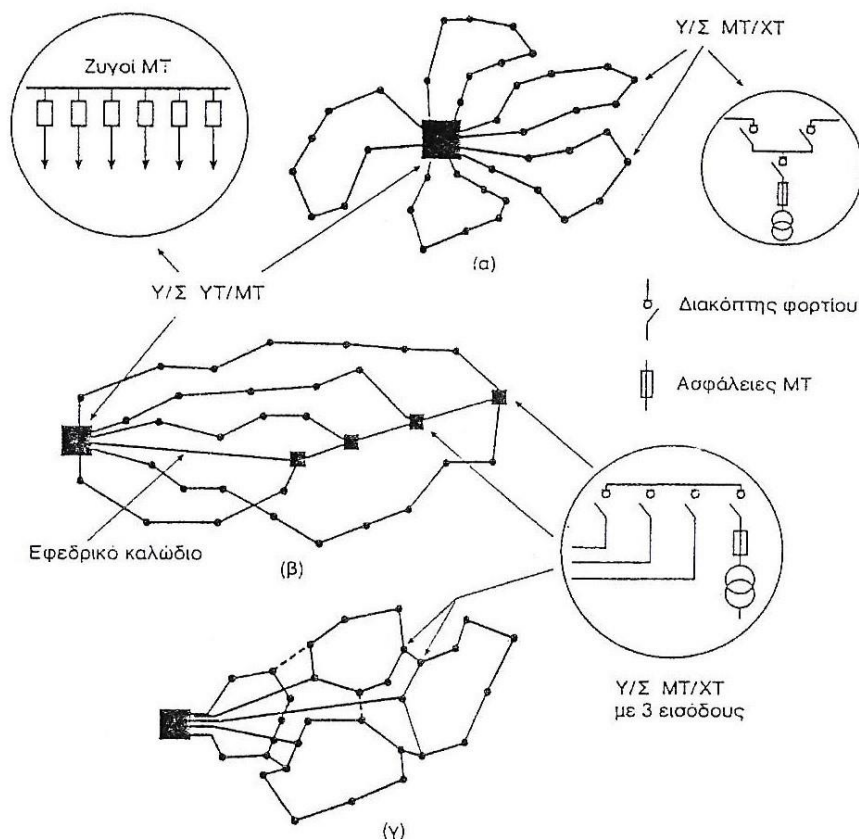
Α/Α	Π Ε Ρ Ι Γ Ρ Α Φ Η	Π Ο Σ Ο Τ Η Σ		ΛΟΓ. ΜΚ.
		T-5	T-5A	
1.	ΒΡΑΧΙΩΝ ΞΥΛΙΝΟΣ 2,5 m	3	3	354
2.	ΣΤΕΛΕΧΟΣ ΚΟΧΛΙΩΤΟΝ ΜΕΤΑ 2 ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΩΝ 20Φ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΜΗΚΟΥΣ	1	1	354
3.	ΣΤΕΛΕΧΟΣ ΚΟΧΛΙΩΤΟΝ ΜΕΤΑ 3 ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΩΝ 20Φ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΜΗΚΟΥΣ	2	2	354
4.	ΑΝΤΗΡΙΣ ΒΡΑΧΙΟΝΟΣ ΠΕΠΛΑΤΥΜΕΝΗ	8	8	354
5.	ΚΟΧΛΙΑΣ ΜΕΤΑ ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟΥ 16Φ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΜΗΚΟΥΣ	4	4	354
6.	ΚΟΧΛΙΑΣ ΜΕΤΑ ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟΥ 16Φ ΜΗΚΟΥΣ 120 mm "H 130 mm "H 200 mm	6	6	354
7.	ΠΑΡΑΚΥΚΛΟΣ ΣΤΡΟΓΓΥΛΟΣ ΟΠΗΣ 18 mm	9	9	354
8.	ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟΝ ΜΕΤ' ΟΠΗΣ ΠΡΟΣΔΕΞΕΩΣ	3	3	354
9.	ΥΛΙΚΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΚΑΤΑ FC-19I "H FC-19II "H FC-21 "H FC-29IV, ΑΝΑΛΟΓΩΣ ΤΟΥ ΕΙΔΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ	3	3	355
10.	ΜΟΝΩΤΗΡ ΤΕΡΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΕΡΙΠΥΣΜΟΥ	6	6	355
11.	ΚΟΧΛΙΑΣ ΜΕΤΑ ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟΥ 20Φ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΜΗΚΟΥΣ	3	3	354
12.	ΠΑΡΑΚΥΚΛΟΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΟΣ 60x60 mm ΟΠΗΣ 23mm	11	11	354
13.	ΑΔΕΣΙΚΕΡΑΥΝΟΝ Μ.Τ.	3	3	358
14.	ΑΣΦΑΛΕΙΟΑΠΟΖΕΥΚΤΗΣ Μ.Τ. ΜΕΤ' ΑΣΦΑΛΕΙΟΘΗΚΗΣ	3	3	358
15.	ΑΓΩΓΟΣ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟΣ 16mm ² Χ.Τ. (PVC "H BUTYL - NORPRENE) "H ΑΓΩΓΟΣ ΠΟΛΥΚΑΙΩΝΟΣ ΧΑΛΚΟΥ 16mm ²	10 m	14 m	355
16.	ΚΟΧΛΙΟΥΣΥΝΔΕΤΗΡ ΜΕΤ' ΕΓΚΟΠΗΣ ΔΙ' ΑΓΩΓΩΝ ΧΑΛΚΟΥ 16 mm ²	7	7	355
17.	ΜΟΝΩΤΗΡ ΤΥΠΟΥ ΚΩΔΩΝΟΣ Μ.Τ. ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΕΡΙΠΥΣΜΟΥ	1	4	355
18.	ΣΤΗΡΙΓΜΑ ΜΟΝΩΤΗΡΟΣ ΕΙΔΙΚΟΝ	1	1	354
19.	ΥΛΙΚΑ ΠΡΟΣΔΕΞΕΩΣ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΕΠΙ ΤΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΟΣ ΚΑΤΑ FC-27I	1	4	355
20.	ΣΤΡΙΦΟΝΙ 1/2" ΜΗΚΟΥΣ 4"	1	1	354
21.	ΣΤΗΡΙΓΜΑ ΜΟΝΩΤΗΡΟΣ	-	3	355
22.	ΥΛΙΚΑ ΣΥΝΔΕΞΕΩΣ ΚΑΤΑ FC-5II "H ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΣ ΣΥΝΔΕΤΗΡ, ΑΝΑΛΟΓΩΣ ΤΟΥ ΕΙΔΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ (ΕΑΝ ΑΠΑΙΤΩΝΤΑΙ)	3	3	355
23.	ΠΑΡΑΚΥΚΛΟΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΟΠΗΣ 18 mm	1	1	354
24.	ΑΓΩΓΟΣ ΧΑΛΚΙΝΟΣ 16mm ² ΜΟΝΟΚΑΙΩΝΟΣ	6 m	6 m	355

Σχήμα 4.6 (συνέχεια): Εναέριος υποσταθμός μέσης τάσης επί ξύλινου στύλου 25-250 kVA [1,κεφ.2]

4.1.2.2 Υπόγεια δίκτυα μέσης τάσης

Ο εντοπισμός μιας βλάβης σε ένα εναέριο δίκτυο αποτελεί μία εύκολη σχετικά διαδικασία, ενώ η αποκατάσταση αυτής επιτυγχάνεται σε ένα διάστημα λίγων ωρών. Αντίθετα σε ένα υπόγειο δίκτυο ο εντοπισμός και η αποκατάσταση μιας βλάβης είναι δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που η μορφή των υπόγειων δικτύων μέσης τάσης δεν μπορεί να είναι ίδια με αυτή των εναερίων. Πιο συγκεκριμένα, στις περιοχές στις οποίες εγκαθίστανται τα υπόγεια δίκτυα υπάρχει μεγάλη ζήτηση φορτίου, γεγονός που δεν επιτρέπει τη διακοπή της τροφοδότησης για το ενδεχομένως μεγάλο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αποκατάσταση της βλάβης. Αυτόματα γίνεται κατανοητό πως η τροφοδότηση των υποσταθμών δεν μπορεί να γίνεται ακτινικά, δηλαδή μόνο από το ένα άκρο, αλλά πρέπει να υπάρχει εναλλακτικός τρόπος τροφοδότησής τους από άλλη οδό, μετά από ορισμένους χειρισμούς. Υπάρχουν τρία βασικά σχήματα και οι παραλλαγές αυτών που συναντώνται

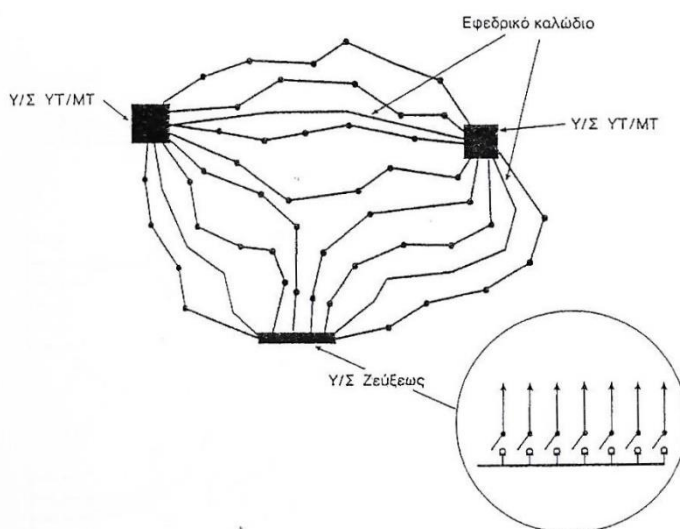
στα υπόγεια δίκτυα μέσης τάσης και ικανοποιούν την παραπάνω απαίτηση. Αυτά είναι το ‘βροχοειδές’, το ‘ατρακτοειδές’ και το ‘διπλής τροφοδότησης’



Σχήμα 4.7: ‘Βροχοειδή’ σχήματα υπόγειου δικτύου μέσης τάσης [1,κεφ.2].

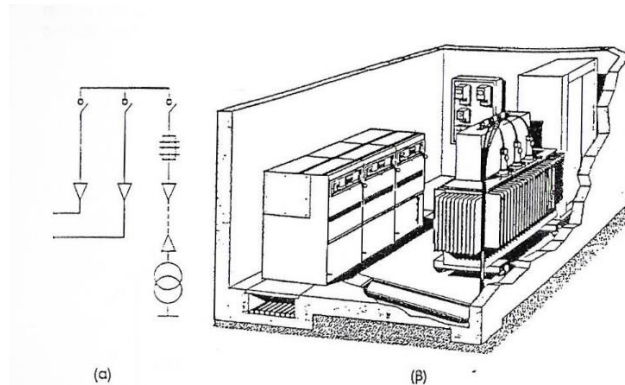
‘Βροχοειδές’ καλείται το σχήμα των υπόγειων δικτύων στο οποίο οι γραμμές αποτελούν τμήματα βρόχου, ξεκινώντας και τελειώνοντας στον ίδιο υποσταθμό υψηλής/μέσης τάσης (σχήμα 4.7).

‘Ατρακτοειδές’ καλείται στο σχήμα των υπόγειων δικτύων στο οποίο οι γραμμές ξεκινούν από έναν υποσταθμό υψηλής/μέσης τάσης και καταλήγουν σε έναν άλλο ή σε έναν υποσταθμό ζεύξεως (σχήμα 4.8). Αρκετές φορές, για λόγους οικονομίας, η διαμόρφωση των δικτύων διαφέρει από τα βασικά σχήματα που αναλύθηκαν. Έτσι συχνά στα βροχοειδή σχήματα γίνεται μια ανάμειξη μεταξύ των περιπτώσεων (α),(β), και (γ) του σχήματος 4.7.



Σχήμα 4.8: ‘Ατρακτοειδές’ σχήμα υπόγειου δικτύου μέσης τάσης [1,κεφ.2].

Η διαμόρφωση του εξοπλισμού ζεύξεως των βροχοειδών και ατρακτοειδών σχημάτων στην πλευρά της μέσης τάσης γίνεται με είσοδο-έξοδο του καλωδίου γραμμής στον υποσταθμό μέσης/χαμηλής τάσης όπως φαίνεται διαγραμματικά και κατασκευαστικά στο σχήμα

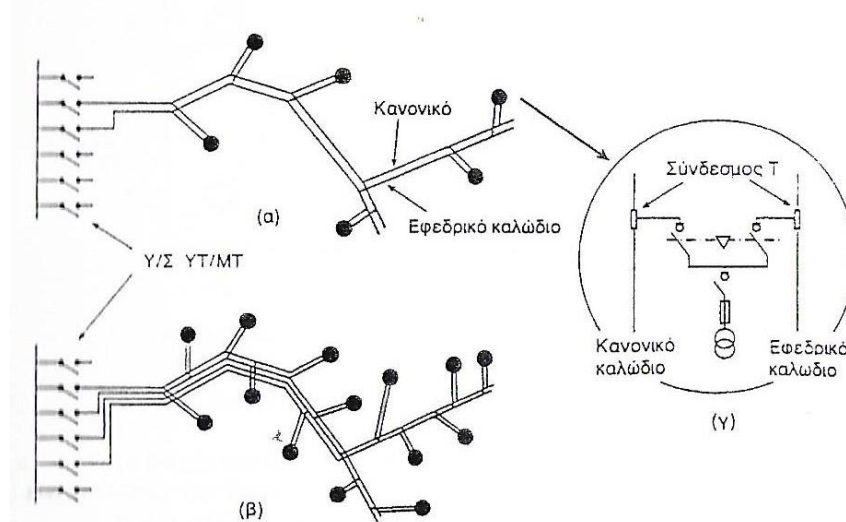


Σχήμα 4.9: Υποσταθμός μέσης/χαμηλής τάσης σε κλειστό χώρο [1,κεφ.2].

4.9) Κατά κανόνα οι γραμμές και στις δύο περιπτώσεις που αναφέρθηκαν λειτουργούν ακτινικά. Στα μεν βροχοειδή σχήματα παραμένει ανοικτός ένας διακόπτης φορτίου στην είσοδο ή στην έξοδο ενός υποσταθμού, στα δε ατρακτοειδή παραμένουν συχνά ανοικτοί οι διακόπτες των ζυγών μέσης τάσης των υποσταθμών υψηλής/μέσης τάσης ή του υποσταθμού ζεύξεως.

Σε περίπτωση βλάβης των υπόγειων δικτύων και συγκεκριμένα των δύο παραπάνω περιπτώσεων που έχουν αναφερθεί, αρχικά πραγματοποιείται άνοιγμα του διακόπτη ισχύος που προστατεύει τη γραμμή στην αναχώρησή της από τον υποσταθμό υψηλής/μέσης τάσης. Δευτερευόντως και μετά τον εντοπισμό της θέσης της βλάβης, γίνεται απομόνωση του αντίστοιχου τμήματος με το άνοιγμα των εκατέρωθεν διακοπών φορτίου και επανατροφοδότηση των υπόλοιπων τμημάτων.

Το τρίτο και τελευταίο βασικό σχήμα υπόγειων δικτύων είναι το ‘διπλής τροφοδότησης’ (σχήμα 4.10), το οποίο μοιάζει αρκετά με την ακτινική μορφή των εναέριων δικτύων με ειδοποιό διαφορά όμως ότι αποτελείται από παράλληλες



Σχήμα 4.10: Σχήμα ‘διπλής τροφοδότησης’ υπόγειων δικτύων μέσης τάσης [1,κεφ.2]

ακτινικές γραμμές. Κάθε υποσταθμός μέσης/χαμηλής τάσης φέρει δύο γραμμές τροφοδότησης, μία που λειτουργεί κανονικά ως ‘κανονική’ τροφοδότηση και μία που λειτουργεί ως ‘εφεδρική’. Η λειτουργική διάταξη του εξοπλισμού ζεύξεως στα σχήματα διπλής τροφοδότησης από την πλευρά της

μέσης τάσης γίνεται όπως και στην περίπτωση του σχήματος 4.9, μόνο που σε αυτήν την περίπτωση οι διακόπτες φορτίου διασυνδέονται μεταξύ τους ώστε να αποτρέπεται το ταυτόχρονο κλείσιμό τους. Οι δύο πιο σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή του κατάλληλου σχήματος υπόγειου δικτύου μέσης τάσης αποτελούν οι γεωγραφικές συνθήκες της υπό εξέταση περιοχής και η κατανομή των φορτίων της περιοχής αυτής, σε συνδυασμό με την εξέλιξη που προβλέπεται να έχει η περιοχή στο μέλλον.

Σύγκριση μπορεί να υπάρξει ακόμη και ανάμεσα σε διαφορετικούς τύπους δικτύων του ίδιου σχήματος. Όσον αφορά το σχήμα 4.7 (α), που αποτελεί το καθαρά βροχοειδές σχήμα, παρουσιάζει το πλεονέκτημα της απλότητας, έχοντας όμως το μειονέκτημα της αξιοποίησης της ικανότητας φόρτισης του καλωδίου μόλις στο 50%, ενώ ταυτόχρονα δεν ενδείκνυται για περιοχές που παρουσιάζουν ανάπτυξη. Τα σχήματα 4.7 (β) και (γ) επιτρέπουν την πληρέστερη αξιοποίηση των καλωδίων. Τη μέγιστη βέβαια αξιοποίηση των καλωδίων επιτρέπουν τα ατρακτοειδή σχήματα, τα οποία όμως από την άλλη πλευρά μπορεί να κοστίζουν περισσότερο λόγω της ανάγκης τους για δημιουργία υποσταθμού ζεύξεως. Τα δίκτυα διπλής τροφοδότησης είναι ιδανικά για περιοχές όπου υπάρχουν μεγάλα πολυόροφα κτίρια σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους, με βασικό πλεονέκτημα πως σε περίπτωση βλάβης ενός καλωδίου, η επανατροφοδότηση στους συνδεδεμένους υποσταθμούς μέσης/χαμηλής τάσης γίνεται πολύ εύκολα απλά με μεταγωγή στο εφεδρικό καλώδιο, χειροκίνητα ή αυτόματα. Κύριο μειονέκτημα αυτών αποτελεί το γεγονός ότι η εγκατάστασή τους είναι αρκετά δύσκολη σε πόλεις με συνήθη συνεχή δόμηση.

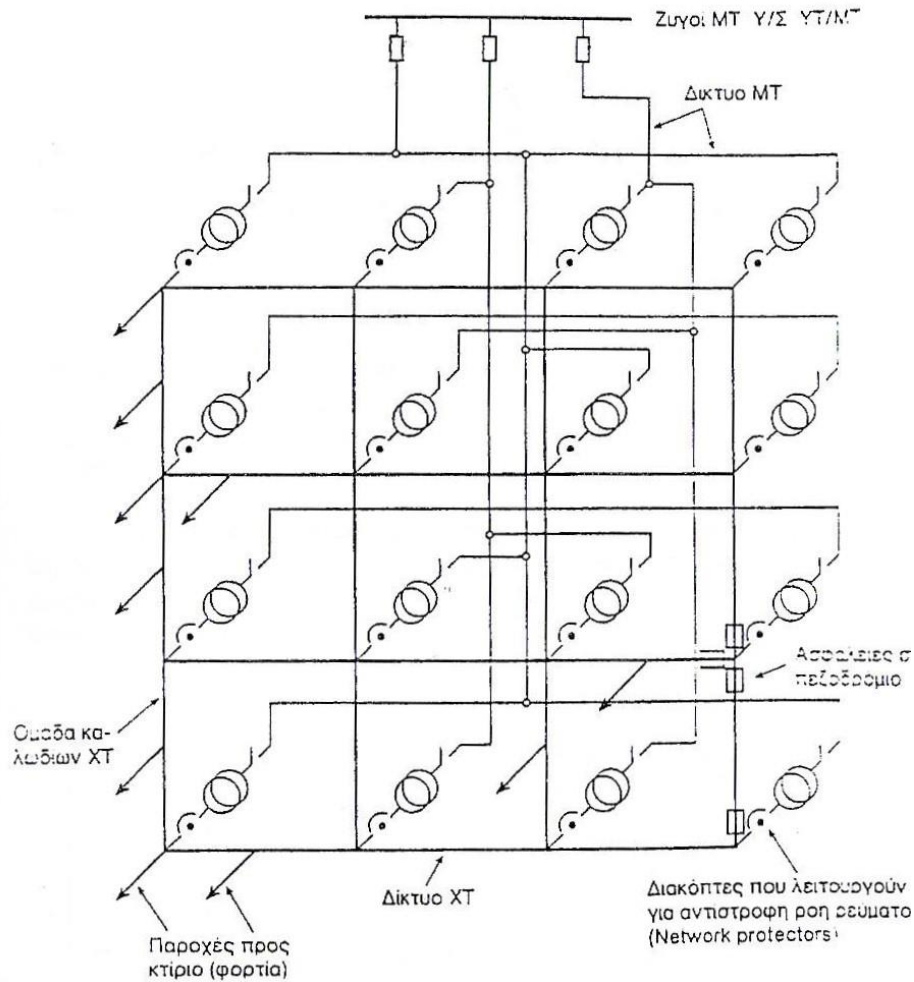
Η επικρατέστερη κατηγορία υπόγειων δικτύων, τόσο στην Ελλάδα, όσο και διεθνώς, είναι τα βροχοειδή σχήματα, δίνοντας όμως ιδιαίτερη προσοχή στη βελτίωσή τους, κυρίως όσον αφορά το χρόνο εντοπισμού μιας βλάβης [1, κεφ.2].

4.1.2.3 Δικτυωτά δίκτυα χαμηλής τάσης

Πρόκειται για δίκτυα χαμηλής τάσης των οποίων τα καλώδια είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με τρόπο, ώστε να δημιουργούν ένα κλειστό δικτυωτό πλέγμα. Κάθε ένα από τα τετράγωνα που δημιουργούν αντιστοιχεί σε ένα οικοδομικό τετράγωνο. Κάθε πλευρά του τετραγώνου μπορεί να διαθέτει παραπάνω από ένα καλώδια, τα οποία διασταυρώνονται με τα καλώδια των άλλων πλευρών σε υπόγεια κιβώτια, ενώ εκεί εγκαθίστανται ασφάλειες χαμηλής τάσης. Οι συνδέσεις των καταναλωτών στο δίκτυο επιτυγχάνονται με σύνδεση σε ένα από τα διερχόμενα καλώδια του δικτυωτού πλέγματος (σχήμα 4.11)

Τα δικτυωτά ή κλειστά δίκτυα χαμηλής τάσης μπορούν να τροφοδοτηθούν είτε από ανοικτά ή αλλιώς ακτινικά δίκτυα μέσης τάσης, είτε από κλειστά.

Οι υποσταθμοί μέσης/χαμηλής τάσης διαθέτουν στην πλευρά της χαμηλής τάσης των μετασχηματιστών τους, ένα διακόπτη ισχύος συνοδευόμενο με τα κατάλληλα μέσα προστασίας που ανοίγει όταν χρειάζεται και αποτρέπει την αντίστροφη ροή ρεύματος, δηλαδή από τη χαμηλή προς τη μέση τάση.



Σχήμα 4.11: Σχήμα δικτυωτού δικτύου χαμηλής τάσης [1, κεφ.2].

Αυτή η μορφή δικτύου παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Αρχικά παρουσιάζει τις μικρότερες απώλειες από όλα τα σχήματα. Έπειτα, ανάλογα με το δίκτυο μέσης τάσης από το οποίο τροφοδοτείται, μπορεί να καλύψει μικρές ή μεγάλες περιοχές. Ακόμη παρέχει υψηλό βαθμό εξυπηρέτησης στους καταναλωτές τόσο σε θέματα προστασίας όσο και σε θέματα συνεχούς τροφοδότησης, αφού ενδεχόμενο σφάλμα σε γραμμή μέσης τάσης εκτός του ανοίγματος του διακόπτη ισχύος στην αναχώρηση του υποσταθμού υψηλής/μέσης τάσης προκαλεί και άνοιγμα όλων των διακοπών ισχύος χαμηλής τάσης της γραμμής αυτής, χωρίς όμως να διακοπεί η τροφοδότηση με ρεύμα των καταναλωτών του δικτύου χαμηλής τάσης αφού θα τροφοδοτηθούν από τις άλλες γραμμές μέσης τάσης. Για σφάλμα που μπορεί να προκύψει στις γραμμές χαμηλής τάσης προκαλείται τήξη των ασφαλειών που βρίσκονται εκατέρωθεν του σφάλματος, οπότε παραμένουν χωρίς τροφοδότηση μονάχα οι καταναλωτές που βρίσκονται στη μία πλευρά του οικοδομικού τετραγώνου.

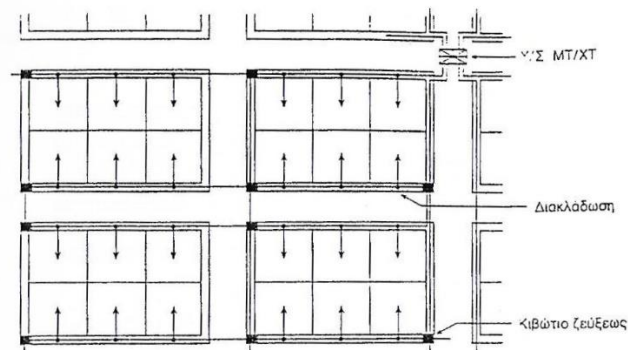
Όσο μεγαλύτερη είναι η έκταση των δικτύων αυτών, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ανάγκη για καθημερινή παρακολούθηση της κατανομής των φορτίων, προκειμένου να αποτρέπονται υπερφορτίσεις ή ακόμη και απώλεια ολόκληρης γραμμής.

Η εξέλιξη των ανοικτών βέβαια δικτύων όπως θα αναλυθεί και παρακάτω σε συνδυασμό με το χαμηλότερο κόστος τους, κάνει την ανάγκη για δημιουργία δικτυωτών δικτύων όλο και μικρότερη, ωστόσο κάποιες φορές η χρήση τους είναι απαραίτητη και πιο συμφέρουσα [1, κεφ.2].

4.1.2.4 Υπόγεια δίκτυα χαμηλής τάσης

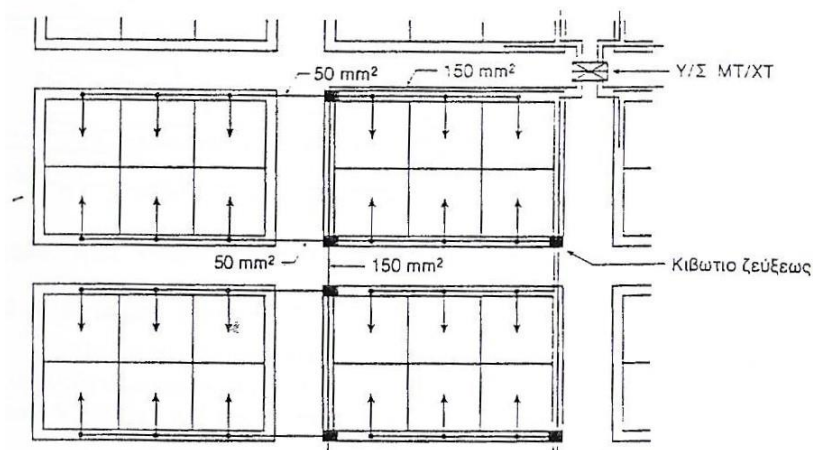
Τα υπόγεια δίκτυα χαμηλής τάσης σε αντίθεση με αυτά της μέσης , είναι ανοικτά ή ακτινικά λειτουργικά, παρόλο που ο σχηματισμός τους παραπέμπει σε κλειστά δίκτυα. Συγκεκριμένα υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να σχεδιαστεί ένα υπόγειο δίκτυο χαμηλής τάσης.

Ο πρώτος παρέχει διπλή τροφοδότηση κάθε πλευράς οικοδομικού τετραγώνου χρησιμοποιώντας όμως καλώδια ενιαίας διατομής (σχήμα 4.12). Ο δεύτερος δημιουργεί βρόχους κατά την αναχώρηση από τον υποσταθμό μέσης/χαμηλής τάσης, αλλά η διανομή στους καταναλωτές γίνεται ακτινικά με καλώδια μικρό-

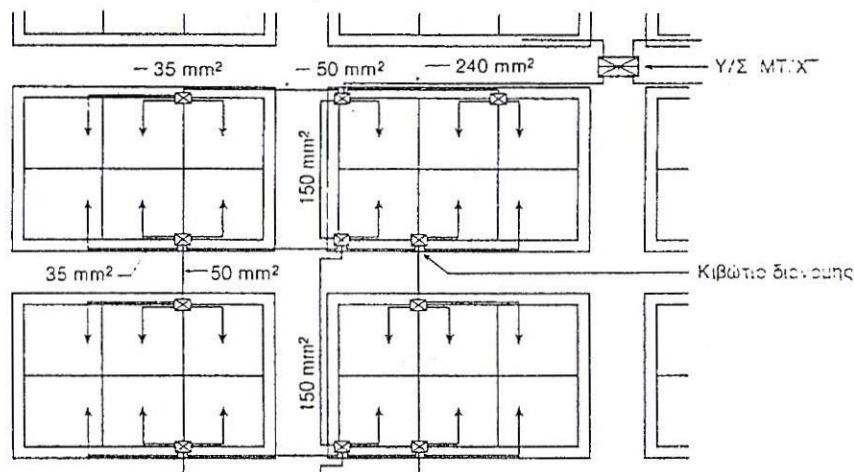


Σχήμα 4.12: Υπόγειο δίκτυο χαμηλής τάσης με διπλή τροφοδότηση κάθε πλευράς τετραγώνου [1, κεφ.2].

τερης διατομής (σχήμα 4.13). Κατά τον τρίτο και τελευταίο τρόπο, δε δημιουργούνται ούτε κατασκευαστικά κλειστοί βρόχοι, αλλά χρησιμοποιούνται κιβώτια διανομής, από τα οποία φεύγουν καλώδια διαφορετικών διατομών ανάλογα με τις ανάγκες φόρτισης κάθε γραμμής (σχήμα 4.14).



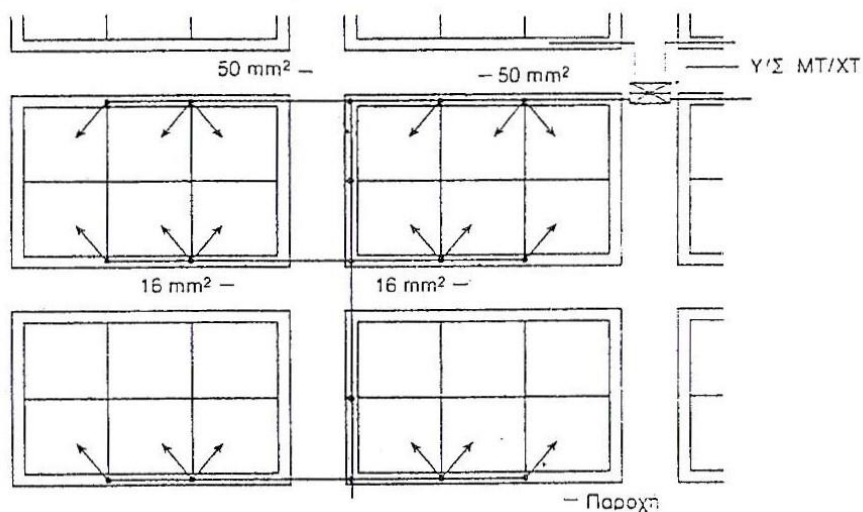
Σχήμα 4.13: Υπόγειο δίκτυο χαμηλής τάσης με απλή τροφοδότηση κάθε πλευράς τετραγώνου[1, κεφ.2].



Σχήμα 4.14: Υπόγειο δίκτυο χαμηλής τάσης με χρήση κιβωτίων διανομής [1, κεφ.2].

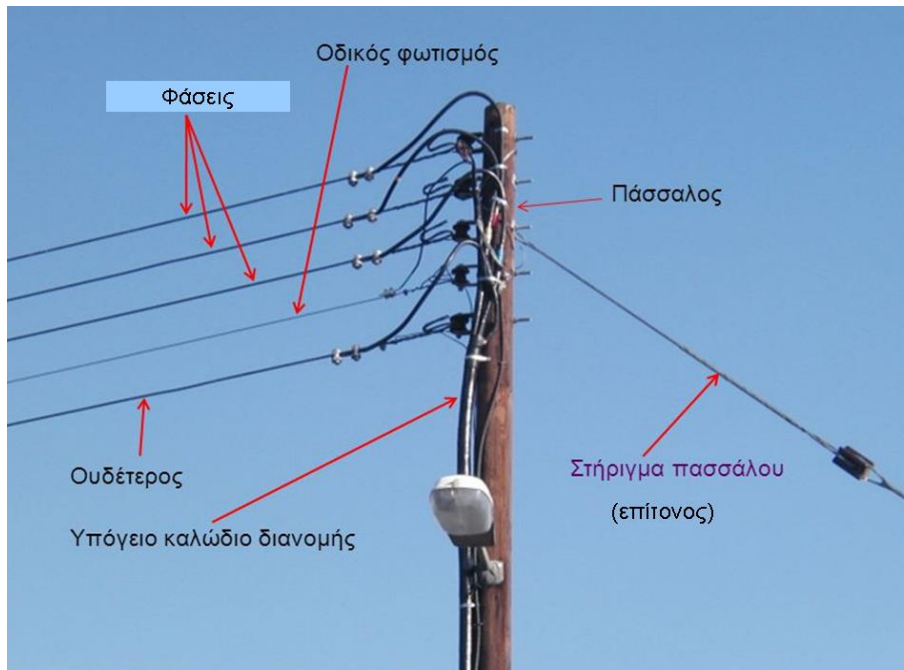
Ο δεύτερος τρόπος αποτελεί μία ενδιάμεση κατάσταση του πρώτου και του τρίτου, με τον πρώτο να διαθέτει το μεγαλύτερο βαθμό εξυπηρέτησης των καταναλωτών και τον τρίτο να αποτελεί την οικονομικότερη λύση. Ο σχηματισμός που φαίνεται στο σχήμα 4.12 ενδείκνυται για περιοχές με μεγάλη πυκνότητα φορτίου και για περιοχές που πρόκειται να αναπτυχθούν, αφού μπορεί να μεγαλώσει απλά με την προσθήκη υποσταθμών μέσης/χαμηλής τάσης [1, κεφ.2].

4.1.2.5 Εναέρια δίκτυα χαμηλής τάσης



Σχήμα 4.15: Εναέριο δίκτυο χαμηλής τάσης [1, κεφ.2].

Τα εναέρια δίκτυα χαμηλής τάσης είναι κατασκευαστικά πιο απλά, αφού δεν διαθέτουν διπλή τροφοδότηση και αποτελούνται από γυμνούς ή μονωμένους αγωγούς, οι γραμμές των οποίων μπορεί να είναι είτε μονοφασικές, είτε τριφασικές. Στο σχήμα 4.15 φαίνεται η αντίστοιχη διαμόρφωση ενός εναέριου δικτύου σε σχέση με τα υπόγεια, ενώ στο σχήμα 4.16 απεικονίζεται η τυποποιημένη κατασκευή ενός εναέριου δικτύου χαμηλής τάσης με γυμνούς αγωγούς [1, κεφ.2].



Σχήμα 4.16: Κατασκευή εναερίου δικτύου χαμηλής τάσης [29]

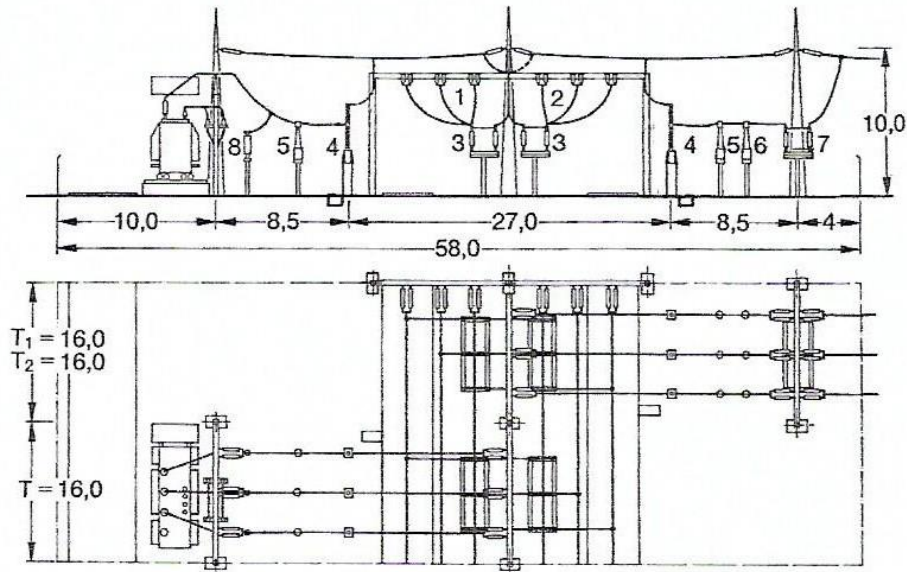
4.1.3 Υποσταθμοί υψηλής τάσης / μέσης τάσης

Οι υποσταθμοί υψηλής/μέσης τάσης είναι μείζονος σημασίας αντικείμενο, αφού είναι αυτοί που τροφοδοτούν τη μέση τάση. Η κατασκευαστική τους διαμόρφωση αλλάζει ανάλογα με τη μεριά που εξετάζεται, δηλαδή εάν είναι η πλευρά της υψηλής ή η πλευρά της μέσης τάσης.

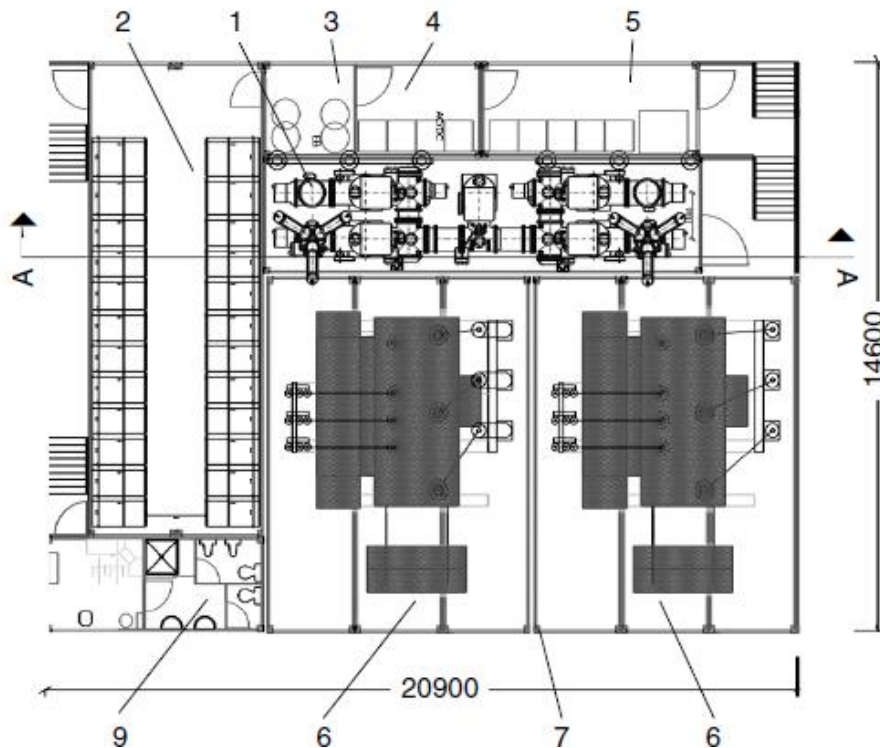


Σχήμα 4.17: Υποσταθμός υψηλής τάσης στη Λάρισα [30]

Από την πλευρά της υψηλής τάσης ο υποσταθμός μπορεί να είναι υπαίθριος, όπως αυτός που απεικονίζεται πραγματικά στο σχήμα 4.17 ή όπως απεικονίζεται σχηματικά στο σχήμα 4.18, ή να βρίσκεται σε κάποιο κλειστό χώρο (σχήμα 4.19). Τα κύρια μέρη του τμήματος της υψηλής τάσης των υποσταθμών είναι η άφιξη της γραμμής υψηλής τάσης, οι ζυγοί υψηλής τάσης και ο μετασχηματιστής.



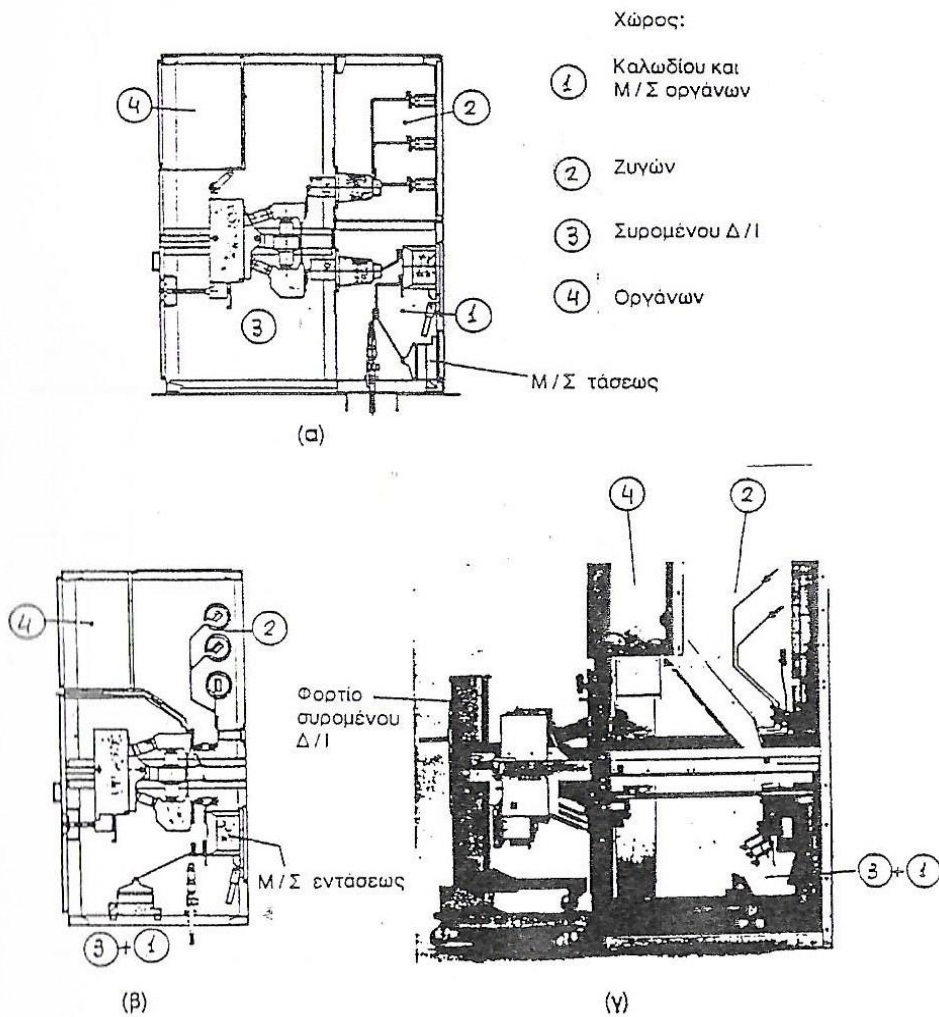
Σχήμα 4.18: Υπαίθριος Υποσταθμός Υψηλής Τάσης. 1-2 Ζυγοί, 3 Αποζεύκτες ζυγών, 4 Διακόπτες ισχύος, 5 Μ/Σ έντασης, 6 Μ/Σ τάσης, 7 Αποζεύκτης γραμμής, 8 Αλεξικέραυνο [1, κεφ.2].



Σχήμα 4.19: Κάτοψη προκατασκευασμένου υποσταθμού υψηλής τάσης κλειστού χώρου με 2 μετασχηματιστές 63 MVA και 5 διακόπτες ισχύος στην πλευρά της υψηλής τάσης [8, κεφ.11].

Οι υποσταθμοί κλειστού χώρου καταλαμβάνουν μικρότερη έκταση από τους υπαίθριους.

Η πλευρά της μέσης τάσης μπορεί να είναι και αυτή είτε σε ανοιχτό, είτε σε κλειστό χώρο. Συνηθίζεται όμως να χρησιμοποιούνται έτοιμες προκατασκευασμένες κυψέλες με τρεις ή τέσσερις χώρους με διακόπτες ισχύος συρόμενου τύπου, ώστε να αποφεύγεται η χρήση αποζευκτών. (σχήμα 4.20).



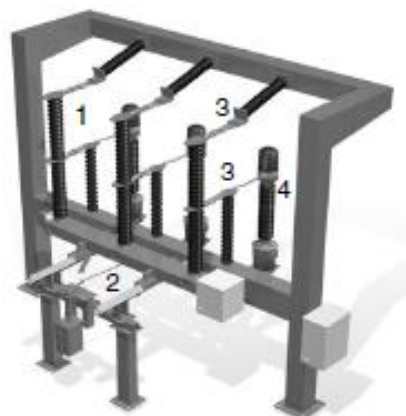
Σχήμα 4.20: Κυψέλη πλευράς μέσης τάσης υποσταθμού υψηλής /μέσης τάσης με συρόμενο διακόπτη ισχύος, (α) με 4 χώρους, (β) με τρεις χώρους, (γ) φωτογραφία του β με το φορτίο αποσυρμένο [1, κεφ.2].

Οι τέσσερις χώροι του σχήματος 4.20 είναι κατά σειρά οι αναχωρήσεις ή οι αφίξεις των καλωδίων, όπου εγκαθίστανται οι μετασχηματιστές τάσης και έντασης, οι ζυγοί, οι διακόπτες ισχύος και τα όργανα μέτρησης και προστασίας.

Στο σχήμα 4.21 απεικονίζεται επίσης μία συμπαγής μονάδα χειρισμού φορτίου με διακόπτη ισχύος υψηλής τάσης μέχρι 170kV. Σε αυτήν, οι λειτουργίες του συμβατικού αποζεύκτη πραγματοποιούνται με ένα διακόπτη ισχύος, ο οποίος αποτελείται από ένα σταθερό μέρος και ένα κινητό και ορατό μέρος που είναι τα μαχαίρια του διακόπτη. Το σταθερό μέρος δε χρειάζεται συντήρηση. Πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης έναντι της επιλογής εγκατάστασης οπτικών μετασχηματιστών ρεύματος,

μετασχηματιστών έντασης και γειώσεων είναι πως καταλαμβάνουν πολύ μικρότερο χώρο, διαθέτουν μικρότερες βάσεις και έχουν μειωμένες απαιτήσεις στην καλωδίωση.

1. Διακόπτης ισχύος με μαχαίρια
2. Ράγες διακόπτη ισχύος
3. Σταθερό τμήμα διακόπτη απομόνωσης
4. Μετασχηματιστής έντασης

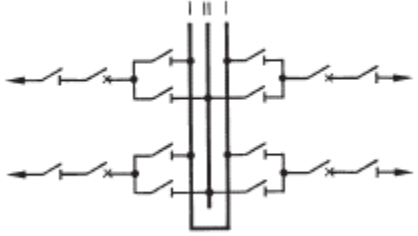
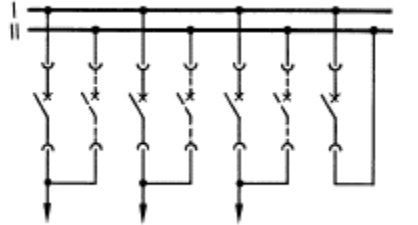
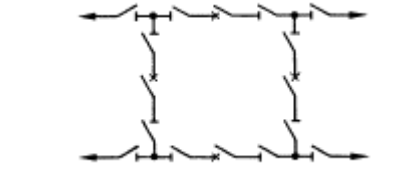


Σχήμα 4.21: Συμπαγής μονάδα φορτίων με διακόπτη ισχύος υψηλής τάσης μέχρι 170kV [8,κεφ.11].

Η αξιοπιστία ενός υποσταθμού υψηλής/μέσης τάσης καθώς και η ευελιξία του κατά την εκμετάλλευσή του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαμόρφωση των ζυγών, υψηλής ή και μέσης τάσης. Στο παρακάτω πίνακα φαίνονται διάφοροι σχηματισμοί ζυγών καθώς και τα βασικά τους χαρακτηριστικά. Όσο πιο πολύπλοκη είναι η διαμόρφωσή τους, τόσο αυξάνει το κόστος τους, αλλά συνάμα αυξάνεται και η πιθανότητα για την εμφάνιση βλάβης [1, κεφ.2], [8, κεφ.11].

Πίνακας 4.1 Ζυγοί υψηλής ή μέσης τάσης υποσταθμών

Σχήμα	Χαρακτηριστικά
	<p><u>Απλοί ζυγοί</u></p> <p>Κατάλληλοι για μικρότερες εγκαταστάσεις. Ένας διαχωριστής επιτρέπει τη διαίρεση του σταθμού σε δύο ξεχωριστά μέρη και την αποσύνδεση των μερών αυτών για λόγους συντήρησης.</p>
	<p><u>Διπλοί ζυγοί</u></p> <p>Κατάλληλοι για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις. Επιτυγχάνεται εύκολος καθαρισμός και συντήρηση χωρίς τη διακοπή της παροχής, λόγω του εφεδρικού ζυγού</p>

	<p><u>Διπλοί ζυγοί σε σύνδεση U</u></p> <p>Χαμηλό κόστος και εξοικονόμηση χώρου για εγκαταστάσεις με διπλούς ζυγούς και στις δύο πλευρές.</p>
	<p><u>Διπλοί ζυγοί με διπλούς διακόπτες</u></p> <p>Χαμηλό κόστος κυρίως για υποσταθμούς μέσης τάσης. Δεν διαθέτουν απομονωτές ζυγών ή απομονωτές τροφοδοσίας.</p>
	<p><u>Ζυγοί σε σχήμα δακτυλίου</u></p> <p>Κάθε κλάδος απαιτεί μόνο ένα διακόπτη ισχύος και έτσι κάθε διακόπτης μπορεί να απομονωθεί χωρίς διακοπή της παροχής ρεύματος στις εξερχόμενες γραμμές.</p>

4.2 Ανάλυση και εκτίμηση ανάπτυξης φορτίου

4.2.1 Γενικά

Σημαντικό παράγοντα για τη βέλτιστη λειτουργία των δικτύων διανομής αποτελεί η σωστή βραχυπρόθεσμη εκτίμηση των μεταβολών φορτίου, ενώ για τη βέλτιστη επιλογή σχεδιασμού και ανάπτυξης των δικτύων αποτελεί η μακροπρόθεσμη εκτίμηση μεταβολών φορτίου. Μερικές βέβαια φορές ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι μεταβολές του φορτίου σε min ή sec, περισσότερο για σωστή ρύθμιση της παροχής τάσης.

Τα είδη των μεταβολών του φορτίου μπορεί να είναι είτε η βασική μακροχρόνια τάση μεταβολής, είτε κυκλικές μεταβολές που αντιστοιχούν σε μεταβολές χρονικών περιόδων ή ανθρώπινης δραστηριότητας, είτε τυχαίες μεταβολές που δεν μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα.

Οι μεταβολές αυτές απασχολούν σε συγκεκριμένα σημεία των δικτύων διανομής. Τέτοια είναι οι παροχές, δηλαδή τα σημεία σύνδεσης των δικτύων με τους καταναλωτές, οι υποσταθμοί μέσης/χαμηλής τάσης, οι υποσταθμοί υψηλής/μέσης τάσης, οι αρχές των διακλαδώσεων κ.α.

Η μελέτη των φορτίων πραγματοποιείται πιο εύκολα με τη βοήθεια καμπυλών. Για παράδειγμα η 'ημερήσια καμπύλη φορτίου' δείχνει την ημερήσια μεταβολή φορτίου, ενώ η 'αθροιστική καμπύλη φορτίου' δείχνει το άθροισμα των φορτίων των τροφοδοτούμενων καταναλωτών.

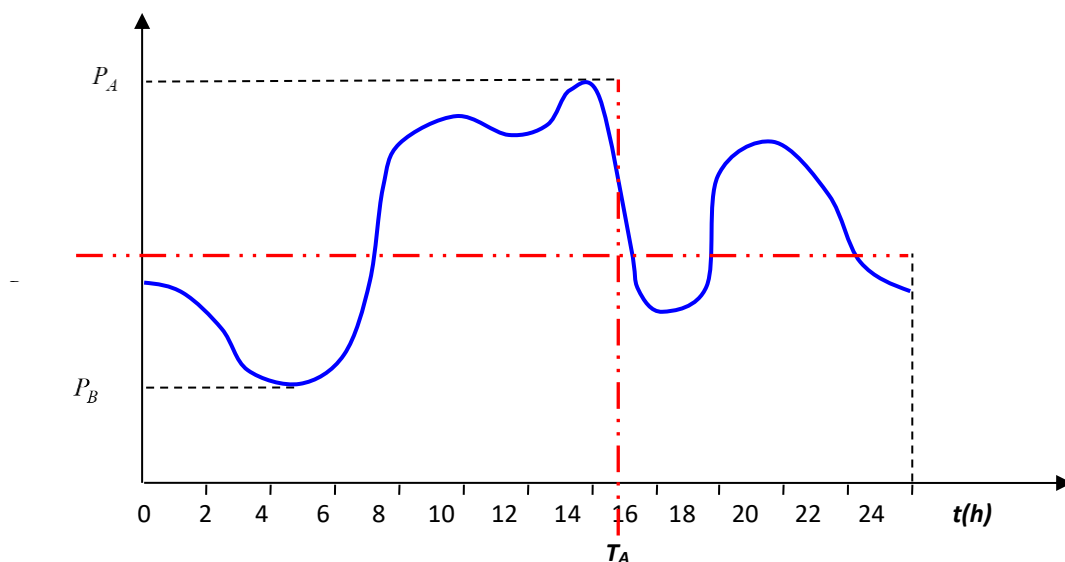
Παλαιότερα το ζήτημα της πρόβλεψης των φορτίων έβρισκε λύση με διορθωτικούς συντελεστές, πράγμα που σήμερα γίνεται ευκολότερα και με μεγαλύτερη επιτυχία εξαιτίας της εξέλιξης της τεχνολογίας και των συστημάτων μετρήσεων.

Η ανάλυση και η πρόβλεψη των φορτίων διαφέρει ανάλογα με το τι δίκτυο μελετάται κάθε φορά. Στα δίκτυα χαμηλής τάσης ενδιαφέρει η ανάλυση των φορτίων ανά καταναλωτή ή ομάδα καταναλωτών, ενώ στα δίκτυα μέσης τάσης ξεκινά από τους υποσταθμούς μέσης/χαμηλής τάσης με κύριο αντικείμενο την αναχώρηση μέσης τάσης από τον υποσταθμό υψηλής/μέσης τάσης [1, κεφ.3].

4.2.2 Καμπύλες φορτίου

Όπως προαναφέρθηκε οι καμπύλες φορτίου είναι σημαντικές για τη μελέτη και την πρόβλεψη της ενέργειας που καταναλώνεται. Οι πιο συνηθισμένες καμπύλες φορτίου είναι οι χρονολογικές καμπύλες φορτίου και οι καμπύλες διάρκειας φορτίου.

Χρονολογική καμπύλη φορτίου είναι η γραφική παράσταση της ζητούμενης ισχύος σε συνάρτηση με το χρόνο στον οποίο ζητήθηκε η αντίστοιχη ισχύς (σχήμα 4.22). Πιο συγκεκριμένα έχει ως τεταγμένες την ισχύ, δηλαδή τα φορτία σε kW, MW κ.τ.λ., και ως τετμημένες το χρόνο σε ώρες ή μέρες κ.τ.λ.



Σχήμα 4.22: Εικοσιτετράωρη χρονολογική καμπύλη φορτίου

Η περίοδος μελέτης κάθε καμπύλης συμβολίζεται με T και μπορεί να αναφέρεται είτε σε ώρες είτε σε μέρες, είτε σε εβδομάδες, είτε σε έτη.

Χρήσιμοι ορισμοί για τη μελέτη και αποκωδικοποίηση αυτών των καμπυλών αποτελούν τα παρακάτω χαρακτηριστικά μεγέθη:

- *Μέγιστο φορτίο P_A ή Αιχμή:* Πρόκειται για το μεγαλύτερο φορτίο που παρατηρείται κατά την περίοδο μελέτης T στη χρονολογική καμπύλη φορτίου.
- *Ελάχιστο φορτίο P_B ή φορτίο βάσης:* Πρόκειται για το μικρότερο φορτίο που παρατηρείται κατά την περίοδο μελέτης T στη χρονολογική καμπύλη φορτίου.
- *Κατανάλωση ενέργειας E :* Είναι η καταναλισκόμενη ενέργεια κατά την περίοδο μελέτης T , δηλαδή το εμβαδόν που περικλείεται από τη χρονολογική καμπύλη φορτίου.

$$E = \int_0^T P(t) \cdot dt \quad (4.1)$$

- *Μέσο φορτίο P_μ* : Πρόκειται για το ηλίκο της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά την περίοδο μελέτης T προς το αντίστοιχο χρονικό διάστημα T .

$$P_\mu = \frac{E}{T} \quad (4.2)$$

- *Ιδεατή διάρκεια αιχμής T_A* : Είναι ο χρόνος που χρειάζεται ο καταναλωτής να λειτουργεί με ζήτηση ίση με την αιχμή P_A για να δώσει την καταναλισκόμενη ενέργεια κατά την περίοδο μελέτης T .

$$T_A = \frac{E}{P_A} \quad (4.3)$$

- *Συντελεστής ελάχιστου φορτίου ή συντελεστής ομοιομορφίας m_0* : Είναι το ηλίκο του φορτίου βάσης προς το φορτίο αιχμής, συνήθως εκφρασμένο επί τοις εκατό.

$$m_0 = \frac{P_B}{P_A} \quad (4.4)$$

- *Συντελεστής φορτίου m* : Είναι το ηλίκο του μέσου φορτίου προς το φορτίο αιχμής, συνήθως εκφρασμένο επί τοις εκατό.

$$m = \frac{P_\mu}{P_A} \quad (4.5)$$

- *Συντελεστής ζήτησης ζ* : Είναι ο λόγος της μέγιστης ζήτησης ενός συστήματος καταναλωτή προς το συνολικά συνδεδεμένο φορτίο του συστήματος.

$$\zeta = \frac{P_A}{P_{εγκ.}} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

- *Συντελεστής ετεροχρονισμού ε* : Είναι ο λόγος του αθροίσματος των αιχμών διαφόρων φορτίων P_{A-i} πλήθους N , προς τη συνολική αιχμή του συστήματος P_{A-tot} .

$$\varepsilon = \frac{P_{A-1} + P_{A-2} + \dots + P_{A-N}}{P_{A-tot}} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{A-i}}{P_{A-tot}} > 1 \quad (4.7)$$

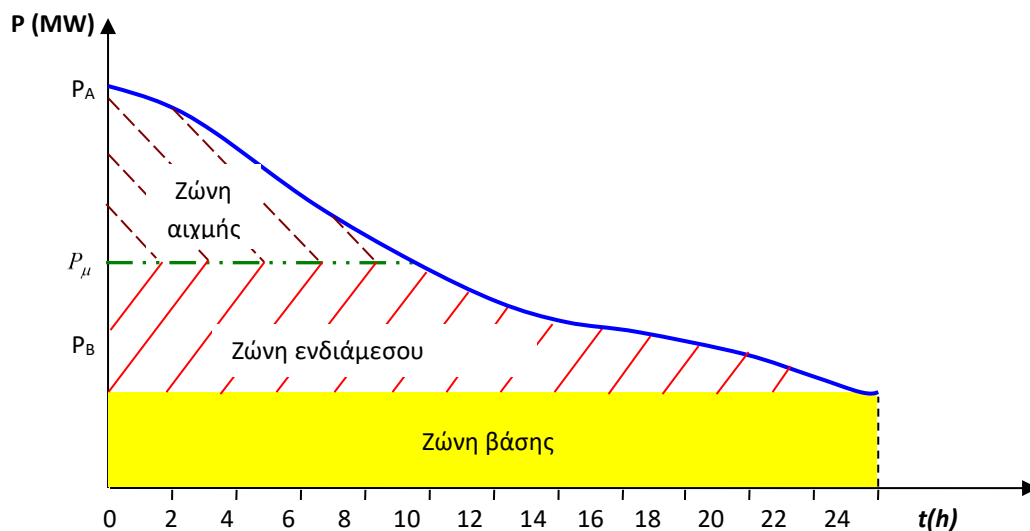
- *Συντελεστής ταυτοχρονισμού σ* : Είναι ο λόγος της συνολικής αιχμής του συστήματος P_{A-tot} προς το άθροισμα των αιχμών διαφόρων φορτίων P_{A-i} πλήθους N . Είναι ο αντίστροφος λόγος του συντελεστή ετεροχρονισμού.

$$\sigma = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{P_{A-tot}}{P_{A-1} + P_{A-2} + \dots + P_{A-N}} = \frac{P_{A-tot}}{\sum_{i=1}^N P_{A-i}} < 1 \quad (4.8)$$

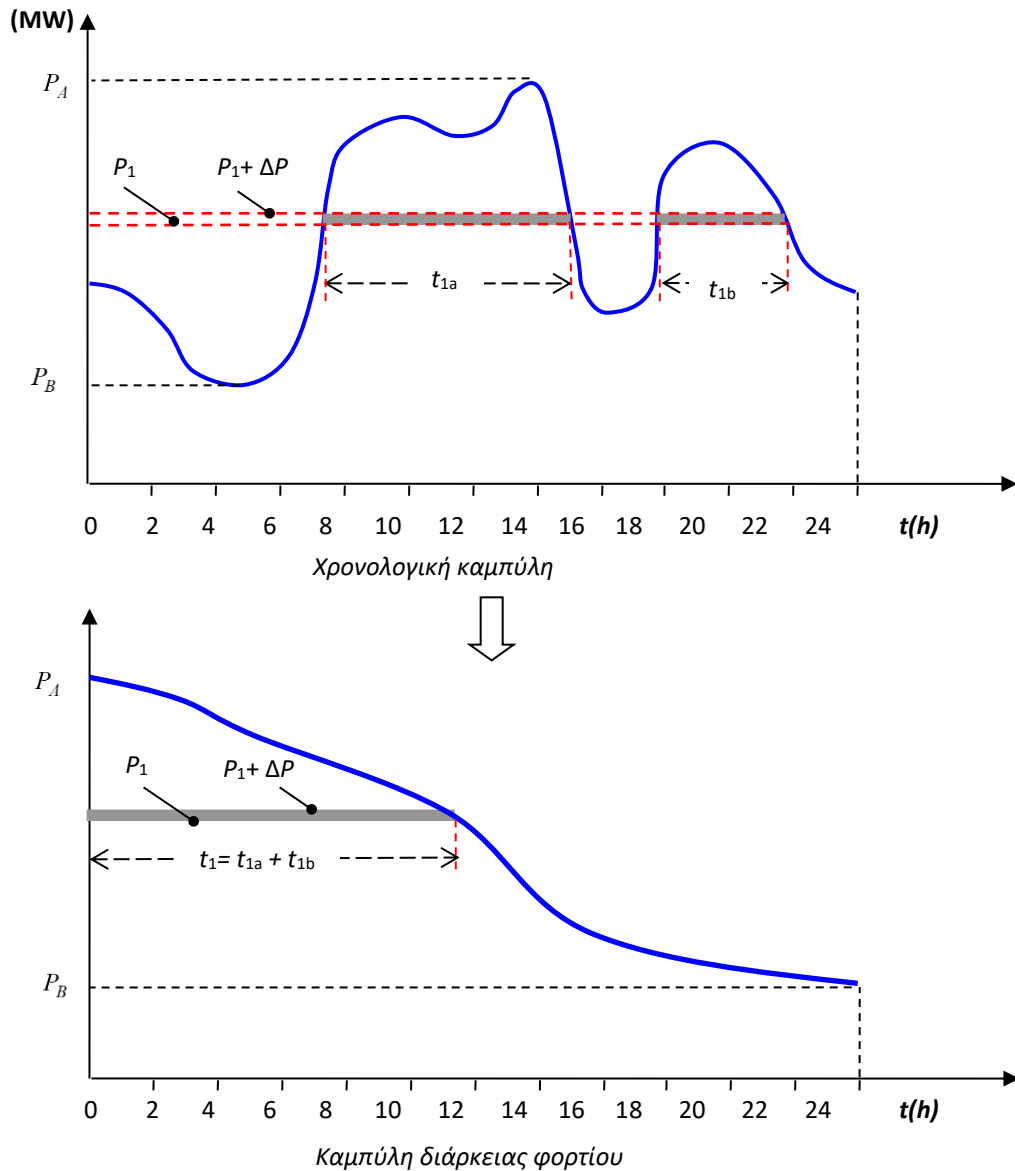
- *Συντελεστής μέγιστης χρησιμοποίησης u* : Είναι το ηλίκο της μέγιστης παραγόμενης ισχύος προς την εγκατεστημένη ισχύ.

$$u = \frac{P_A}{P_{εγκ}} \quad (4.9)$$

Η καμπύλη διάρκειας φορτίου είναι η γραφική παράσταση της ζητούμενης ισχύος κατά τη χρονική περίοδο μελέτης σε συνάρτηση με το χρόνο, διατεταγμένη σε φθίνουσα σειρά. Προκύπτει από την αντίστοιχη χρονολογική καμπύλη φορτίου προσδιορίζοντας για κάθε στοιχειώδες διάστημα ισχύος P_1 ως $P_1 + \Delta P$ πόσο χρόνο t_1 διαρκεί κατά το διάστημα της περιόδου μελέτης, ξεκινώντας από το φορτίο αιχμής και καταλήγοντας πάντα στο φορτίο βάσης, το οποίο επίσης πάντα αντιστοιχεί στο σύνολο της περιόδου μελέτης T . Ο τρόπος με τον οποίο προκύπτει φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 4.24, ενώ στο σχήμα 4.23 διακρίνεται ο διαχωρισμός της καμπύλης διάρκειας φορτίου στις αντίστοιχες ζώνες φορτίου [27,κεφ.1].



Σχήμα 4.23: Εικοσιτετράωρη καμπύλη φορτίου με διαχωρισμό ζωνών φορτίου [27,κεφ.1].



Σχήμα 4.24: Καμπύλη διάρκειας φορτίου από τη χρονολογική καμπύλη φορτίου[27,κεφ.1].

4.2.3 Εκτίμηση φόρτισης δικτύων χαμηλής τάσης

Η εκτίμηση της φόρτισης των δικτύων χαμηλής τάσης ταυτίζεται με την εκτίμηση της συμπεριφοράς του φορτίου των καταναλωτών χαμηλής τάσης, οι οποίοι στην πλειοψηφία τους είναι μονοφασικοί. Η εκτίμηση του φορτίου των καταναλωτών μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- 1) Με βάση τους συντελεστές ετεροχρονισμού
Η πρώτη μέθοδος αφορά κυρίως κατοικίες, δηλαδή οικιακά φορτία και στηρίζεται στον παρακάτω τύπο:

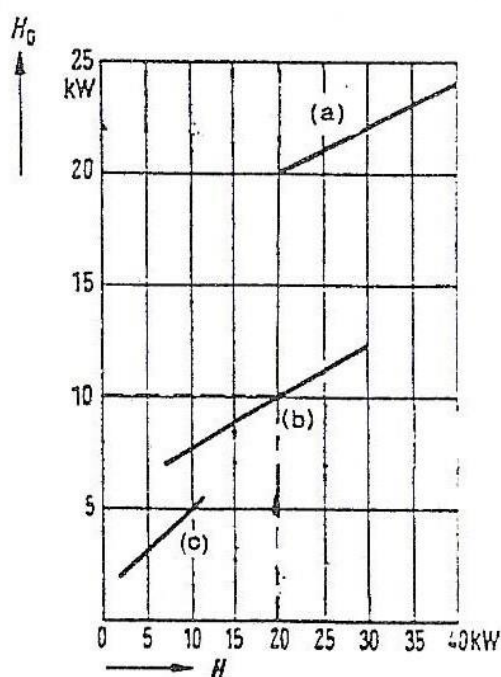
$$P_N = P_0 \cdot N \cdot \sigma \quad (4.10)$$

Όπου στον παραπάνω τύπο P_0 είναι η μέγιστη απορροφούμενη ισχύς κάθε κατοικίας, N είναι το πλήθος των όμοιων κατοικιών και σ ο συντελεστής ταυτοχρονισμού. Αυτός μπορεί να προκύπτει και από πίνακες ανάλογα με το πλήθος των κατοικιών.

Η δεύτερη μέθοδος, που χρησιμοποιείται και αυτή για κατοικίες στηρίζεται στην εξής σχέση:

$$P_W = H_0 \cdot \sigma_\infty + (1 - \sigma_\infty) \cdot \frac{H_0}{\sqrt{W}} \quad (4.11)$$

Όπου P_W η συμμετοχή μιας κατοικίας στο μέγιστο, H_0 η μέγιστη ισχύς κάθε κατοικίας, W το πλήθος των κατοικιών και σ_∞ ο συντελεστής ταυτοχρονισμού για μεγάλο πλήθος κατοικιών (συνήθως πάνω από 1000). Το μέγιστο φορτίο κάθε κατοικίας H_0 λαμβάνεται από διάγραμμα με βάση το εγκατεστημένο φορτίο H , όπως αυτό του σχήματος 4.25 και εξαρτάται από το βαθμό ηλεκτρισμού μιας κατοικίας, δηλαδή εάν είναι πλήρως ηλεκτρισμένη με ταχυθερμοσίφωνα, εάν είναι πλήρως ηλεκτρισμένη με τον συνηθισμένο θερμοσίφωνα ή εάν διαθέτει μόνο φωτισμό και μικρές ηλεκτρικές συσκευές.



- P_W = συμμετοχή μίας κατοικίας στο μέγιστο
- W = αριθμός κατοικιών
- H_0 = μέγιστη ισχύς κάθε κατοικίας
- H = εγκατεστημένη ισχύς ανά κατοικία
- (a) = πλήρως εξηλεκτρισμένη κατοικία με ταχυθερμοσίφωνα
- (b) = με συνηθη θερμοσίφωνα
- (c) = με φωτισμό και μικροσυσκευές

Σχήμα 4.25: Μέγιστο φορτίο σε σχέση με το εγκατεστημένο φορτίο μιας κατοικίας [1, κεφ.3].

Η τρίτη μέθοδος που αφορά κατοικίες δεν είναι ιδιαίτερα συνηθισμένη στην Ελλάδα, καθώς στηρίζεται στη συμμετοχή του μεγίστου των επί μέρους φορτίων κάθε κατοικίας, δηλαδή για κάθε συσκευή ξεχωριστά.

Για τις υπόλοιπες κατηγορίες καταναλωτών ισχύουν τα εξής:

- Εμπορικά καταστήματα απορροφούν μέγιστη ισχύ από 50 έως 100W/m², ενώ για το συντελεστή ταυτοχρονισμού τους λαμβάνεται υπόψη το ωράριο λειτουργίας των καταστημάτων αυτών.

- Για βιοτεχνίες ή φοιτητικές σχολές ή άλλες τέτοιες μεγάλες εγκαταστάσεις υπάρχει ‘συμφωνημένη’ μέγιστη ισχύς με βάση την οποία κατασκευάζεται και η παροχή από την Ηλεκτρική εταιρία.

Όσον αφορά τη μελέτη φορτίων πόλεων ή πυκνοκατοικημένων αστικών περιοχών ακολουθείται συνήθως ανάλυση με βάση την πυκνότητα φορτίου. Έτσι για μία περιοχή επιφάνειας S , με λ_0 το ποσοστό οδών και πλατειών, λ_k ο συντελεστής κάλυψης, και ν ο αριθμός των ορόφων, τότε η συνολικά κατοικούμενη επιφάνεια S_k δίνεται από τη σχέση:

$$S_k = (1 - \lambda_0) \cdot \lambda_k \cdot (\nu + 1) \cdot S \quad (4.12)$$

Ακόμη εάν S_δ η επιφάνεια ενός μέσου διαμερίσματος, P_δ η μέγιστη απορροφούμενη ισχύς του διαμερίσματος και P η ταυτοχρονισμένη ισχύς της περιοχής, τότε το πλήθος των καταναλωτών N δίνεται από τη σχέση :

$$N = \frac{S_k}{S_\delta} = (1 - \lambda_0) \cdot \lambda_k \cdot (\nu + 1) \cdot \frac{S}{S_\delta} \quad (4.13)$$

Εάν σ_N ο συντελεστής ετεροχρονισμού της πόλης, τότε η πυκνότητα φορτίου p της πόλης βρίσκεται ως εξής:

$$p = \frac{P}{S} = \frac{\sigma_N \cdot P_\delta \cdot N}{S} = \frac{\sigma_N \cdot P_\delta}{S_\delta} (1 + \lambda_0) \cdot \lambda_k \cdot (\nu + 1) \quad (4.14)$$

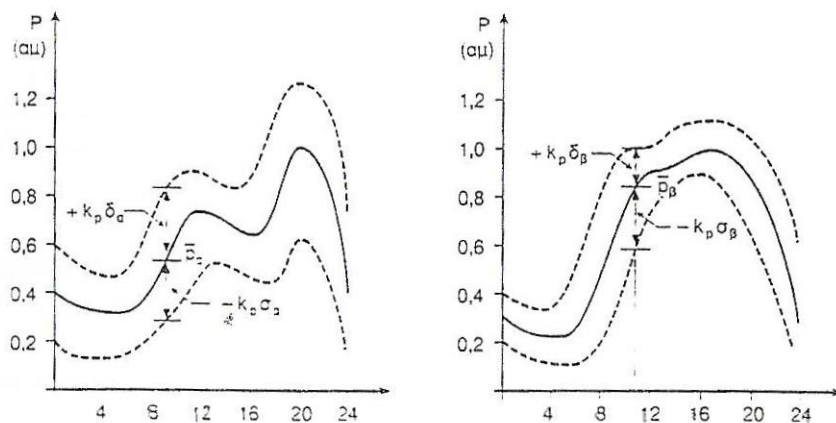
2) Με βάση στατιστικά στοιχεία.

Πυρήνα της ανάλυσης και εκτίμησης του φορτίου με βάση τα στατιστικά στοιχεία αποτελεί το γεγονός πως η καμπύλη φορτίου των καταναλωτών της ίδιας κατηγορίας παρουσιάζει μία σχετική σταθερότητα για μία συγκεκριμένη εποχή ή μέρα. Σημαντικός είναι ακόμη ο συσχετισμός της ζήτησης, μιας συγκεκριμένης κατηγορίας καταναλωτών σε μία ορισμένη εποχή, με την ενέργεια που καταναλώθηκε το αντίστοιχο χρονικό διάστημα. Οι μέθοδοι που έχουν επικρατήσει με βάση τα στατιστικά στοιχεία είναι οι εξής:

- Μέθοδοι ανάλυσης καμπυλών φορτίου, όπου υπάρχει συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση των καταναλωτών ανάλογα με τη χρήση και το μέγεθος της ετήσιας απορροφούμενης ενέργειας, με κάθε κατηγορία να αποτελείται από αντιπροσωπευτικό δείγμα πληθυσμού, που για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα γίνεται λεπτομερής καταγραφή της απορροφούμενης ισχύος. Έπειτα τα στοιχεία εισάγονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που με τη θεώρηση της κανονικής κατανομής προκύπτουν οι ημερήσιες καμπύλες φορτίου (σχήμα 4.26) και υπολογίζονται η μέση τιμή \bar{p} και η τυπική απόκλιση σ_p . Έτσι υπολογίζεται η ισχύς ζήτησης ως εξής:

$$p = \bar{p} + k_p \cdot \sigma_p \quad (4.14)$$

Όπου k_p ο συντελεστής τυπικής απόκλισης.



Σχήμα 4.26: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου για 2 κατηγορίες καταναλωτών.

- Μέθοδοι συσχέτισμού με την ενέργεια. Βασίζεται στα ακριβή στοιχεία και μετρήσεις των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού που αφορούν τις καταναλώσεις ισχύος των καταναλωτών και τα συσχετίζει με τη μέγιστη ζήτηση των καταναλωτών αυτών. Μία αναλυτική έκφραση που αποδεικνύει τη σχέση μεταξύ καταναλισκόμενης ενέργειας και ζήτησης φορτίου είναι ο τύπος του Velandar:

$$\bar{P}_m = \kappa_1 \cdot E + \kappa_2 \cdot \sqrt{E} \quad (4.15)$$

Όπου E η καταναλωθείσα ενέργεια, \bar{P}_m η μέση τιμή μέγιστης ισχύος, και κ_1, κ_2 συντελεστές στους οποίους μπορούν να αποδοθούν ορισμένες τιμές ανάλογα με την κατηγορία των καταναλωτών.

- Με σύνθεση φορτίων. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση που τροφοδοτούνται περισσότερες κατηγορίες καταναλωτών που είναι και το συνηθέστερο. Το συνολικό φορτίο προκύπτει με στατιστική άθροιση των επιμέρους φορτίων. Έτσι η μέση τιμή \bar{P}_t σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ισούται με το άθροισμα των επιμέρους φορτίων \bar{P}_i ως εξής:

$$\bar{P}_t = \sum_i \bar{P}_i \quad (4.16)$$

Η τυπική απόκλιση του συνολικού φορτίου σ_t εξαρτάται από το βαθμό συσχέτισης μεταξύ των φορτίων. Εάν δεν υπάρχει συσχέτιση, τότε ισχύει ότι [1, κεφ.3]:

$$\sigma_t^2 = \sum \sigma_i^2 \quad (4.17)$$

4.2.4 Εκτίμηση φόρτισης δικτύων μέσης τάσης

Η εκτίμηση της φόρτισης των δικτύων μέσης τάσης γίνεται κατ' αντιστοιχία των δικτύων χαμηλής τάσης, με καμπύλες φορτίου που όμως εδώ αναφέρονται στους υποσταθμούς μέσης/χαμηλής τάσης και όχι στους καταναλωτές. Αυτές οι καμπύλες μπορεί να προκύπτουν και από τις καμπύλες των καταναλωτών τους οποίους τροφοδοτούν, όμως συνηθέστερα προκύπτουν από τα συστήματα μετρήσεων που είναι εγκατεστημένα για τις χρεώσεις της παρεχόμενης ισχύος. Μία πρόχειρη προσέγγιση αποτελεί το μοίρασμα της συνολικής ονομαστικής ισχύος των υποσταθμών, η οποία πολλές φορές είναι και η μόνη γνωστή πληροφορία, ανάλογα με τις γραμμές μέσης τάσης που τροφοδοτούν. Μία όμως πιο συγκεκριμένη λύση στο ζήτημα της φόρτισης των γραμμών μέσης τάσης δίνει η παρακάτω μέθοδος. Με δεδομένο ότι \bar{P}_i είναι η μέγιστη ισχύς στην αρχή της γραμμής, $a_i(t)$ ο λόγος του φορτίου του υποσταθμού μέσης/χαμηλής τάσης σε χρόνο t προς το μέγιστο φορτίο του υποσταθμού αυτού, τότε η εκτίμηση της μέσης φόρτισης της γραμμής για N υποσταθμούς είναι:

$$\bar{P}(t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) \cdot \bar{P}_i \quad (4.18)$$

Στην πραγματικότητα όμως ούτε ο λόγος $a_i(t)$, ούτε η ισχύς \bar{P}_i , είναι γνωστά οπότε χρησιμοποιείται άλλη σχέση, η οποία είναι βασισμένη σε διαφορετικές πληροφορίες που διατίθενται και είναι η εξής:

$$\bar{P}(t) = \sum_{i=1}^{n_\Delta} a_i^{\Delta}(t) \cdot \bar{P}_i^{\Delta} + \sum_{i=1}^{n_N} a_i^N(t) \cdot \bar{P}_i^N + \sum_{i=1}^{n_I} a_i^I(t) \cdot \bar{P}_i^I \quad (4.19)$$

Όπου:

- n : το πλήθος των υποσταθμών μέσης/χαμηλής τάσης
- Δ : χαρακτηρισμός για τους δημόσιους υποσταθμούς μέσης/χαμηλής τάσης οι οποίοι τροφοδοτούν τους καταναλωτές χαμηλής τάσης. Συνήθως για αυτούς είναι γνωστά τα $a_i^{\Delta}(t)$ και \bar{P}_i^{Δ} .
- N : χαρακτηρισμός για τους δημόσιους υποσταθμούς μέσης/χαμηλής τάσης για τους οποίους δεν υπάρχει επαρκής πληροφόρηση και το μέγεθος \bar{P}_i^N λαμβάνεται ίσο με την ονομαστική ισχύ του μετασχηματιστή ή ένα ποσοστό αυτής.
- I : χαρακτηρισμός για τους ιδιωτικούς υποσταθμούς, για τους οποίους επίσης υπάρχει επαρκής πληροφόρηση.

Η σχέση 4.19 για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και αντικαθιστώντας τους λόγους $a_i(t)$ με τους αντίστοιχους συντελεστές κ_i προκύπτει η παρακάτω απλοποιημένη σχέση [1, κεφ.3]:

$$\bar{P}(t) = \kappa_1 \sum_{i=1}^{n_\Delta} \bar{P}_i^{\Delta} + \kappa_2 \sum_{i=1}^{n_N} \bar{P}_i^N + \kappa_3 \sum_{i=1}^{n_I} \bar{P}_i^I \quad (4.20)$$

4.3 Ποιότητα εξυπηρέτησης

4.3.1 Γενικά

Η μεγάλη εξάρτηση της ανθρώπινης και της παραγωγικής δραστηριότητας από την ηλεκτρική ενέργεια απαιτεί τόσο τη συνεχόμενη παροχή ενέργειας στους καταναλωτές όσο και τη σταθερότητα αυτής σε τάση και συχνότητα δεδομένου ότι γίνεται εκτεταμένη χρήση και ευαίσθητων συσκευών. Γι' αυτό δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην 'ποιότητα εξυπηρέτησης' που αποτελείται από την αξιοπιστία, δηλαδή τη μη διακοπή της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, τη σταθερότητα της τάσης τροφοδότησης, την καθαρότητα του κύματος της τάσης τροφοδότησης και τη σταθερότητα της συχνότητας. Από τα παραπάνω το μόνο που δεν εξαρτάται από τα δίκτυα διανομής είναι η σταθερότητα της συχνότητας [1, κεφ.4].

4.3.2 Αξιοπιστία

Η ανάλυση της αξιοπιστίας του συστήματος γίνεται με σκοπό την ελαχιστοποίηση των βλαβών κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και όχι για την πλήρη εξασφάλιση της συνέχειας τροφοδότησης, διότι αυτό είναι σχεδόν ανέφικτο. Πιο συγκεκριμένα η αξιοπιστία είναι η πιθανότητα το σύστημα να ικανοποιεί το σκοπό του επαρκώς για τη σχεδιαζόμενη χρονική περίοδο και τις επικρατούσες λειτουργικές συνθήκες.

Η ζημιά που προκαλείται από πιθανή διακοπή της τροφοδότησης είναι διαφορετική για κάθε κατηγορία καταναλωτών, αλλά και για το χρονικό διάστημα στο οποίο συμβαίνει η διακοπή. Ωστόσο, σε αστικές περιοχές ή σε περιπτώσεις που η διακοπή της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να θέσει σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές, υπάρχει νομική υποχρέωση για την εξασφάλιση της τροφοδότησης από εφεδρικές πηγές που διαθέτουν οι ίδιοι οι καταναλωτές.

Υπάρχουν αρκετοί δείκτες αξιοπιστίας που βασίζονται κυρίως στη θεωρία των πιθανοτήτων, και όσο πιο αληθείς είναι οι παραδοχές πάνω στις οποίες στηρίζονται, τόσο πιο ακριβή είναι και τα μοντέλα που προσομοιάζουν τη λειτουργία των αντίστοιχων συστημάτων. Στον ορισμό της αξιοπιστίας περιλαμβάνονται και έννοιες, όπως η επάρκεια λειτουργίας, η χρονική περίοδος και οι λειτουργικές συνθήκες οι οποίες απασχολούν τους μηχανικούς των συστημάτων ενέργειας και γι' αυτό υπάρχουν συγκεκριμένες μέθοδοι χαρακτηρισμού, ποσοτικής έκφρασης και υπολογισμού της αξιοπιστίας των δικτύων διανομής που αναλύονται παρακάτω.

Για μια ολοκληρωμένη μελέτη σύνθετων συστημάτων παραγωγής ενέργειας είναι χρήσιμη η διαίρεσή τους σε επιμέρους στοιχεία, τη μαθηματική μοντελοποίηση κάθε ενός από αυτά, την αναγνώριση των διαδικασιών βλάβης και καταστάσεων εκτός λειτουργίας, την αναγνώριση έπειτα των καταστάσεων επιτυχούς λειτουργίας και υπολογισμός τελικά των κατάλληλων δεικτών αξιοπιστίας, βάση τα οποία εξάγονται τελικά συμπεράσματα για ολόκληρο το σύστημα.

Τα μεγέθη χαρακτηρισμού αξιοπιστίας που χαρακτηρίζουν κάθε στοιχείο ή τμήμα του δικτύου είναι ξεχωριστά:

- Η συχνότητα λ ή ρυθμός βλαβών. Εκφράζει το μέσο αριθμό βλαβών που παρουσιάζει ένα στοιχείο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.

- Ο χρόνος επισκευής r ή διάρκεια διακοπής της τροφοδότησης. Εκφράζει το μέσο χρόνο που απαιτείται για την επισκευή του στοιχείου μετά από βλάβη που έχει υποστεί κατά τη λειτουργία του.
- Ο χρόνος μη διαθεσιμότητας U . Είναι το γινόμενο του χρόνου κατά τον οποίο ένα στοιχείο είναι εκτός λειτουργίας λόγω βλάβης επί τον ρυθμό τον οποίο παρουσιάζει το ίδιο στοιχείο πιθανή βλάβη. Δίνεται από τον τύπο:

$$U = \lambda \cdot r \quad (4.21)$$

Κατά τον υπολογισμό της αξιοπιστίας του συστήματος γίνεται η παραδοχή πως η βλάβη ενός στοιχείου δεν επηρεάζει τη λειτουργία των υπολοίπων. Κάθε τμήμα δικτύου μπορεί να αποτελείται από στοιχεία τα οποία είναι συνδεδεμένα είτε σε σειρά, είτε παράλληλα.

Έτσι για την εύρεση της μέσης συχνότητας βλάβης για το τμήμα του δικτύου λ_S που αποτελείται από n στοιχεία σε σειρά χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4.22)$$

Ενώ ο χρόνος μη διαθεσιμότητας του τμήματος του δικτύου αυτού δίνεται από τη σχέση:

$$U_S = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot r_i \quad (4.23)$$

Με την αντικατάσταση των δύο παραπάνω σχέσεων στην 4.21 προκύπτει ο μέσος χρόνος επισκευής του δικτύου ως εξής:

$$r_S = \frac{U_S}{\lambda_S} \quad (4.24)$$

Στην περίπτωση που τα στοιχεία του δικτύου είναι συνδεδεμένα παράλληλα οι σχέσεις υπολογισμού των δεικτών αξιοπιστίας του δικτύου διαφοροποιούνται. Η μέση συχνότητα βλαβών λ_p για δύο στοιχεία παράλληλα δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_p = \lambda_1 \cdot U_2 + \lambda_2 \cdot U_1 \quad (4.25)$$

Όπου λ_1, λ_2 οι συχνότητες και U_1, U_2 οι ετήσιοι χρόνοι μη διαθεσιμότητας των στοιχείων 1 και 2 αντίστοιχα. Με δεδομένο ότι $U_1 = \lambda_1 \cdot r_1$ και $U_2 = \lambda_2 \cdot r_2$ η 4.25 γίνεται:

$$\lambda_p = \lambda_1 \cdot \lambda_2 + (r_1 + r_2) \quad (4.26)$$

Ο μέσος χρόνος επισκευής του δικτύου είναι:

$$r_p = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \quad (4.27)$$

Ενώ ο χρόνος μη διαθεσιμότητας του τμήματος του δικτύου αυτού είναι:

$$U_p = \lambda_p \cdot r_p = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot r_1 \cdot r_2 = U_1 \cdot U_2 \quad (4.28)$$

Στην ειδική περίπτωση που τα στοιχεία είναι όμοια, δηλαδή $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$, $U = U_1 = U_2$ και $r = r_1 = r_2$ οι σχέσεις 4.26, 4.27 και 4.28 γίνονται:

$$\lambda_p = 2 \cdot \lambda \cdot U \quad (4.29)$$

$$r_p = \frac{r}{2} \quad (4.30)$$

$$U_p = U^2 \quad (4.31)$$

Ο πιο χαρακτηριστικός δείκτης αξιοπιστίας της τροφοδότησης ενός σύνθετου δικτύου ονομάζεται Μη Διανεμούμενη Ενέργεια (ΜΕΔ) και πρόκειται για την ενέργεια που δε μοιράστηκε στους καταναλωτές λόγω διακοπής τροφοδότησης από βλάβη. Υπολογίζεται ως εξής:

$$ΜΕΔ = \sum_{i=1}^n U_i \cdot P_i \quad (4.32)$$

Όπου P_i η μέση εκτιμώμενη ισχύς του καταναλωτή i καθ' όλο το διάστημα της διακοπής.

Ένας άλλος δείκτης αξιοπιστίας είναι η μέση Συχνότητα Διακοπών (ΣΔ) των καταναλωτών, ο οποίο δίνεται από τη σχέση 4.33 και αποτελεί το πηλίκο του συνολικού αριθμού διακοπών των καταναλωτών του δικτύου προς το συνολικό αριθμό των καταναλωτών:

$$\Sigma\Delta = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4.33)$$

Οι παραπάνω δείκτες δίνουν μία ποσοτικοποιημένη εικόνα για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, με σκοπό τη σύγκρισή της με προηγούμενες περιόδους και τη διεξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων σχετικά με την ενδεχόμενη βελτίωση της ποιότητας εξυπηρέτησης, αλλά και τη σύγκριση μεταξύ ίδιων περιόδων αλλά διαφορετικών περιοχών.

Το κόστος της μη διανομούμενης ενέργειας δηλαδή την μη διανομούμενης kWh είναι πιο μεγάλο από το κόστος της απλής kWh, δεδομένου ότι σε αυτήν συμπεριλαμβάνονται οι ζημιές που έχουν προκληθεί στους καταναλωτές. Η σχέση που καλύπτει πλήρως το κόστος της μη διανεμούμενης kWh είναι η εξής:

$$C = (a + b \cdot t + c \cdot t^2) \cdot P \quad (4.34)$$

Όπου τα a, b, c είναι συντελεστές ανάλογα με το είδος του φορτίου, P είναι η διακοπτόμενη ισχύς και t ο χρόνος διακοπής. Επομένως οι όροι $a \cdot P$, $b \cdot P \cdot t$, και $c \cdot P \cdot t^2$ εκφράζουν τις ζημιές από διακοπές μικρής διάρκειας, μέσης διάρκειας και μακροχρόνιες αντίστοιχα [1, κεφ.4], [27, κεφ.3].

4.3.3 Σταθερότητα τάσης τροφοδότησης

Στην πραγματικότητα η τάση τροφοδοσίας των καταναλωτών δεν μπορεί να παραμένει συνεχώς σταθερή. Υπάρχουν μεταβολές και αποκλίσεις από αυτήν που διακρίνονται σε αργές μεταβολές και σε απότομες μεταβολές. Οι τελευταίες χωρίζονται επίσης σε περιοδικές, που οφείλονται στο περιοδικά μεταβαλλόμενο φορτίο συγκεκριμένων μηχανημάτων και σε απεριοδικές που οφείλονται στις μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας ορισμένων συσκευών.

Δεδομένου της ύπαρξης διακυμάνσεων της τάσης τροφοδοσίας, οι διάφορες ηλεκτρικές συσκευές είναι κατασκευασμένες, έτσι ώστε να μην λειτουργούν μόνο με την ονομαστική τάση, αλλά να υπάρχει κάποιο εύρος τιμών εντός των οποίων εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία της εκάστοτε συσκευής.

Ως τάση τροφοδότησης λαμβάνεται η μετρούμενη τάση στο σημείο σύνδεσης του καταναλωτή στο δίκτυο. Τα ανεκτά όρια του ΔΕΔΔΗΕ περί διακύμανσης τάσης στα δίκτυα χαμηλής τάσης όπου η ονομαστική τάση δικτύου είναι 230/400V φαίνονται στον πίνακα 4.2.

Π.4.2 Ανεκτά όρια διακύμανσης τάσης στα δίκτυα χαμηλής τάσης	
Περιοχές	Ανεκτά όρια
Αστικές	±10% (207-253V)
Αγροτικές	±10% (207-253V)

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα τα όρια για αστικές και αγροτικές είναι πλέον ίδια. Πιο παλιά στις αστικές περιοχές τα όρια ήταν μικρότερα λόγω ευαισθησίας κάποιων ηλεκτρικών συσκευών.

Όσον αφορά το όρια των δικτύων μέσης τάσης, διαμορφώνονται από τα οριζόμενα για τους καταναλωτές χαμηλής συμπεριλαμβανομένων των πτώσεων τάσης στους μετασχηματιστές μέσης/χαμηλής τάσης. Έτσι για έναν τριφασικό μετασχηματιστή με ονομαστικές τάσεις 20000/400 V ο ΔΕΔΔΗΕ ορίζει πως η διακύμανση τάσης δεν πρέπει να ξεπερνά τα όρια ±3% δηλαδή (19.400-20.400V).

Η πραγματική εικόνα για την ποιότητα της τάσης δεν μπορεί να βασιστεί μόνο στα όρια αυτής, δεδομένου ότι με αυτόν τον τρόπο δε λαμβάνεται υπόψη ούτε η χρονική διάρκεια των τυχαίων αποκλίσεων, ούτε η ισχύς αυτών. Για να επιτευχθεί ο ορισμός της ποιότητας της τάσεως, η τάση θεωρείται στατιστικό μέγεθος. Με δεδομένο ότι η βέλτιστη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών επιτυγχάνεται για την ονομαστική τάση λειτουργίας τους, ορίζονται τα εξής:

Η σχετική απόκλιση της τάσης τροφοδότησης:

$$u(t) = 100 \cdot \frac{V(t) - V_n}{V_n} \cdot (\%) \quad (4.35)$$

Όπου V_n η ονομαστική τάση της συσκευής και $V(t)$ η τάση τροφοδότησης συναρτήσεως του χρόνου.

Η ανομοιομορφία της τάσεως I_t ορίζεται ως εξής:

$$I_t = \overline{u^2} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) \cdot dt \quad (4.36)$$

Σύμφωνα με το νόμο του Gauss η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$I_t = \overline{u^2} = (\overline{u})^2 + \sigma_u^2 \quad (4.37)$$

Όπου $\overline{u} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) \cdot dt$ και σ_u η τυπική απόκλιση, γεγονός που φανερώνει πως η ανομοιομορφία της τάσης μπορεί να χαρακτηριστεί και να υπολογιστεί από τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της σχετικής απόκλισης τάσεως. Όσο πιο μεγάλο είναι το φορτίο που συνδέεται στο δίκτυο, τόσο πιο δύσκολα επιτυγχάνεται η τήρηση της τάσεως κοντά στην ονομαστική της τιμή, επομένως η απόκλιση της τάσης είναι ανάλογη της ισχύος. Για πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα εντάσσεται το μέγεθος I_p και ορίζεται ως εξής:

$$I_p = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) \cdot P(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) \cdot dw \quad (4.38)$$

Όπου $P(t)$ η απορροφούμενη ισχύς από τον καταναλωτή συναρτήσει του χρόνου και $dw = P(t) \cdot dt$, δηλαδή η απορροφούμενη ενέργεια σε χρονική περίοδο T είναι $W = \int_0^T P(t) \cdot dt$.

Έτσι οι αποκλίσεις της τάσης συναρτήσει της απορροφούμενης ενέργειας υπολογίζονται τελικά ως εξής:

$$I_p = \frac{1}{T} \int_0^T u_w^2 \cdot dw = \bar{u}_w^2 = (\bar{u})_w^2 + \sigma_w^2 \quad (4.39)$$

Τελικά δηλαδή η ανομοιομορφία της τάσης μπορεί να χαρακτηριστεί και να υπολογιστεί από τη μέση τιμή \bar{u}_w και την τυπική απόκλιση της σχετικής απόκλισης ισχύος σ_w .

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει επιτρέψει τη δημιουργία ειδικών οργάνων που ονομάζονται στατιστικά βολτόμετρα και με κατάλληλη σύνδεση σε σημεία του δικτύου μπορούν να μετρηθούν απευθείας οι τιμές των χαρακτηριστικών στατιστικών μεγεθών που προαναφέρθηκαν.

Όπως έχει αποτυπωθεί και νωρίτερα, οι απότομες μεταβολές τάσης χωρίζονται σε περιοδικές ή μη περιοδικές. Ανεξάρτητα όμως από αυτό, μπορούν να χωρίζονται και σε συχνές ή μη συχνές ανάλογα και στις συχνές να εντάσσονται οι περιπτώσεις που εμφανίζεται τουλάχιστον μία μεταβολή ανά ώρα. Η μελέτη των προβλημάτων που απότομες μεταβολές προκαλούν μπορεί να γίνει επίσης ξεχωριστά.

Οι συχνές απότομες μεταβολές ακόμη και με μικρό εύρος γίνονται αρκετά ενοχλητικές, αφού προκαλούν διακυμάνσεις στην ένταση φωτισμού των λαμπτήρων, φαινόμενο που είναι γνωστό και ως 'τρεμόπαιγμα' ή 'flicker'. Είναι αναγκαίο να υπάρξει κάποιος τρόπος για ποσοτικοποίηση αυτών των ενοχλήσεων, αφού πρώτα διασαφηνιστεί πως οι ενοχλήσεις αυτές εξαρτώνται από τη συχνότητα επανάληψης των μεταβολών και όχι από τη μορφή που έχει η μεταβολή της τάσης. Η βάση της σύγκρισης των συχνοτήτων μεταβολών που προκαλούνται από τις αντίστοιχες συχνότητες τάσης αποτελεί η συχνότητα τάσης 10Hz. Η ενόχληση η οποία προκαλείται από το flicker χαρακτηρίζεται από το μέγεθος που ονομάζεται 'δόση flicker' και σημαίνει πως ένας παρατηρητής υφιστάμενος επί ένα λεπτό ένα flicker που παράγεται από διακύμανση τάσης εύρους 1% και συχνότητας 10Hz δέχεται δόση flicker ίση με τη μονάδα. Υπάρχουν κατάλληλα όργανα που ονομάζονται φλικερόμετρα και μετρούν τη δόση flicker.

Οι μη συχνές μεταβολές προκαλούνται κατά τις μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας ορισμένων συσκευών, όπως εκκίνηση κινητήρων ή μεταγωγές φορτίων. Τα όρια, τα οποία οι ηλεκτρικές επιχειρήσεις δέχονται για μη συχνές μεταβολές, είναι από 3 έως 10%, με τις μικρές τιμές να ισχύουν περισσότερο για αστικές περιοχές και τις μεγάλες για βιομηχανικές ή αγροτικές περιοχές.

Παροδικά αίτια μπορεί να προκαλούν και άλλες διαταραχές της τάσης όπως:

1. Οι βυθίσεις ή μικροδιακοπές που αναφέρονται στα βραχυκυκλώματα που συμβαίνουν στα δίκτυα χαμηλής, μέσης και υψηλής τάσης.
2. Οι κρουστικές υπερτάσεις που εμφανίζονται στα δίκτυα χαμηλής τάσης και προκαλούνται, είτε από τη λειτουργία των μέσων ζεύξης και προστασίας των καταναλωτών ή του δικτύου, είτε από ατμοσφαιρικές υπερτάσεις έπειτα από κεραυνό
3. Η ασυμμετρία τριφασικών φάσεων με επιπτώσεις κυρίως στην υπερθέρμανση τριφασικών κινητήρων και στη μείωση της απόδοσης αυτών[1, κεφ.4].

4.3.4 Παραμόρφωση τάσης τροφοδότησης

Συχνές επιπτώσεις της παραμόρφωσης του κύματος της τάσεως είναι προβλήματα στη λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών ή συστημάτων τηλεχειρισμών, υπερθέρμανση κινητήρων και πυκνωτών ισχύος, παράσιτα στα τηλεφωνικά δίκτυα κ.α. Αιτία πρόκλησης των παραμορφώσεων του κύματος είναι η ροή αρμονικών ρευμάτων που προκαλούνται κυρίως από μαγνητικά κυκλώματα (π.χ. μετασχηματιστή) και από στρεφόμενες μηχανές. Η ύπαρξη αρμονικών ρευμάτων προκαλεί και αύξηση απωλειών λόγω δινορρευμάτων στις συσκευές και έτσι δικαιολογείται το αποτέλεσμα της υπερθέρμανσης που προαναφέρθηκε. Οι πηγές αρμονικών έχουν αυξηθεί με την αύξηση της χρήσης ημιαγωγών και την εισαγωγή διατάξεων ελέγχου στροφών κινητήρων.

Το μέγεθος που δείχνει το μέτρο της παραμόρφωσης της τάσης εξαιτίας των αρμονικών ονομάζεται Συντελεστής αρμονικών ή Harmonic Factor που δικαιολογεί και το συμβολισμό του ως HF_V και δίνεται από τη σχέση:

$$HF_V = \frac{(V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 + \dots)^{1/2}}{V_1} \quad (4.40)$$

Όπου V_3, V_5, V_7 το εύρος των αρμονικών τάξης $h = 3, 5, 7$ αντίστοιχα. Η ίδια σχέση ισχύει και για το ρεύματα. Στους παρακάτω πίνακες διακρίνονται για συστήματα όπως παρουσιάζονται στα IEEE Std 519-1992 [1, κεφ.4].

Table 11.1
Voltage Distortion Limits

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3.0	5.0
69.001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5

NOTE: High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.

Σχήμα 4.27: Επιτρεπτά όρια των αρμονικών τάσης για τα διάφορα επίπεδα τάσης συστήματος [31]

**Current Distortion Limits for General Distribution Systems
(120 V Through 69 000 V)**

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Σχήμα 4.28: Επιτρεπτά όρια της παραμόρφωσης του ρεύματος για συστήματα διανομής από 120V ως 69kV. [31]

Table 10.4
Current Distortion Limits for General Subtransmission Systems
(69 001 V Through 161 000 V)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Table 10.5
Current Distortion Limits for General Transmission Systems (>161 kV
Dispersed Generation and Cogeneration)

Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Σχήμα 4.29: Επιτρεπτά όρια της παραμόρφωσης του ρεύματος για συστήματα υπομεταφοράς από 61kV ως 161kV και για συστήματα μεταφοράς άνω των 161,1 kV [31].

4.4 Ηλεκτρικοί υπολογισμοί δικτύων διανομής

4.4.1 Γενικά

Διακρίνονται δύο ειδών ηλεκτρικοί υπολογισμοί των δικτύων διανομής. Είναι εκείνοι που πραγματοποιούνται κατά τη λειτουργία των δικτύων υπό ομαλές συνθήκες λειτουργίας και εκείνοι που λαμβάνουν χώρα υπό μη ομαλές καταστάσεις λειτουργίας. Όταν το δίκτυο λειτουργεί κανονικά ενδιαφέρον παρουσιάζουν ο υπολογισμός της φόρτισης κάθε στοιχείου του δικτύου, ο υπολογισμός της τάσης τροφοδότησης κάθε καταναλωτή και ο υπολογισμός των απωλειών. Σε περίπτωση μη κανονικής λειτουργίας, που η ποιότητα εξυπηρέτησης των καταναλωτών ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια, απασχολούν κυρίως οι υπολογισμοί στις περιπτώσεις μη συμμετρικής φόρτισης ή διακοπής τροφοδότησης μιας φάσεως των δικτύων χαμηλής τάσης [1, κεφ.5.1].

4.4.2 Προσομοίωση φορτίων

Με τον όρο φορτία για τα ηλεκτρικά δίκτυα εννοούνται όλες ηλεκτρικές συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο και απορροφούν ενεργό ή άεργο ισχύ από αυτό. Τα φορτία διακρίνονται σε στατικά, που το μέγεθός τους μεταβάλλεται ακαριαία με την τάση ή τη συχνότητα και τα δυναμικά φορτία, που το μέγεθός τους δεν μεταβάλλεται ακαριαία. Οι μεταβολές της απορροφούμενης ενέργειας ανάλογα με την τάση και τη συχνότητα σχετίζονται με το είδος των συσκευών κατανάλωσης.

Έτσι φορτία που οφείλονται σε θερμικές συσκευές μπορούν να παριστάνονται με την ισοδύναμη ωμική τους αντίσταση και είναι ανεξάρτητα της συχνότητας. Η άεργος ισχύς είναι μηδενική, ενώ η ενεργός ισχύς σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, όπου P_n η ονομαστική ισχύς και V_n η ονομαστική τάση της συσκευής, είναι συνάρτηση της τάσης:

$$P = P_n \cdot \left(\frac{V}{V_n}\right)^2 \quad (4.41)$$

Οι σχέσεις για τα φορτία φωτισμού είναι διαφορετικές ανάλογα με το εάν αποτελούνται από λυχνίες πυρακτώσεως ή από λυχνίες εκκενώσεων εντός αερίου. Για τις λυχνίες πυρακτώσεως η άεργος ισχύς παραμένει μηδενική και η ενεργός μεταβάλλεται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα που μπορεί να θεωρηθεί πως μεταβάλλεται γραμμικά ως εξής:

$$P = P_n \cdot \left(\frac{V}{V_n}\right)^k \quad (4.42)$$

Η παραπάνω σχέση είναι αρχικά ίδια με την 4.41, διότι ο εκθέτης k παίρνει την τιμή 2, αλλά έπειτα παίρνει τιμές μεταξύ 1.5 και 1.6.

Για λυχνίες εκκενώσεων εντός αερίων υπάρχει γραμμική μεταβολή τόσο της ενεργού όσο και της άεργου ισχύος ανάλογα με την τάση, και τους παράγοντες $V_n = 0.55$ και

$V_{0Q} = 0.70$ που αποτελούν τα σημεία στα οποία η απορροφούμενη ενεργός και άεργος ισχύς αντίστοιχα μηδενίζεται. Δηλαδή ισχύουν οι σχέσεις:

$$P = P_n \cdot \left(\frac{V - V_{0P}}{V_n - V_{0P}}\right) \quad (4.43)$$

$$Q = Q_n \cdot \left(\frac{V - V_{0Q}}{V_n - V_{0Q}} \right) \quad (4.44)$$

Ακόμη για αποφυγή του σβησίματος των λυχνιών πρέπει η τάση να κυμαίνεται μεταξύ κάποιων ορίων. Για λυχνίες φθορισμού πρέπει $\frac{V}{V_n} > 0.6 - 0.7$, ενώ για λυχνίες ατμών υδρογόνου πρέπει $\frac{V}{V_n} > 0.75 - 0.85$.

Τα φορτία που προέρχονται από κινητήρες διαθέτουν μια πιο πολύπλοκη μελέτη. Αρχικά η παράστασή τους απαιτεί κάποιου είδους ομαδοποίηση, διότι η ποικιλία των κινητήρων είναι μεγάλη (από οικιακούς μονοφασικούς κινητήρες 1kW έως βιομηχανικούς κινητήρες ισχύος χιλιάδων kW) και έτσι μία ομάδα κινητήρων συνήθως αντικαθίσταται από έναν ισοδύναμο κινητήρα. Επιπλέον υπάρχει διάκριση ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας των κινητήρων κάθε φορά. Εάν αυτοί βρίσκονται σε μόνιμη κατάσταση, τότε μπορούν να παρασταθούν με το ισοδύναμο κύκλωμά τους και οι μεταβολές του φορτίου ανάλογα με την τάση υπολογίζονται, εφόσον είναι γνωστή η συνάρτηση ροπής-στροφών αυτών. Εάν βρίσκονται σε μεταβατική κατάσταση λειτουργίας για την παράσταση της μεταβαλλόμενης ισχύος που οι κινητήρες απορροφούν, γίνεται χρήση τριών τύπων δυναμικών μοντέλων.

Στην πραγματικότητα καμία κατηγορία φορτίων δεν συναντάται ανεξάρτητα από την άλλη, αλλά σχηματίζουν συνδυασμούς και αποτελούν σύνθετα φορτία.

Η παράσταση αυτών των φορτίων για τη μελέτη των δικτύων διανομής ενδιαφέρει κυρίως σε τρία επίπεδα: του καταναλωτή χαμηλής τάσης, του υποσταθμού μέσης/χαμηλής τάσης και του υποσταθμού υψηλής/μέσης τάσης. Για την ανάλυσή τους τα φορτία χωρίζονται σε φορτία σταθερής έντασης, σε φορτία σταθερής ισχύος και σε φορτία σύνθετης αντίστασης.

Μία πιο αναλυτική και πιο προσεγγιστική παράσταση των σύνθετων φορτίων επιτυγχάνεται με βάση τις επιμέρους κατηγορίες φορτίων από τις οποίες αποτελούνται.

Για τα στατικά σύνθετα φορτία λοιπόν ισχύουν οι σχέσεις:

$$\frac{P}{P_0} = (1 + k_p \cdot \Delta f) \cdot \left[A_{p0} + A_{p1} \cdot \frac{V}{V_0} + A_{p2} \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + A_p \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\lambda_p} \right] \quad (4.45)$$

$$\frac{Q}{Q_0} = (1 + k_Q \cdot \Delta f) \cdot \left[A_{Q0} + A_{Q1} \cdot \frac{V}{V_0} + A_{Q2} \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + A_Q \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\lambda_Q} \right] \quad (4.46)$$

Όπου P_0 και Q_0 , η ενεργός και η άεργος ισχύς αντίστοιχα υπό ονομαστική τάση και συχνότητα V_0, f_0 , ενώ k, A, λ είναι συντελεστές.

Για την παράσταση των δυναμικών σύνθετων φορτίων χρησιμοποιούνται ισοδύναμοι κινητήρες. Ο ισοδύναμος κινητήρας παρίσταται με δυναμικά μοντέλα, τα οποία αποτυπώνουν τη δυναμική συμπεριφορά των δικτύων διανομής. Θεωρούνται τα εξής:

- Κάθε κόμβος του υπό εξέταση δικτύου αποτελείται από σύνθετα φορτία χωρισμένα σε κατηγορίες.
- Το σύνολο των φορτίων ανά κατηγορία παρίσταται με ένα ισοδύναμο φορτίο και με δεδομένο ότι τα επιμέρους φορτία είναι στατικά, το ισοδύναμο προκύπτει εύκολα ως το άθροισμα αυτών. Σε περίπτωση που τα φορτία δεν είναι στατικά αλλά δυναμικά, τότε προσδιορίζονται ισοδύναμοι κινητήρες μικρού, μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους.

- Έπειτα ο προσδιορισμός του ισοδύναμου κινητήρα προκύπτει από την ομαδοποίηση παρόμοιων κινητήρων μαζί με τους κατάλληλους συντελεστές [1, κεφ.5.2].

4.4.3 Υπολογισμοί ροής φορτίων και τάσεων

4.4.3.1 Παραδοχές

Με σκοπό την απλοποίηση των υπολογισμών κατά την ανάλυση των δικτύων διανομής γίνονται οι εξής παραδοχές:

- Όλα σχεδόν τα φορτία θεωρούνται σταθερής έντασης, ενώ με τη διακύμανση της τάσης εντός των επιτρεπτών ορίων δεν δημιουργείται σημαντική απόκλιση στη μετατροπή των φορτίων σε ισχύ. Σε πολλές περιπτώσεις δε, τα φορτία θεωρούνται και σταθερής ισχύος, δηλαδή ανεξάρτητα και της διακύμανσης τάσης.
- Συνήθως παραλείπεται η χωρητικότητα των γραμμών, ιδίως όταν το μήκος τους είναι σχετικά μικρό.
- Οι τριφασικές γραμμές θεωρούνται συμμετρικές, δηλαδή και οι τρεις φάσεις παρουσιάζουν την ίδια αντίσταση.
- Τα φορτία θεωρούνται συμμετρικά, δηλαδή οι εντάσεις στις αντίστοιχες φάσεις έχουν διαφορά 120° [1, κεφ.5.3].

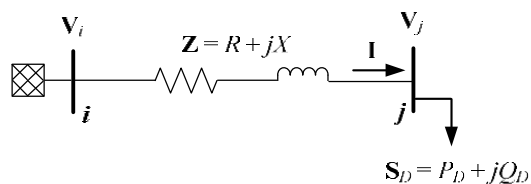
4.4.3.2 Κλασική μέθοδος ακτινικής διανομής

Η κλασική μέθοδος ακτινικής διανομής είναι η πιο απλή και προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού της πτώσης τάσης σε ακτινικά δίκτυα διανομής. Έστω το ακτινικό δίκτυο του σχήματος 4.30 που τροφοδοτεί μόνο ένα συγκεντρωμένο φορτίο μέσω της γραμμής διανομής $i - j$, μήκους L . Αν R_0 και X_0 είναι η ανά

μονάδα μήκους ωμική αντίσταση και επαγωγική αντίδραση, τότε στις παρακάτω σχέσεις φαίνονται η συνολική ωμική και επαγωγική αντίσταση της γραμμής αντίστοιχα.

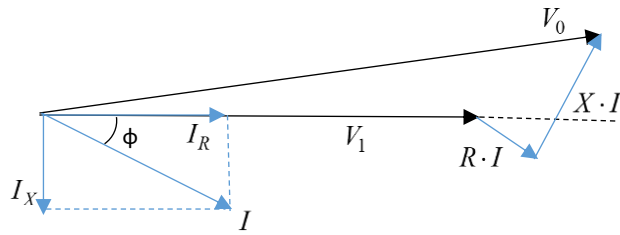
$$R = R_0 \cdot L \quad (4.47)$$

$$X = X_0 \cdot L = \omega \cdot L_0 \cdot L \quad (4.48)$$



Σχήμα 4.30: Γραμμή με ένα συγκεντρωμένο φορτίο [32].

Εάν I_X και I_R είναι το ρεύμα που διαρρέει την επαγωγική αντίδραση και ωμική αντίσταση αντίστοιχα, I το ρεύμα που διαρρέει το φορτίο και V_1 η φασική τάση, τότε η τάση V_0 όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.31 υπολογίζεται ως εξής:



Σχήμα 4.31: Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-εντάσεων [1, κεφ.5.3].

$$\begin{aligned} \tilde{V}_0 &= V_1 + (I_R - j \cdot I_X) \cdot (R + j \cdot X) \\ &= V_1 + (I_R \cdot R + I_X \cdot X) + j \cdot (I_R \cdot X - I_X \cdot R) \end{aligned} \quad (4.49)$$

Με την αντικατάσταση σχέσεων της τριγωνομετρίας στη σχέση 4.48 προκύπτει:

$$V_0 = V_1 + I \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) = V_1 + R \cdot I_R + X \cdot I_X \quad (4.50)$$

Χρήσιμο επίσης μέγεθος αποτελεί η εκατοστιαία πτώση τάσης στη γραμμή διανομής και υπολογίζεται ως εξής:

$$\varepsilon = \left(\frac{V_0 - V_1}{V_1} \right) \cdot 100\% \quad (4.51)$$

Η ενεργός ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο μετράται σε Watt και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P = V_1 \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (4.52)$$

Η άεργος ισχύς μετράται σε VAR και υπολογίζεται ως εξής:

$$Q = V_1 \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (4.53)$$

Ενώ η φαινόμενη ισχύς του φορτίου μετράται σε VA και προκύπτει με δύο τρόπους σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$S = V_1 \cdot I^* = P + j \cdot Q \quad (4.54)$$

Η εκατοστιαία πτώση τάσης υπολογίζεται επίσης με βάση την ενεργό και άεργο ισχύ ή τη φαινόμενη ισχύ, και τη γωνία φ όπως φαίνεται στις σχέσεις 4.55 και 4.56, αντίστοιχα.

$$\varepsilon(\%) = \frac{100 \cdot (R \cdot P + X \cdot Q)}{V_1^2} \quad (4.55)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon(\%) &= \frac{100 \cdot S \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi)}{V_1^2} \\ &= \frac{100 \cdot S \cdot L \cdot (R_0 \cdot \cos \varphi + X_0 \cdot \sin \varphi)}{V_1^2} = \frac{S \cdot L}{K} \end{aligned} \quad (4.56)$$

$$\text{Όπου } K = \frac{V_1^2}{100 \cdot (R_0 \cdot \cos \varphi + X_0 \cdot \sin \varphi)}$$

Στην περίπτωση που η γραμμή διανομής είναι τριφασική τότε χρησιμοποιείται η φαινόμενη ισχύς και η πολική τάση είναι εκφρασμένη σε KVA, το μήκος σε km και τα R_0, X_0 σε Ω/km . Και στις δύο περιπτώσεις όμως αποδεικνύεται ότι η πτώση τάσης είναι ανάλογη της ροπής φορτίου.

Συνήθως οι γραμμές διανομής τροφοδοτούν περισσότερα από ένα φορτία σε ευθεία γραμμή. Έτσι, εάν τροφοδοτούν k φορτία σε ευθεία γραμμή, τότε το ρεύμα που διαρρέει τη γραμμή στο τμήμα από το φορτίο $k - 1$ έως k , είναι:

$$\hat{I}_K = I_{RK} - j \cdot I_{XK} \quad (4.57)$$

Η αντίστοιχη πτώση τάσης του τμήματος αυτού είναι:

$$\begin{aligned} \Delta \hat{V}_K &= Z_K \cdot \tilde{I}_K = (R_K + j \cdot X_K) \cdot (I_{RK} - j \cdot I_{XK}) \\ &= R_K \cdot I_{RK} + X_K \cdot I_{XK} + j \cdot (X_K \cdot I_{RK} - R_K \cdot I_{XK}) \\ \Rightarrow \Delta \hat{V}_K &= I_K \cdot (R_K \cdot \cos \varphi_K + X_K \cdot \sin \varphi_K) - j \cdot I_K \cdot (R_K \cdot \sin \varphi_K - \\ &\quad X_K \cdot \cos \varphi_K) \end{aligned} \quad (4.58)$$

Έτσι η συνολική πτώση τάσης από την αρχή της γραμμής (0) έως το φορτίο (K) δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta \hat{U}_K = \Delta \hat{V}_1 + \Delta \hat{V}_2 + \dots + \Delta \hat{V}_{K-1} + \Delta \hat{V}_K = \hat{V}_0 - \hat{V}_K \quad (4.59)$$

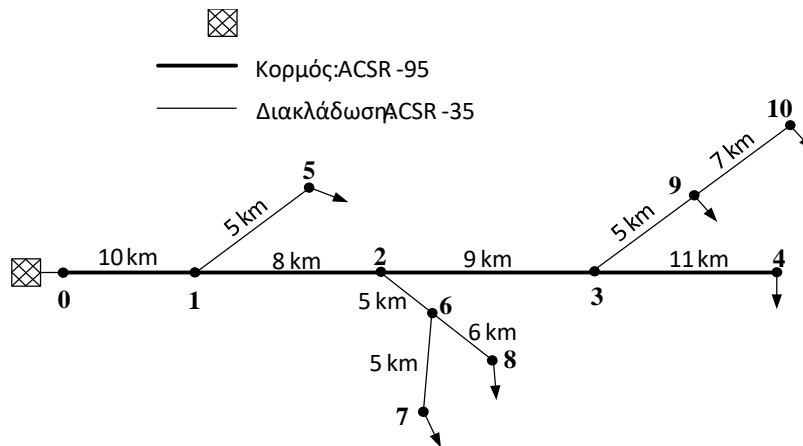
Με την παραδοχή ότι όλα τα φορτία της ίδιας γραμμής έχουν τον ίδιο συντελεστή ισχύος η πτώση τάσης για το τμήμα $k - 1$ έως k είναι:

$$\Delta \hat{V}_K = L_{K-1,K} \cdot I_K \cdot (R_0 + j \cdot X_0) \cdot (\cos \varphi - j \cdot \sin \varphi) \quad (4.60)$$

Όπου $L_{K-1,K}$ το μήκος της γραμμής από $k - 1$ έως k . Οπότε η συνολική πτώση τάσης της γραμμής ισούται με:

$$\begin{aligned} \Delta \hat{U}_K &= (R_0 + j \cdot X_0) \cdot (\cos \varphi - j \cdot \sin \varphi) \\ &\quad \cdot [(L_{01} \cdot I_1) + (L_{12} \cdot I_2) + \dots + (L_{K-1,K} \cdot I_K)] \end{aligned} \quad (4.61)$$

Όπου $(L_{01} \cdot I_1) = L_{01} \cdot (J_1 + J_2 + \dots + J_K)$ με το J_i να συμβολίζει τα μέτρα των εντάσεων των φορτίων.



Σχήμα 4.32: Δίκτυο διανομής με διακλαδώσεις [32].

Στην περίπτωση που τα φορτία διακλαδώνονται (σχήμα 4.32), υπολογίζονται αρχικά οι πτώσεις τάσης και οι τάσεις θεωρώντας τις διακλαδώσεις ως φορτία. Έπειτα υπολογίζονται οι πτώσεις τάσεως επί των κύριων διακλαδώσεων, μετά των υποδιακλαδώσεων κ.λ.π. Έτσι για το σχήμα 4.32 θεωρείται αρχικά η γραμμή 0-1-2-3-4 με τα αντίστοιχα φορτία 1,2,3 και 4, μετά η διακλάδωση 3-9-10 με τα αντίστοιχα φορτία 9 και 10 κ.ο.κ.

Με δεδομένο ότι τα σύγχρονα δίκτυα διανομής είναι πολύ πολύπλοκα, η παραπάνω κλασική μέθοδος υπολογισμού παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες [1, κεφ.5.3].

4.4.3.3 Μητρωειδής μέθοδος ακτινικής διανομής

Κατά τη μητρωειδή μέθοδο, τα σημεία σύνδεσης των φορτίων και των διακλαδώσεων ονομάζονται κόμβοι, ενώ τα τμήματα των γραμμών μεταξύ των κόμβων ονομάζονται κλάδοι. Αυτοί οι κόμβοι και οι κλάδοι εισέρχονται μέσα σε ένα πίνακα ή αλλιώς τετραγωνική μήτρα $[A] = (n \times n)$ ως εξής: Αρχικά θεωρείται ως σημείο 0 και δεν εμπλέκεται στους υπολογισμούς η αρχή κάθε γραμμής. Ο αριθμός του κάθε κόμβου αυξάνεται σύμφωνα με το προς τα που ρέει η ενέργεια, και οι κλάδοι παίρνουν τον αριθμό '1' στον κόμβο στον οποίο καταλήγουν. Οι κόμβοι αποτελούν τις στήλες του πίνακα $[A]$, ενώ οι κλάδοι τις γραμμές. Ο πίνακας αποτελείται μόνο από τους αριθμούς 0 και 1 και όπου είναι μηδέν δεν γράφεται. Έτσι για το σχήμα 4.32 ο πίνακας $[A]$ είναι ο εξής:

		Κόμβοι									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Κλάδοι	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2		1	1	1		1	1	1	1	1
	3			1	1					1	1
	4				1						
	5					1					
	6						1	1	1		
	7							1			
	8								1		
	9									1	1
	10										1

Σχήμα 4.33: Τετραγωνική μήτρα $[A]$ για το δίκτυο του σχήματος 4.32

Παρατηρείται ότι με την παραπάνω κωδικοποίηση, ο πίνακας που δημιουργείται εκτός από τετραγωνικός ($n \times n$) είναι και τριγωνικός, διότι όλα τα στοιχεία από την κύρια διαγώνιο και κάτω είναι μηδέν. Επιπλέον, παρατηρείται ότι όλη η κύρια διαγώνιος, καθώς και η πρώτη γραμμή είναι συμπληρωμένες με τον αριθμό ένα. Ακόμη, για τον προσδιορισμό των πτώσεων τάσης είναι αναγκαίο να οριστούν και τα παρακάτω διανύσματα:

$$[\hat{J}] = \begin{bmatrix} \hat{J}_1 \\ \hat{J}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{J}_K \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{J}_n \end{bmatrix} \quad [\hat{I}] = \begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{I}_K \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{I}_n \end{bmatrix} \quad [\Delta \hat{V}] = \begin{bmatrix} \Delta \hat{V}_1 \\ \Delta \hat{V}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta \hat{V}_K \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta \hat{V}_n \end{bmatrix} \quad [\Delta \hat{U}] = \begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_1 \\ \Delta \hat{U}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta \hat{U}_K \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta \hat{U}_n \end{bmatrix}$$

Όπου:

- \hat{I}_K η ένταση του ρεύματος στον κλάδο K
- \hat{J}_K η ένταση του ρεύματος στον κόμβο K
- $\Delta \hat{V}_K$ η πτώση τάσης στον κλάδο K
- $\Delta \hat{U}_K$ η συνολική πτώση τάσης από την αρχή της γραμμής μέχρι τον κόμβο K

Σύμφωνα με τα παραπάνω μεγέθη προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις.

$$[\hat{I}] = [A] \cdot [\hat{J}] \quad (4.62)$$

Μετά την εύρεση του ανάστροφου πίνακα $[A]^T$ ισχύει και η παρακάτω σχέση:

$$[\Delta \hat{U}] = [A]^T \cdot [\Delta \hat{V}] \quad (4.63)$$

Με σκοπό το συμβολισμό των σύνθετων αντιστάσεων των κλάδων χρησιμοποιείται ο πίνακας $[z_b]$, που περιέχει τις αντιστάσεις αυτές και πρόκειται για έναν διαγώνιο πίνακα. Επομένως ισχύει:

$$[\Delta V] = [z_b] \cdot [I] \quad (4.64)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων 4.63 και 4.64 στη σχέση 4.62 προκύπτει:

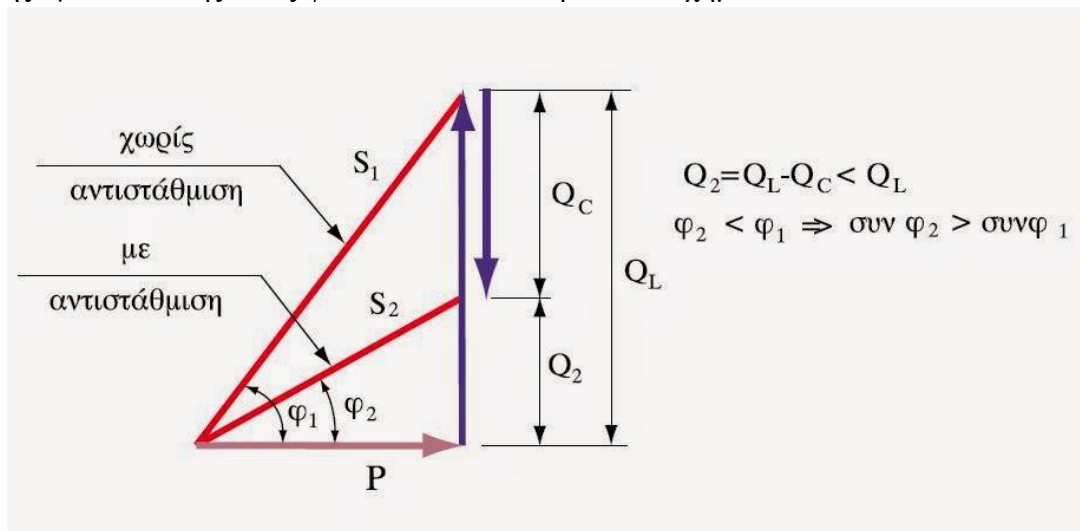
$$\begin{aligned} [\Delta \hat{U}] &= [A]^T \cdot [z_b] \cdot [\hat{I}] = [A]^T \cdot [z_b] \cdot [A] \cdot [\hat{J}] \\ \Rightarrow [\Delta \hat{U}] &= [z] \cdot [\hat{J}] \end{aligned} \quad (4.65)$$

Όπου $[z] = [A]^T \cdot [z_b] \cdot [A]$.

Τελικά η σχέση 4.65 δίνει κάθε φορά την πτώση τάσης του εκάστοτε κόμβου ως συνάρτηση του φορτίου και της σύνθετης αντίστασης [1, κεφ.5.3].

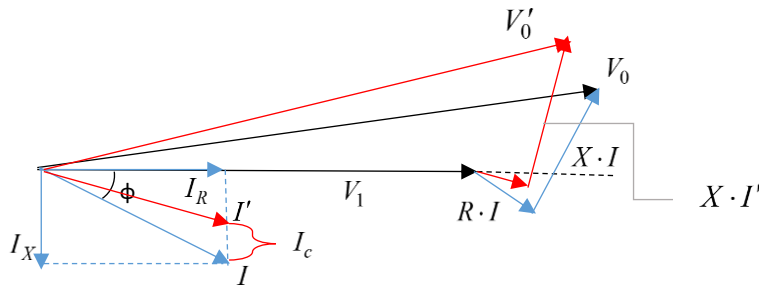
4.4.3.4 Αντιστάθμιση άεργου ισχύος με πυκνωτές

Στις περισσότερες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις η φύση των καταναλώσεων είναι επαγωγική, προέρχεται δηλαδή από κινητήρες, λαμπτήρες φθορισμού, μετασχηματιστές ισχύος, που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλης ποσότητας άεργου ισχύος. Σε αυτήν την περίπτωση, συνηθίζεται η εγκατάσταση ενός πυκνωτή παράλληλα με το φορτίο, ο οποίος προκαλεί βελτίωση του συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.34: Τρίγωνο ισχύος με και χωρίς αντιστάθμιση.

Ακόμη η εγκατάσταση ενός πυκνωτή παράλληλα με το φορτίο, εφόσον το φορτίο έχει επαγωγικό χαρακτήρα, προκαλεί ανύψωση της τάσεως. Σύμφωνα με την ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου, το διάγραμμα του σχήματος 4.31 μετά την παράλληλη σύνδεση πυκνωτή διαμορφώνεται ως εξής:



Σχήμα 4.35: Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-εντάσεων με σύνδεση παράλληλου πυκνωτή [1, κεφ.5.3].

Έτσι η τάση V_0' δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_0' = V_1 + I_R \cdot R + I_X \cdot X - I_C \cdot X \quad (4.66)$$

Η ανύψωση της τάσης που προκαλείται είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος που απορροφά ο πυκνωτής I_C και της επαγωγικής αντίστασης της γραμμής X .

$$\varepsilon_C(\%) = \frac{100}{V_1} \cdot I_C \cdot X = \frac{100}{V_1^2} \cdot Q_C \cdot X \quad (4.67)$$

ενώ, η πτώση τάσεως είναι [1, κεφ.5.3] :

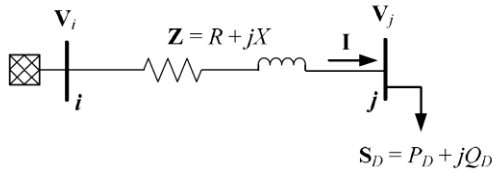
$$\varepsilon(\%) = \frac{100}{V_1} \cdot (I_R \cdot R + I_X \cdot X) - \frac{100}{V_1} \cdot I_C \cdot X \quad (4.68)$$

4.4.4 Υπολογισμοί απωλειών δικτύων διανομής

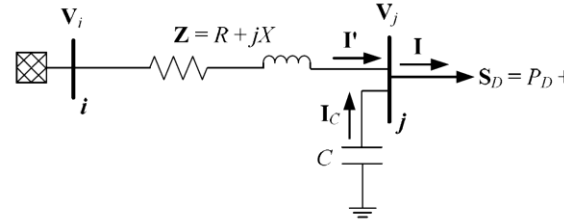
Οι απώλειες των δικτύων διανομής, είναι ασήμαντες σε επίπεδο καταναλωτή, ωστόσο στο σύνολο του δικτύου καθίστανται σημαντικές εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας διακινούμενης ενέργειας. Ο περιορισμός των απωλειών στο δίκτυο διανομής μπορεί να επιτευχθεί είτε με προσθήκη παράλληλων πυκνωτών, οι οποίοι μειώνουν τη διακινούμενη άεργο ισχύ, είτε με χρήση καλωδίων μεγαλύτερης διατομής [1, κεφ.5.4].

4.4.4.1 Απώλειες γραμμών

Έστω η τριφασική γραμμή διανομής που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.36. Οι απώλειες ενεργού P_A , και άεργου Q_A , ισχύος για την περίπτωση αυτή υπολογίζονται αντίστοιχα από τις ακόλουθες σχέσεις:



(α)



(β)

Σχήμα 4.36: Διάγραμμα τριφασικού ακτινικού δικτύου διανομής χωρίς διακλαδώσεις με συγκεντρωμένο φορτίο στον κόμβο j α) χωρίς εγκάρσιο πυκνωτή και β) με εγκάρσιο πυκνωτή [34].

$$P_A = 3 \cdot R_T \cdot I^2 = 3 \cdot R_T \quad (4.69)$$

$$Q_A = 3 \cdot X_T \cdot I^2 = 3 \cdot X_T \quad (4.70)$$

Ο υπολογισμός των ισχύων απωλειών, S_A , μπορεί να υπολογιστεί μέσω της πτώσης τάσης της γραμμής ΔV σύμφωνα με την σχέση:

$$S_A = P_A + jQ_A = 3\Delta V \cdot I^* \quad (4.71)$$

όπου I^* ο συζυγής του I .

Στην γενική περίπτωση που η το δίκτυο απαρτίζεται από μια κεντρική γραμμή και διακλαδώσεις, οι συνολικές απώλειες προκύπτουν από τον άθροισμα των απωλειών σε κάθε κλάδο. Τέλος, στην περίπτωση διανεμημένου φορτίου οι απώλειες ισχύος υπολογίζονται σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P_A = 3 \cdot R \int_0^L I_x^2 \cdot dx \quad (4.72)$$

$$Q_A = 3 \cdot X \int_0^L I_x^2 \cdot dx \quad (4.73)$$

όπου η ένταση του ρεύματος I υπολογίζεται βάση της πυκνότητας φορτίου $J(x)$ σύμφωνα με την σχέση [1, κεφ.5.4]:

$$I_x = \int_x^L J(x) \cdot dx \quad (4.74)$$

4.4.4.2 Μείωση απωλειών με προσθήκη πυκνωτών

Για τον περιορισμό των απωλειών στα δίκτυα διανομής, συχνά τοποθετούνται πυκνωτές οι οποίοι περιορίζουν την διακινούμενη μέσω αυτών άεργο ισχύ. Κατά συνέπεια, για την περίπτωση της απλούστερης γραμμής που επιγράφηκε προηγουμένως, εάν στο άκρο της τοποθετηθεί ένας πυκνωτής που απορροφά ένταση J_C , οι σχέσεις (4.69) και (4.70) διαμορφώνονται ως εξής:

$$P'_A = 3 \cdot R_T [I_R^2 + (I_x - I_c)^2] \quad (4.75)$$

$$Q'_A = 3 \cdot X_T [I_R^2 + (I_x - I_c)^2] \quad (4.76)$$

Συνεπώς, η μεταβολή των απωλειών λόγω της εγκατάστασης πυκνωτή στο σύστημα είναι [1, κεφ.5.4]:

$$P'_A - P_A = 3 \cdot R \cdot I_c \cdot (I_c - 2I_x) \quad (4.77)$$

$$Q'_A - Q_A = 3 \cdot X \cdot I_c \cdot (I_c - 2I_x) \quad (4.78)$$

4.4.5 Υπολογισμοί υπερτάσεων

Τα αίτια που προκαλούν τις υπερτάσεις στα ΣΗΕ διακρίνονται σε εξωτερικά και εσωτερικά. Τα εξωτερικά αίτια αφορούν κυρίως του κεραυνούς, οι οποίοι προκαλούν τις ονομαζόμενες ατμόσφαιρες υπερτάσεις, Τα εσωτερικά αίτια αφορούν τις απότομες μεταβολές της λειτουργίας των ΣΗΕ, οι οποίες μπορεί να προκληθούν από βραχυκυκλώματα, ζεύξεις/απόζευξεις κ.α.. Εδώ να σημειωθεί ότι υπάρχει και η περίπτωση ένας κεραυνός να προκαλέσει την διάσπαση της μόνωσης ενός αγωγού, προκαλώντας την βραχυκύκλωση του [1, κεφ.5.6].

4.4.5.1 Ατμοσφαιρικές υπερτάσεις

Οι ατμοσφαιρικές υπερτάσεις οφείλονται στις απότομες μεταβολές της κατανομής των στατικών φορτίων στα νέφη κατά τη διάρκεια καταιγίδων. Οι μεταβολές αυτές παρουσιάζονται είτε με την μορφή αστραπών, όπου δημιουργείτε ηλεκτρικό τόξο μεταξύ των νεφών, είτε με την μορφή κεραυνών, όπου το ηλεκτρικό τόξο σχηματίζεται μεταξύ του νέφους και του εδάφους. Και στις δύο περιπτώσεις, τα επαγόμενα από τα νέφη στατικά φορτία διαδίδονται στις γραμμές του εναέριου δικτύου, τα οποία κινούνται με την μορφή οδεύοντων κυμάτων έως ότου αποσβεστούν (λόγω θερμικών απωλειών ή διαρροής ηλεκτρικής ενέργειας) ή διακοπούν από τα μέσα προστασίας του δικτύου δηλαδή αλεξικέραυνα κτλ. Η διάρκεια των ατμοσφαιρικών υπερτάσεων είναι της τάξης των μς [1, κεφ.5.6].

4.4.5.2 Υπερτάσεις φυσικής συχνότητας

Οι υπερτάσεις φυσικής συχνότητας οφείλονται στις μεταβολές λόγω εσωτερικών αιτιών οι οποίες συμβαίνουν στα δίκτυα διανομής. Οι εσωτερικές αντιστάσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές στα δίκτυα ΧΤ και σε ορισμένα δίκτυα ΜΤ, κυρίως όταν οι γραμμές ενός δικτύου είναι μεγάλου μήκους ή όταν στο δίκτυο περιέχονται πυκνωτές. Τέτοιου είδους υπερτάσεις κατά κύριο λόγο οφείλονται σε βραχυκυκλώματα, φαινόμενα ζεύξης και απόζευξης κυκλωμάτων που περιέχουν πυκνωτές, και σιδηροσυντονισμού. Εσωτερικές υπερτάσεις που οφείλονται σε φαινόμενα ζεύξης/απόζευξης μπορεί να προκληθούν κατά την απομόνωση ενός βραχυκυκλώματος ή κατά την διακοπή ρεύματος μαγνητίσεως κάποιου μετασχηματιστή, Επιπλέον, συχνά παρουσιάζονται υψηλές υπερτάσεις και υπερτάσεις λόγω ζεύξης ή απόζευξης σε ένα τμήμα του δικτύου με μεγάλη χωρητικότητα. Τέλος, με

τον όρο σιδηροντονισμό εννοείται η διακοπή μιας ή δύο φάσεων, η οποία μπορεί να προκαλέσει τόσο μεταβατικές όσο και μόνιμες υπερτάσεις στο δίκτυο [1, κεφ.5.6].

4.5 Ρύθμιση Τάσης Δικτύων Διανομής

4.5.1 Ρύθμιση Τάσης

Το δίκτυο διανομής περιλαμβάνει ένα σύνολο μέσων τα οποία διατηρούν της τάσης τροφοδότησης των καταναλωτών στα αποδεκτά όρια, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.3. Για τη διασφάλιση της τάσης εντός των προβλεπόμενων ορίων χρησιμοποιούνται ένα σύνολο από μέσα ρύθμισης. Τα κυριότερα μέσα ρύθμισης είναι οι α) ρυθμιστές τάσης υπό φορτίο και β) οι εγκάρσιοι πυκνωτές [1, κεφ. 6].

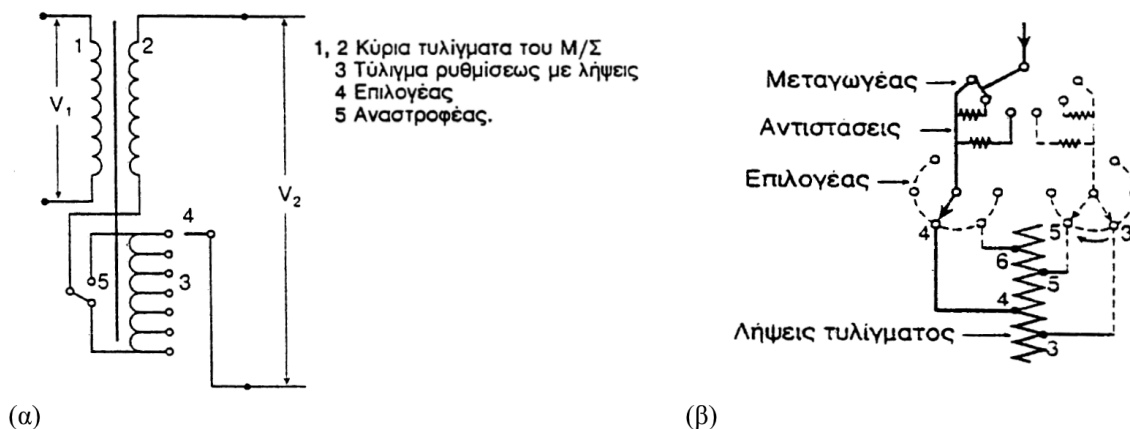
4.5.1.1 Ρυθμιστές τάσης υπό φορτίο

Οι ρυθμιστές τάσης υπό φορτίο ανάλογα με το σημείο του δικτύου διανομής που είναι εγκατεστημένοι διακρίνονται στους ενσωματωμένους στους μετασχηματιστές ΥΤ/ΜΤ, και στους ανεξάρτητους, οι οποίοι εγκαθίστανται στην αρχή ή κατά μήκος των γραμμών ΜΤ.

Στο σχήμα 4.37(α) παρουσιάζεται ένα σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο το οποίο είναι ενσωματωμένο σε ένα μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ. Το τύλιγμα ρύθμισης, το οποίο περιλαμβάνει αρκετές λήψεις, συνδέεται σε σειρά με τα κύρια τυλίγματα του μετασχηματιστή. Μέσω ενός αναστροφέα, η επαγόμενη τάση στο τύλιγμα προστίθεται ή αφαιρείται από την τάση του κύριου τυλίγματος. Μια συνήθης επιλογή για την τάση ρύθμισης είναι να βρίσκεται σε ποσοστό 10% της τάσης του κύριου τυλίγματος. Να σημειωθεί, ότι η μεταβολή της τάσης δεν συμβαίνει απότομα, αλλά κατά σταθερά βήματα. Ο αριθμός των λήψεων μπορεί να υπολογιστεί γνωρίζοντας την τάση ρύθμισης και το βήμα.

Η ρύθμιση της τάσης μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί μέσω ενός μηχανισμού αλλαγής υπό φορτίο με ωμική αντίσταση, όπως αυτόν που παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 4.37(β). Τα κύρια μέρη του μηχανισμού είναι ο μεταγωγέας με τους διακόπτες, οι αντιστάσεις και ο επιλογέας των λήψεων.

Μια άλλη κατηγορία ρυθμιστών τάσης υπό φορτίο προκύπτει αν οι ωμικές αντικαταστάσεις αντικατασταθούν από επαγωγικά πηνία. Συνήθως, τέτοιες διατάξεις χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό της ροή του ρεύματος κατά την ενδιάμεση φάση αλλαγής [1, κεφ. 6.2].



Σχήμα 4.37: Ρύθμιση της τάσης υπό φορτίο με α) τύλιγμα ρύθμισης β) με αντίσταση [1, κεφ. 6].

4.5.1.2 Πυκνωτές

Οι πυκνωτές όταν πρόκειται να συμβάλουν στη ρύθμιση της ροής φορτίων και τάσης, εγκαθίστανται στους ζυγούς ΜΤ των Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Οι ανάγκες αυτές συνήθως παρουσιάζονται στο δίκτυο μεταφοράς. Αντιθέτων, στην περίπτωση που οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση της τάσης, εγκαθίστανται επί των γραμμών του δικτύου διανομής και ιδιαίτερα στα εναέρια δίκτυα ΜΤ. Συνήθως για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται εγκάρσιοι πυκνωτές. Οι εγκάρσιοι πυκνωτές έχουν τη δυνατότητα μόνιμης σύνδεσης (σε αυτήν την περίπτωση γίνεται λόγος για μη αποζεύξιμους πυκνωτές), είτε της σύνδεσης με τη χρήση διακοπών και διατάξεων αυτοματισμού (σε αυτήν την περίπτωση γίνεται λόγος για αποζεύξιμους πυκνωτές). Η διάταξη αυτοματισμού εμπεριέχει έναν ηλεκτρονόμο τάσης, ο οποίος σε συνθήκες μειωμένης τάσης προκαλεί την ζεύξη των πυκνωτών ενώ στην αντίθετη περίπτωση την απόζευξη τους [1, κεφ. 6.2].

4.5.2 Επιλογή θέσης εγκατάστασης

Το μεγαλύτερο μέρος των ρυθμιστών τάσης είναι ενσωματωμένο στους μετασχηματιστές ΥΤ/ΜΤ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ρύθμιση επιτυγχάνεται ταυτόχρονα για όλες τις γραμμές ΜΤ που αναχωρούν από τον συγκεκριμένο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Σε περίπτωση που τα φορτία των γραμμών δεν μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο, η ταυτόχρονη ρύθμιση μπορεί να δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα. Για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων, τοποθετούνται ανεξάρτητοι ρυθμιστές στις αρχές των γραμμών ή κατά μήκος των γραμμών όταν αυτό κρίζεται απαραίτητο [1, κεφ. 6.2].

4.6 Προστασία Δικτύων Διανομής

4.6.1 Γενικά

Η προστασία των δικτύων διανομής γίνεται με βασικό κριτήριο την πρόβλεψη ή τον περιορισμό των καταστάσεων που μπορεί να οδηγήσουν σε βλάβη. Αυτό σχετίζεται κυρίως με τον εξοπλισμό, τα μηχανήματα καθώς και την διαμόρφωση του δικτύου. Σε περίπτωση που αυτό δεν επιτευχθεί, τότε είναι αναγκαίο οι επιπτώσεις της βλάβης να περιοριστούν όσο τον δυνατόν περισσότερο και κυρίως να ελαχιστοποιηθεί η διακοπή της τροφοδοσίας. Ακόμα πιο σημαντικό ωστόσο είναι η αποφυγή επικίνδυνων καταστάσεων που μπορούν να προκαλέσουν ζημίες στο σύστημα και πολύ περισσότερο τον τραυματισμό κάποιου ανθρώπου. Κατά τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη των δικτύων διανομής, και ιδιαίτερα του δικτύου ΧΤ που αναπτύσσεται εντός του αστικού ιστού, ο παράγοντας της προστασίας του δικτύου λαμβάνεται σοβαρά υπόψη [1, κεφ. 7.1].

4.6.2 Συμπεριφορά των δικτύων διανομής υπό συνθήκες σφάλματος

Οι βασικές καταπονήσεις που δέχεται το δίκτυο διανομής οφείλονται στις αναπτυσσόμενες υπερεντάσεις και υπερτάσεις. Ακριβώς μετά από κάθε βραχυκύκλωμα ή μία απότομη μεταβολή στην ομαλή λειτουργία του δικτύου αναπτύσσονται υπερεντάσεις και υπερτάσεις, οι οποίες απαρτίζονται από δύο συνιστώσες. Οι συνιστώσες αυτές είναι η θεμελιώδης συχνότητα 50 Hz, η οποία είναι εμφανής σε όλη την διάρκεια του βραχυκυκλώματος, και η φυσική συχνότητα, η οποία υπερτίθεται στην θεμελιώδη συχνότητα και έχει περιορισμένη διάρκεια.

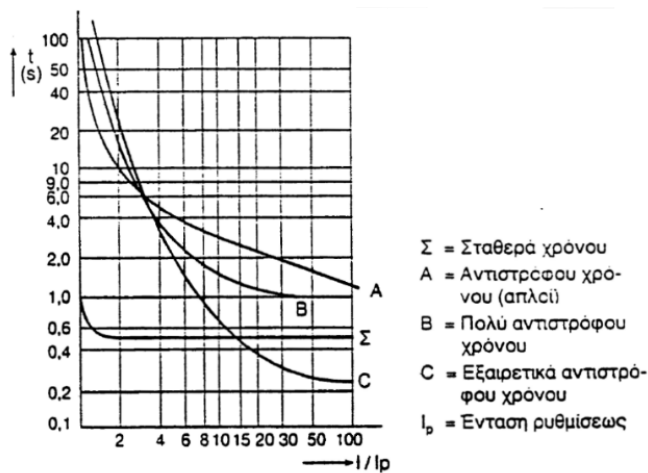
Η συνηθέστερη πηγή σφαλμάτων στα δίκτυα διανομής προκύπτει από την απώλεια της μόνωσης μεταξύ φάσεως και γης με αποτέλεσμα να προκαλούνται βραχυκυκλώματα. Αυτό σε μεγάλο βαθμό οφείλεται στις υπερτάσεις που αναπτύσσονται στο δίκτυο διανομής. Πέρα από τις υπερτάσεις που οφείλονται σε εσωτερικά αίτια, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι ατμοσφαιρικές υπερτάσεις, οι οποίες είναι αρκετά υψηλές αλλά περιορίζονται σε μικρά χρονικά διαστήματα. Ακόμα, μεγάλες υπερτάσεις μπορεί να προκληθούν λόγω σιδηροσυντονισμού. Οι τιμές των εντάσεων και τάσεων που αναπτύσσονται στο δίκτυο διανομής σε περίπτωση βλάβης επηρεάζεται σημαντικά από τον τρόπο που έχει γειωθεί ο ουδέτερος κόμβος του δικτύου. Συνεπώς, κατά τον σχεδιασμό των δικτύων διανομής ο τρόπος γείωσης του ουδέτερου κόμβου αποτελεί σημείο εξαιρετικής σημασίας [1, κεφ. 7.2].

4.6.3 Προστασία έναντι υπερεντάσεων

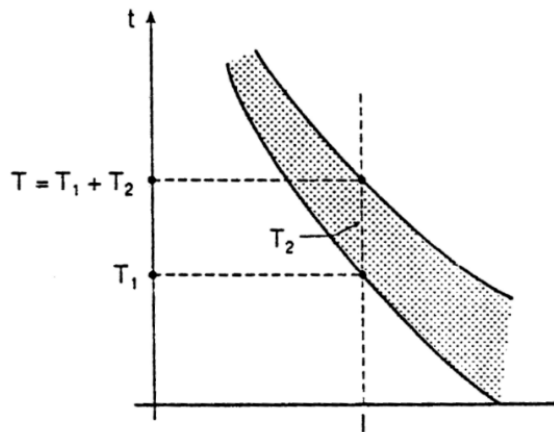
Η ακτινική λειτουργία των δικτύων διανομής καθιστά την προστασία του σχετικά εύκολη, αφού αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση απλών διατάξεων υπερεντάσεως, οι οποίοι σταματούν την λειτουργία του κυκλώματος όταν η τιμή της έντασης βρίσκεται πάνω από τα επιτρεπτά όρια. Μερικά τέτοια μέσα είναι οι διακόπτες ισχύος, οι ασφάλειες και οι ηλεκτρονόμοι. Κατά τον σχεδιασμό την προστασίας ενός δικτύου διανομής αρχικά πρέπει να γίνει η επιλογή την κατάλληλης θέσης και του είδους των μέσων προστασίας που θα χρησιμοποιηθούν. Η επιλογή αυτή γίνεται με τέτοιο τρόπο που περιορίζονται οι εντάσεις στο τμήμα αυτό, ενώ σε περίπτωση βλάβης η αποκοπή του από το υπόλοιπο δίκτυο γίνεται εύκολα έτσι ώστε να περιορίζονται οι επιπτώσεις της βλάβης. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται οι περιοχές έντασης βραχυκυκλώματος, δηλαδή το μέγεθος των εντάσεων βραχυκύκλωσης φάσεων και γης. Οι υπολογισμοί αυτοί πρέπει να γίνουν για κάθε πιθανή περίπτωση σφάλματος. Βάση αυτών εκτιμούνται τα δεδομένα για την ένταση σε κάθε ζώνη προστασίας. Το τελευταίο στάδιο της διαμόρφωσης της προστασίας περιλαμβάνει την ρύθμιση της λειτουργίας των μέσων προστασίας, η οποία στηρίζεται στην ανάλυση που έχει προηγηθεί.

Στην παράγραφο αυτή αναλύονται τα μέσα προστασίας έναντι των υπερεντάσεων που μπορεί να δημιουργηθούν στο δίκτυο διανομής. Αυτά είναι οι ηλεκτρονόμοι, οι διακόπτες ισχύος και οι ασφάλειες. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, οι ηλεκτρονόμοι ανιχνεύουν την υπέρβαση της έντασης του ρεύματος πάνω από μια καθορισμένη τιμή και στη συνέχεια κλείνουν. Αυτό σηματοδοτεί το άνοιγμα των διακοπών ισχύος, οι οποίοι διακόπτουν τις υπερεντάσεις που δημιουργούνται. Οι ασφάλειες και οι διακόπτες ισχύος χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στο δίκτυο διανομής. Η κατασκευαστική δομή και η διαμόρφωση των μέσων προστασίας διαφοροποιείται αρκετά ανάλογα με την τάση και τεχνική διακοπής που εφαρμόζεται.

Πιο συγκεκριμένα, οι κύριοι τύποι ηλεκτρονόμων είναι οι ηλεκτρονόμοι σταθερού χρόνου, των οποίων ο χρόνος λειτουργίας δεν εξαρτάται από το μέγεθος της έντασης, και οι ηλεκτρονόμοι αντίστροφου χρόνου, των οποίων ο χρόνος λειτουργίας μειώνεται όταν αυξάνεται η υπέρβαση. Μάλιστα, στην δεύτερη περίπτωση έχουν τυποποιηθεί τρεις τύποι ηλεκτρονόμων ανάλογα με το ρυθμό μείωσης που εμφανίζει ο χρόνος λειτουργίας με την αύξηση της υπερεντάσεως. Οι τυπικές χαρακτηριστικές για χρόνου-έντασης των ηλεκτρονόμων υπερεντάσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.38.



(α)



(β)

Σχήμα 4.38: Τυπικές χαρακτηριστικές χρόνου-έντασης α) διάφορων τύπου ηλεκτρονόμους υπερεντάσεως β) ασφαλειών [1, κεφ. 7.3].

Όσο αναφορά τις ασφάλειες, διακρίνονται δύο τύποι ασφαλειών: οι εκτονώσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται μόνο στα εναέρια δίκτυα ΜΤ, και οι κλειστού τύπου, οι οποίες χρησιμοποιούνται στο σύνολο του δικτύου διανομής αλλά ιδιαίτερα στο δίκτυο ΧΤ. Και οι δύο τύποι περιλαμβάνουν το τηκόμενο στοιχείο, το οποίο τήκεται όταν η θερμοκρασία αυξηθεί λόγω της θερμότητας που αναπτύσσεται από την αυξημένη ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Οι τυπικές χαρακτηριστικές χρόνου-έντασης των ασφαλειών παρουσιάζονται στο σχήμα 10(β). Αυτές δημιουργούν μια ζώνη (γκρι περιοχή), η οποία σχηματίζεται από τον χρόνο τήξεως T_1 που απαιτείται για να φθάσει τηκόμενο στοιχείο στην θερμοκρασία τήξεως, τον χρόνο τόξου που απαιτείται για τη σβέση του τόξου, και τον ολικό χρόνο διακοπής $T = T_1 + T_2$ [1, κεφ. 7.3].

4.6.4 Προστασία έναντι υπερτάσεων

Σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.4.5, τα είδη των υπερτάσεων που χρίζουν μεγαλύτερης προσοχής είναι οι ατμοσφαιρικές υπερτάσεις, οι οποίες εγείρουν μεγαλύτερο κίνδυνο για το δίκτυο σε σχέση με τις υπερτάσεις που δημιουργούνται λόγω ζεύξης/απόζευξης. Κυρίο μέλημα για την προστασία έναντι των υπερτάσεων είναι αποφυγή τους ή ο περιορισμός της συχνότητας που εμφανίζονται. Σε περίπτωση που κάτι τέτοιο είναι αδύνατο να συμβεί, τότε το δίκτυο οφείλει να είναι διαμορφωμένο έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις που προκύπτουν από αυτές. Αυτό επιτυγχάνεται με τη τοποθέτηση μονώσεων προστασίας στις εγκαταστάσεις και την χρήση ορισμένων μέσων προστασίας έναντι των υπερτάσεων.

Τα χαρακτηριστικά που καθορίζουν το επίπεδο προστασίας της μόνωσης ενός στοιχείου είναι η αντοχή σε κρουστικές τάσεις και τάσεις 50 Hz. Οι τιμές της αντοχής σε κρουστικά κύματα και τάσεις 50 Hz προκύπτουν μέσα από τυποποιημένες δοκιμές, κατά τις οποίες ο αντίστοιχος εξοπλισμός ή η γραμμή υποβάλλεται σε ένα κρουστικό κύμα με καθορισμένα χαρακτηριστικά και σε τάσεις 50 Hz για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και συνθήκες, αντίστοιχα. Επειδή η αντοχή των μονώσεων μεταβάλλεται αλλάζοντας τις συνθήκες υγρασίας, θερμοκρασίας, πίεσης κτλ., οι τιμές αντοχής αναφέρονται πάντα στις τυποποιημένες συνθήκες.

Οι δυο κυριότερες κατηγορίες μέσω προστασίας έναντι των υπερτάσεων είναι:

1. οι *αγωγοί προστασίας*, οι οποίοι τοποθετούνται υψηλότερα από τους γραμμές ώστε να προστατεύουν το δίκτυο από κεραυνούς.
2. οι *απαγωγείς υπερτάσεων*, οι οποίοι διασπούν ελεγχόμενα τα κύματα υπερτάσεων και στη συνέχεια τα διοχετεύουν προς τη γη. Κατ' αυτό τον τρόπο περιορίζεται η καταπόνηση των στοιχείων του δικτύου. Τα πιο συνήθη μέσα της κατηγορίας αυτής είναι τα διάκενα, στα οποία η διακοπή του ρεύματος 50 Hz που ακολουθεί την διάσπαση γίνεται με χρήση ενός προγενέστερου εξοπλισμού προστασίας έναντι των υπερεντάσεων, και τα αλεξικέραυνα, στα οποία η διακοπή γίνεται χωρίς την χρήση διαφορετικού μέσου [1, κεφ. 7.4].

4.7 Βέλτιστη Λειτουργία Δικτύων Διανομής

4.7.1 Γενικά

Η λειτουργία ενός Δικτύου Διανομής μπορεί να θεωρηθεί ως βέλτιστη όταν η τροφοδότηση του φορτίου γίνεται κατά τρόπο τέτοιο που οι ελαχιστοποιούνται οι απώλειες και η ποιότητα εξυπηρέτησης των καταναλωτών (η οποία παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.3) είναι άριστη. Για να επιτευχθούν αυτά, ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη του δικτύου διανομής γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την λειτουργία του κάτω από ομαλές συνθήκες, καθώς επίσης και τις καταστάσεις μη ομαλών συνθηκών λειτουργίας που ενδέχεται να εμφανιστούν. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα του δικτύου και οι συνεχείς αλλαγές στην κατάσταση φόρτισης του που συμβαίνουν στην πράξη καθιστά τον καθορισμό της βέλτιστης λειτουργίας του δικτύου ένα εξαιρετικά δύσκολο πρόβλημα μέχρι σήμερα. Στην ενότητα αυτή θα γίνει παρουσίαση των βασικών μεθόδων βελτιστοποίησής του δικτύου διανομής [1, κεφ. 8.1].

4.7.2 Έλεγχος ροής ισχύος με παράλληλους πυκνωτές

Ο έλεγχος της ροής της άεργου ισχύος στα δίκτυα διανομής επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση παραλλήλων πυκνωτών. Διακρίνονται οι περιπτώσεις:

1. Εγκατάσταση πυκνωτών XT στις εσωτερικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις των καταναλωτών, των οποίων το μέγεθος καθορίζεται από τα ελάχιστα όρια που έχουν τεθεί για τον μέσο συντελεστή ισχύος. Η διατήρηση του συντελεστή ισχύος πάνω από μια ορισμένη τιμή επιτυγχάνεται καλύτερα με την εγκατάσταση μιας συστοιχίας πυκνωτών που έχουν την δυνατότητα να συνδέονται και να αποσυνδέονται ανά ομάδες.
2. Εγκατάσταση πυκνωτών MT κατά μήκος των γραμμών, οι οποίοι ελαχιστοποιούν τις απώλειες των γραμμών MT και βελτιώνουν την τάση. Το μέγεθος του πυκνωτή και το σημείο της γραμμής

που εγκαθίστανται καθορίζεται από τα επιθυμητά ποσοστά μείωσης των απωλειών ισχύος και ενέργειας και πάντα σύμφωνα με το βέλτιστο οικονομικό όφελος,

3. Εγκατάσταση πυκνωτών ΜΤ στους ζυγούς των Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, οι οποίοι εξυπηρετούν τις ανάγκες των συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας [1, κεφ. 8.2].

4.7.3 Βελτιστοποίηση της λειτουργίας

Η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου διανομής γίνεται με γνώμονα την ελαχιστοποίηση των απωλειών στο δίκτυο διανομής και την μεγιστοποίηση της ποιότητας εξυπηρέτησης όσο αναφορά την συνέχεια και την σταθερότητα της τάσης τροφοδότησης των καταναλωτών. Η ελαχιστοποίηση των απωλειών επιτυγχάνεται με την διαμόρφωση της κατάλληλης συνδεσμολογίας και της εγκατάστασης πυκνωτών. Σύμφωνα με αυτά, η ανάπτυξη της βέλτιστης λειτουργίας περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια. Αρχικά, αναπτύσσεται η βέλτιστη συνδεσμολογία του δικτύου, στην οποία περιλαμβάνεται και η επιλογή των απαιτούμενων πυκνωτών, βάση τις συνθήκες ομαλής λειτουργίας του δικτύου. Επιπλέον, εξετάζεται η βέλτιστη συνδεσμολογία σε καταστάσεις μη ομαλής λειτουργίας του δικτύου, δηλαδή όταν διακόπτεται η λειτουργία ενός τμήματος της γραμμής. Το ζητούμενο σε τέτοιες περιπτώσεις είναι ο περιορισμός των καταναλωτών που δεν τροφοδοτούνται, χωρίς ωστόσο να υπερφορτίζεται κάποιο τμήμα του δικτύου και παράλληλα η συντομότερη αποκατάσταση των καταναλωτών που δεν τροφοδοτούνται. Σύμφωνα με αυτά προκύπτουν διάφορες πιθανές συνδεσμολογίες, οι οποίες στην συνέχεια εξετάζονται ως προς την ποιότητα εξυπηρέτησης. Τέλος, γίνεται συνεκτίμηση του κέρδους λόγω μειωμένων απωλειών και ποιότητας εξυπηρέτησης [1, κεφ. 8.3].

4.7.4 Έλεγχος της λειτουργίας – Αυτόματος έλεγχος μέσω Κέντρων Ελέγχου

Ο έλεγχος της λειτουργίας των δικτύων διανομής διασφαλίζεται μέσω των Κέντρων Ελέγχου Δικτύων Διανομής (ΚΕΔΔ), των οποίων η λειτουργία πλέον έχει αυτοματοποιηθεί σχεδόν πλήρως με την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών (Η/Υ). Τα κύρια τμήματα ενός ΚΕΔΔ είναι το σύστημα απεικόνισης του δικτύου και το σύστημα τηλεελέγχου.

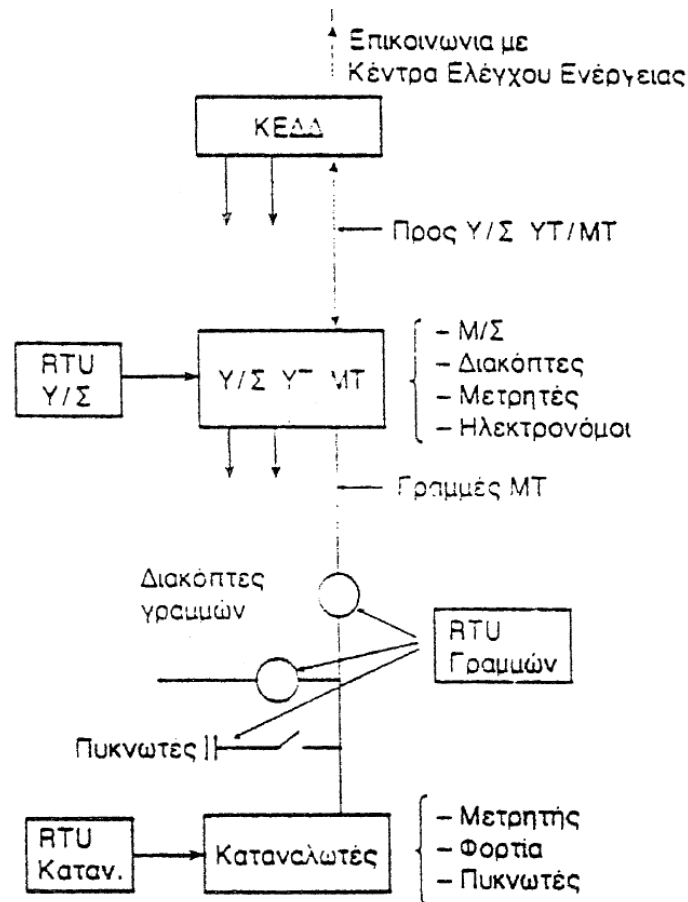
Το σύστημα απεικόνισης των παλιότερων ΚΕΔΔ πραγματοποιείται με το μιμικό διάγραμμα τοίχου, στο οποίο απεικονίζονται σχηματικά το σύνολο των γραμμών και Υ/Σ του δικτύου. Τα σημεία του δικτύου διανομής που δεν εμφανίζονται στο διάγραμμα, καταγράφονται ξεχωριστά σε ενημερωμένα αρχεία. Στα σύγχρονα ΚΕΔΔ η χαρτογράφηση του δικτύου διανομής γίνεται εξ' ολοκλήρου μέσω Η/Υ. Εκεί αποθηκεύονται όλα τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του δικτύου, τα οποία είναι άμεσα διαθέσιμα για τους χειριστές. Επιπλέον, η χρήση Η/Υ επιτρέπει την καταγραφή και αποθήκευση στατιστικών δεδομένων του δικτύου όπως χρονοσειρές φορτίσεων των στοιχείων, πληροφορίες σχετικά με τις βλάβες (π.χ. αιτία, συχνότητα, χρόνος αποκατάστασης) και την λειτουργία των προστασιών, στατιστικά στοιχεία για την λειτουργία των μέσων ρύθμισης και τους χειροκίνητους χειρισμούς.

Αντίστοιχα, στο σύστημα τηλεελέγχου πραγματοποιούνται οι ακόλουθες βασικές διαδικασίες:

- *Τηλεενδείξεις*, οι οποίες αφορούν τη συνεχή παρακολούθηση των θέσεων των διακοπών και των ενδείξεων αλλαγής.
- *Τηλεμετρήσεις*, οι οποίες στα παλαιότερα ΚΕΔΔ πραγματοποιούνται μετά από εντολή των χειριστών ενώ στα πιο σύγχρονα αυτομάτως ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα
- *Τηλεχειρισμοί*, οι οποίοι γίνονται αποκλειστικά από τους χειριστές.

Στο σχήμα 4.39, παρουσιάζεται ενδεικτικά η δομή της ροής πληροφοριών μεταξύ ΚΕΔΔ και Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα διανομής, το οποίο περιλαμβάνει τρεις βαθμίδες επικοινωνίας:

1. Στην πρώτη βαθμίδα πραγματοποιείται η επικοινωνία του ΚΕΔΔ με τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ μέσω του συστήματος τηλεελέγχου.
2. Η δεύτερη βαθμίδα πραγματοποιεί την επικοινωνία του ΚΕΔΔ με διακόπτες καθώς και πυκνωτές ή ρυθμιστές τάσης που βρίσκονται κατά μήκος των γραμμών ΜΤ.
3. Η τρίτη βαθμίδα, σε συνδυασμό με την αυτόματη διαχείριση φορτίου, πραγματοποιεί την επικοινωνία μεταξύ του ΚΕΔΔ και των καταναλωτών ΧΤ και ΜΤ. Στην τρίτη βαθμίδα εκτελείται η τηλεανάγνωση των μετρητών, ενώ στα πλαίσια της Διαχείρισης Φορτίου, επιτυγχάνεται η βέλτιστη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας από τον καταναλωτή. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται κατάλληλες διατάξεις μετρητών, οι οποίοι περιλαμβάνουν μικροεπεξεργαστή και επικοινωνούν τόσο με το ΚΕΔΔ όσο και με τις συσκευές κατανάλωσης. Στα σύγχρονα δίκτυα διανομής, η τρίτης βαθμίδα επιτυγχάνεται μέσω Αυτοματοποιημένου. Ως μέσω επικοινωνίας, χρησιμοποιείται το ίδιο το δίκτυο ισχύος σε συνδυασμό με άλλα μέσα επικοινωνίας όπως τηλεφωνικές γραμμές, οπτικές ίνες κ.α. [1, κεφ. 8.3].



Σχήμα 4.39: Ενδεικτική ροή πληροφοριών από και προς το ΚΕΔΔ [1, κεφ. 8.3].

4.8 Βέλτιστη Ανάπτυξη Δικτύων Διανομής

4.8.1 Γενικά

Η ανάπτυξη των δικτύων διανομής, δηλαδή η προσθήκη νέων γραμμών και εξοπλισμού στο υπάρχον δίκτυο και/ή η αντικατάσταση των υφιστάμενων, γίνεται με σκοπό να ικανοποιηθούν νέες ανάγκες ζήτησης και εξυπηρέτησης των καταναλωτών. Μια τέτοια διαδικασία γίνεται σταδιακά έτσι ώστε να μην δημιουργηθεί κάποιο πρόβλημα στην εξυπηρέτηση των καταναλωτών. Ο σημαντικότερος παράγοντας της ανάπτυξης δικτύων διανομής αποτελεί το κόστος. Σε αυτό, πέραν του κατασκευαστικού κόστους των νέων έργων πρέπει να συμπεριληφθούν οι δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης που θα ακολουθήσουν καθώς και οι επιβαρύνσεις λόγω απωλειών. Εξίσου σημαντικό είναι η διατήρηση του βαθμού αξιοπιστίας του καταναλωτή σε υψηλά επίπεδα κατά τη διάρκεια που δίκτυο διανομής βρίσκεται υπό καθεστώς ανάπτυξης [1, κεφ. 9.1].

4.8.2 Ανάλυση κόστους

Το συνολικό κόστος της ανάπτυξης περιλαμβάνει το κόστος επένδυσης καθώς και τις δαπάνες λόγω λειτουργίας, απωλειών και συντήρησης καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης. Επειδή η ανάπτυξη του δικτύου πραγματοποιείται σε μεγάλο βάθος χρόνου, η σωστή εκτίμηση για το συνολικό κόστος κάθε

έργου πρέπει να γίνει αφού πρώτα γίνει αναγωγή της αξίας όλων των έργων σε μία ορισμένη χρονική στιγμή. Συνήθως σαν σημείο αναφοράς, λαμβάνεται το τέλος του έτους μηδέν. Αφού γίνει η αναγωγή των δαπανών στο σημείο αναφοράς, το συνολικό κόστος για την κατασκευή και εκμετάλλευση ενός έργου, για μια περίοδο n χρόνων, υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$C_n^0 = \sum_{t=1}^n \frac{C_1(t) + C_2(t) + C_3(t) + C_4(t)}{(1+i)} - \frac{C_n'}{(1+i)^n} \quad (4.79)$$

όπου

i : συντελεστής αναγωγής στην παρούσα αξία.

$C_1(t)$: το σύνολο των επενδυτικών δαπανών που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια του έτους t . Περιλαμβάνει το κόστος νέου εξοπλισμού, απολήξεων και τροποποιήσεων των εγκαταστάσεων. Από αυτό αφαιρείται η αξία των υλικών που αποξηλώνονται.

$C_2(t)$: το σύνολο των δαπανών λόγω απωλειών ισχύος που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια του έτους t .

$C_3(t)$: το σύνολο των δαπανών για την εκμετάλλευση του έργου κατά τη διάρκεια του έτους t .

$C_4(t)$: το κόστος λόγω υποβάθμισης του βαθμού της ποιότητας εξυπηρέτησης κατά τη διάρκεια του έτους t .

C_n' : η αξία χρήσεως κατά το έτος n του συνόλου των επενδύσεων που πραγματοποιήθηκαν στην περίοδο $0-n$ [1, κεφ. 9.2-9.3].

4.8.3 Σχεδιασμός ανάπτυξης των δικτύων

Κατά τον σχεδιασμό ανάλυσης, σε πρώτο στάδιο μελετάται η κατάσταση του υφιστάμενου δικτύου διανομής, η οποία χαρακτηρίζεται σαν εναρκτήριο σημείο (έτος μηδέν) της μελέτης. Στη συνέχεια, γίνεται εκτίμηση της εξέλιξης του φορτίου για όλο το διάστημα της μελέτης. Σύμφωνα με αυτά, αναπτύσσονται διάφορες εναλλακτικές λύσεις σχετικά με τα τεχνικά έργα που πρέπει να εκτελεστούν και τη διάρκεια τους, τα οποία ωστόσο, δεν θα αλλοιώσουν την εξυπηρέτηση του καταναλωτή. Τελικά η λύση που επιλέγεται είναι αυτή με το βέλτιστο τεχνοοικονομικό όφελος, δηλαδή είναι αυτή με το μικρότερο συνολικό κόστος (από την αρχή έως το τέλος της μελέτης) και εμφανίζει τα υψηλότερα επίπεδα εξυπηρέτησης καταναλωτή.

Οι βασικές μέθοδοι μελετών ανάπτυξης είναι η εμπειρική, η οποία ενδείκνυται για βραχυπρόθεσμες μελέτες ανάπτυξης, και η αναλυτική, η οποία ενδείκνυται για μακροπρόθεσμες μελέτες ανάπτυξης. Κατά την εμπειρική μέθοδο, αφού εκτιμηθεί η κατάσταση του υφιστάμενου δικτύου και προσδιοριστεί η βέλτιστη συνδεσμολογία, υπολογίζεται η μεταβολή κάθε φορτίου διαδοχικά για κάθε έτος της μελέτης. Βάση αυτών επιλέγεται η νέα συνδεσμολογία, και προσδιορίζονται «εμπειρικά» οι ανάγκες ανάπτυξης του δικτύου έτσι ώστε να διατηρείται η βέλτιστη λειτουργία του και ο υψηλός βαθμός εξυπηρέτησης. Κατά την αναλυτική μέθοδο, δημιουργείται μια *αντικειμενική συνάρτηση κόστους* για όλη την διάρκεια της ανάπτυξης. Σύμφωνα με αυτά που αναπτύχθηκαν στην εισαγωγική παράγραφο και με την εφαρμογή μεθόδων επιχειρησιακής έρευνας, επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους. Συχνά, στα πλαίσια της ανάπτυξης ενός δικτύου, οι δύο μέθοδοι μπορούν να συνδυαστούν [1, κεφ. 9.4].

4.9 Συμπεράσματα

Η μελέτη των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί το βασικότερο στόχο αυτού του 4^{ου} κεφαλαίου. Αρχικά, με γνώμονα τη διαμόρφωση και τη δομή των ηλεκτρικών δικτύων διανομής, γίνεται μία προσπάθεια διαχωρισμού και κατηγοριοποίησης αυτών, με ταυτόχρονη παράθεση διατάξεων και χρήσιμου εξοπλισμού αυτών.

Κατόπιν, πραγματοποιείται προσέγγιση της εκτίμησης των μεταβολών του φορτίου που χρησιμεύει στην καθοδήγηση για την ανάπτυξη και την εξέλιξη των δικτύων. Αυτή πραγματοποιείται διαμέσου των καμπυλών φορτίου και των διάφορων συντελεστών ζήτησης, ομοιομορφίας και πολλών άλλων.

Έπειτα, γίνεται αναφορά στην ποιότητα εξυπηρέτησης των καταναλωτών σε ενέργεια, με βασικό στόχο την αδιάληπτη παροχή ενέργειας με αξιοπιστία και σταθερότητα.

Στη συνέχεια, γίνεται μία παράθεση των βασικών μαθηματικών σχέσεων που διέπουν τα ηλεκτρικά και γίνεται η κατάλληλη και εκτενής επεξήγηση των υπολογισμών αυτών, σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας και σε ακραίες περιπτώσεις ζήτησης.

Ακολούθως, αναφέρονται οι τρόποι με τους οποίους επιτυγχάνεται έλεγχος και ρύθμιση της ηλεκτρικής τάσης, ενώ παράλληλα αναφέρονται και βασικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται στην προστασία των ηλεκτρικών δικτύων.

Εν κατακλείδι, δίνεται σημασία στους αυτόματους τρόπους ελέγχου των δικτύων για τη βέλτιστη επίβλεψη της λειτουργίας αυτών, ενώ συνάμα προσεγγίζεται περιγραφικά η βέλτιστη ανάπτυξη των δικτύων εισάγοντας τον παράγοντα του κόστους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

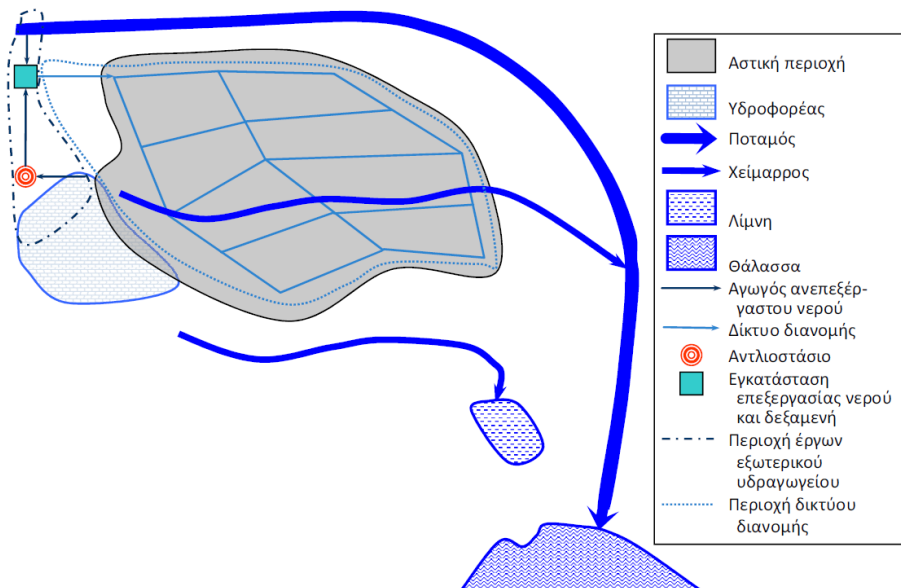
ΔΙΚΤΥΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

5.1 Διαμόρφωση δικτύων ύδρευσης

5.1.1 Εισαγωγή

Ένα δίκτυο ύδρευσης περιλαμβάνει το σύνολο διαδικασιών εξόρυξης και μεταφοράς ακατέργαστου νερού στις μονάδες επεξεργασίας, αποθήκευσης του καθαρού νερού στις δεξαμενές και στη συνέχεια μεταφοράς και διανομής του στους καταναλωτές. Η μεταφορά (εξωτερικό υδραγωγείο) και η διανομή (εσωτερικό υδραγωγείο) είναι ουσιαστικά παρόμοιες διαδικασίες, κατά τις οποίες το νερό μεταφέρεται μέσω ενός δικτύου σωληνώσεων (με τη χρήση αντλιών όταν χρειάζεται να επιτευχθεί η απαραίτητη πίεση) και αποθηκεύεται ανά διαστήματα. Η διαφορά μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού υδραγωγείου έγκειται στο σκοπό που ικανοποιούν στο δίκτυο, στοιχείο που καθορίζει και την διαμόρφωση τους. Ενδεικτικά, η δομή ενός αστικού δικτύου ύδρευσης δείχνεται στο σχήμα (5.1). Κατά κύριο λόγο, ένα τυπικό αστικό δίκτυο ύδρευσης απαρτίζεται από τα ακόλουθα τμήματα:

1. το σύστημα υδροληψίας ή συλλογής νερού από την πηγή ή τις πηγές νερού,
2. τους σταθμούς επεξεργασίας ή καθαρισμού,
3. το δίκτυο μεταφοράς ή εξωτερικό υδραγωγείο, το οποίο περιλαμβάνει το σύστημα μεταφοράς νερού από τις πηγές υδροληψίας στις δεξαμενές αποθήκευσης και από εκεί
4. στο δίκτυο διανομής ή εσωτερικό υδραγωγείο, το οποίο αποτελεί το δίκτυο των αγωγών που διανέμουν το επεξεργασμένο νερό στους καταναλωτές [11, κεφ.6].

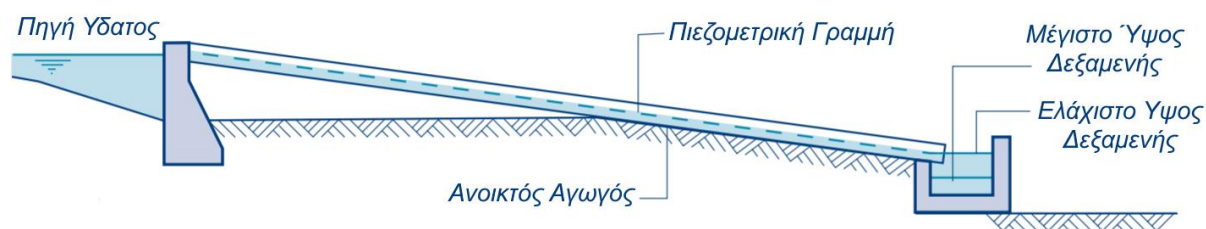


Σχήμα 5.1: Τυπική διάταξη δικτύου ύδρευσης σε αστικό περιβάλλον [11].

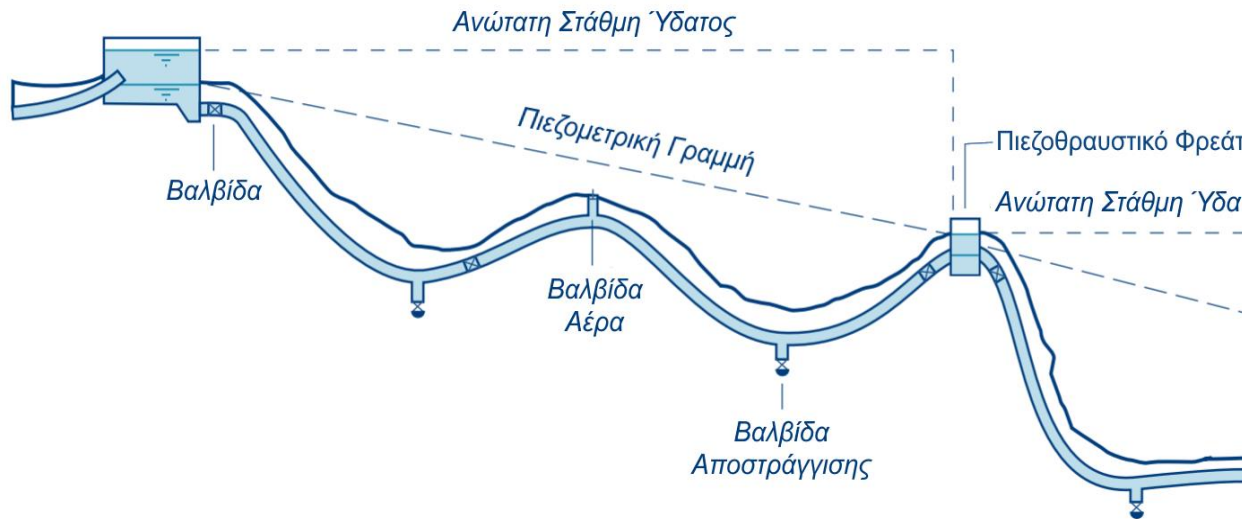
5.1.2 Εξωτερικό Υδραγωγείο

Τα εξωτερικό υδραγωγείο ή σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει ένα δίκτυο από κύριες γραμμές μεταφοράς υψηλής και αρκετά σταθερής παροχής νερού. Το εξωτερικό υδραγωγείο χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ακάθαρτου νερού, αλλά και καθαρού στα πλαίσια μεταφοράς του από δεξαμενές καθαρού νερού προς το εσωτερικό υδραγωγείο, χωρίς ωστόσο να εξυπηρετεί απευθείας τον καταναλωτή. Ο σχεδιασμός και η διαμόρφωση του εξωτερικού υδραγωγείου διαφοροποιείται ανάλογα την τοπογραφία και τις συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε περιοχή. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις μεγάλης διάρκειας ή περιοχές με συγκεκριμένη τοπολογία το υδραγωγείο περιλαμβάνει ενδιάμεσα μέσα αποθήκευσης ή ενισχυτικά αντλιοστάσια. Συνήθως, το εξωτερικό υδραγωγείο αναπτύσσεται εκτός αστικού περιβάλλοντος. Τα βασικά είδη αγωγών εξωτερικού υδραγωγείου είναι οι ακόλουθα:

- 1) Ανοικτοί αγωγοί ή Αγωγοί ελεύθερης επιφάνειας: Στους αγωγούς αυτούς το νερό ρέει δημιουργώντας ελεύθερη επιφάνεια. Η πίεση στην επιφάνεια του νερού διατηρείται ίση με την ατμοσφαιρική. Η ροή του νερού προκαλείται λόγω της βαρύτητας ενώ δυνάμεις ιξώδους και οι δυνάμεις τριβής με τα τοιχώματα τείνουν να επιβραδύνουν τη ροή. Κατά τον σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων, η κλίση των αγωγών ενδείκνυται να είναι ομοιόμορφη και κοντά στην τιμή της κλίσης της πιεζομετρικής γραμμής. Παραδείγματα ανοικτών αγωγών αποτελούν τα κανάλια, οι σήραγγες, τα υδραγωγεία, καθώς και μερικώς γεμάτοι αγωγοί. Ενδεικτικά, η δομή των αγωγών ελεύθερης επιφάνειας φαίνεται στο σχήμα (5.2). Κατά κανόνα, οι ανοικτοί αγωγοί χρησιμοποιούνται μόνο για τη μεταφορά ανεπεξέργαστου νερού, καθώς υπάρχει ο κίνδυνος μόλυνσης του καθαρού νερού αν χρησιμοποιηθούν μετά τις μονάδες επεξεργασίας.
- 2) Κλειστοί Αγωγοί: Στην περίπτωση των κλειστών αγωγών (μπορεί να είναι και μία πλήρως γεμάτη σήραγγα) η ροή προκαλείται λόγω της ύπαρξης μιας διαφοράς πίεσης. Οι αγωγοί αυτοί μπορούν να τοποθετηθούν τόσο κατηφορικά, όσο και ανηφορικά, αρκεί να βρίσκονται κάτω από την υδραυλική γραμμή, έτσι ώστε να υπάρχει μια ελάχιστη πίεση στους αγωγούς. Ενδεικτικά, η δομή ενός εξωτερικού υδραγωγείου που απαρτίζεται από κλειστούς αγωγούς φαίνεται στο σχήμα (5.3) [2, κεφ.7].



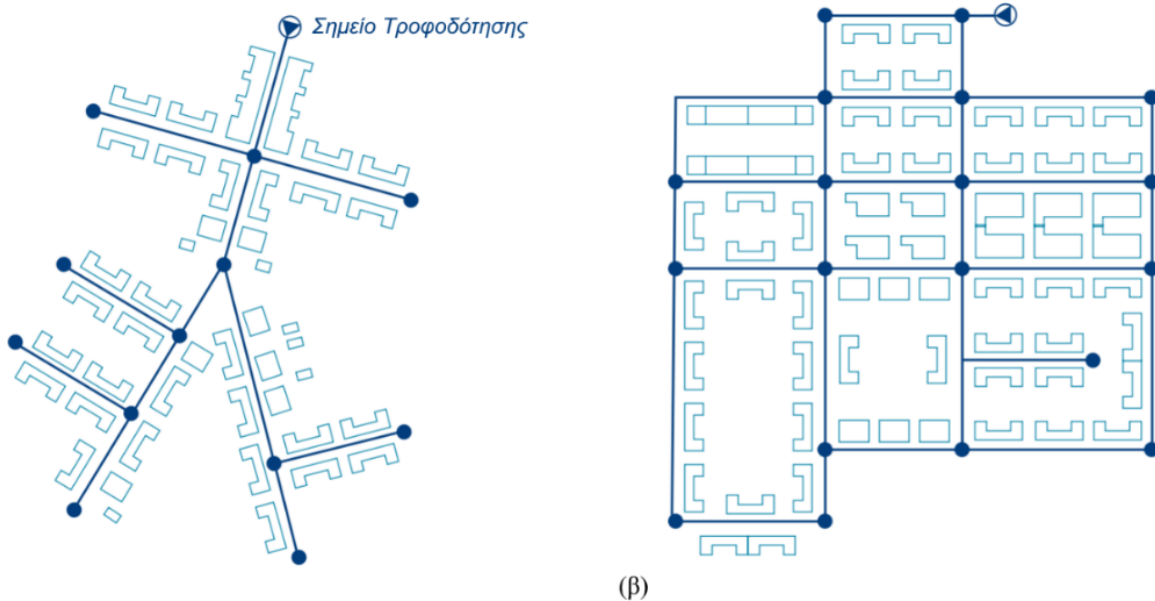
Σχήμα 5.2: Ενδεικτική δομή αγωγών εξωτερικού υδραγωγείου με αγωγούς ελεύθερης επιφάνειας. Διαμορφώθηκε από [51].



Σχήμα 5.3: Ενδεικτική δομή αγωγών εξωτερικού υδραγωγείου με αγωγούς κλειστού τύπου. Διαμορφώθηκε από [51].

5.1.3 Εσωτερικό Υδραγωγείο

Το εσωτερικό υδραγωγείο ή σύστημα διανομής απαρτίζεται από ένα δίκτυο κλειστών αγωγών μικρότερης διατομής, το οποίο εξασφαλίζουν τη διανομή του νερού από τις δεξαμενές αποθήκευσης στους τελικούς καταναλωτές.



Σχήμα 5.4: Ενδεικτική διάταξη αγωγών εσωτερικού υδραγωγείου με α) ακτινική διάταξη και β) βρογχοειδή διάταξη. Διαμορφώθηκε από [51].

Το εσωτερικό υδραγωγείο λειτουργεί σωστά όταν εξασφαλίζει την παροχή επεξεργασμένου νερού υπό πίεση ικανοποιώντας τη ζήτηση των καταναλωτών καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Επειδή η ζήτηση του νερού ποικίλλει σημαντικά στη διάρκεια της ημέρας ή ανάλογα την εποχή, δημιουργούνται συνεχείς διακυμάνσεις στη ροή του νερού εντός του δικτύου, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό του εσωτερικού υδραγωγείου. Κατά κύριο λόγο, οι αγωγοί εσωτερικού υδραγωγείου παρουσιάζουν τις ακόλουθες διατάξεις ή συνδυασμό αυτών [2, κεφ.7]:

- 1) **Ακτινική Διάταξη:** Η τροφοδότηση του δικτύου λαμβάνει χώρα από ένα μοναδικό σημείο και κάθε σημείο εξόδου τροφοδοτείται από μία και μόνο διαδρομή. Ενδεικτικά, η δομή ενός εσωτερικού υδραγωγείου με ακτινική διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα (5.4 (α)). Η δομή των δικτύων καθιστά τον σχεδιασμό τους σχετικά απλό, καθώς η κατεύθυνση και οι παροχές του νερού μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα. Το κόστος κατασκευής των δικτύων αυτό δεν είναι υψηλό, καθώς μια τέτοια διάταξη ελαχιστοποιεί το μήκος των απαιτούμενων αγωγών. Ωστόσο, η ακτινική διάταξη συνοδεύεται και από ένα σημαντικό αριθμό προβλημάτων. Πιο συγκεκριμένα, τα δίκτυα ακτινικής διάταξης εμφανίζουν χαμηλή αξιοπιστία, καθώς σε περίπτωση βλάβης ενός τμήματός του διακόπτεται η παροχή νερού στους καταναλωτές μέχρι να αποκατασταθεί το πρόβλημα. Ακόμα, η κυμαινόμενη ζήτηση νερού μπορεί να προκαλέσει μεγάλες διακυμάνσεις της πίεσης στο δίκτυο. Τέλος, υπάρχουν αρκετά σημεία του δικτύου που είτε μένουν χωρίς νερό για μεγάλο διάστημα (π.χ. σε απομακρυσμένες περιοχές), είτε σημεία που το νερό μένει στάσιμο (π.χ. σε αδιέξοδα), στα οποία δημιουργείται ο κίνδυνος μόλυνσής του νερού.
- 2) **Βροχοειδή διάταξη:** Η τροφοδότηση του δικτύου γίνεται από ένα ή περισσότερα σημεία, ενώ οι αγωγοί του σχηματίζουν κλειστές διαδρομές εντός του δικτύου. Συχνά, τα βροχοειδή δίκτυα απαρτίζονται από δευτερεύοντα κύρια δίκτυα τα οποία έχουν είτε ακτινική, είτε βροχοειδή δομή. Ενδεικτικά, η δομή ενός εσωτερικού υδραγωγείου με βροχοειδή διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα (5.4 (β)). Σε αντίθεση με τα ακτινικά δίκτυα, ο σχεδιασμός των βροχοειδών δικτύων είναι αρκετά σύνθετος. Παράλληλα, το κόστος κατασκευής τους είναι αρκετά υψηλό, επειδή πέρα των αγωγών, χρησιμοποιούνται περαιτέρω εξοπλισμός όπως βαλβίδες, φρεάτια πιεζοθραύσης κ.α.. Κατά την λειτουργία τους, τα βροχοειδή δίκτυα εμφανίζουν λιγότερες ενεργειακές απώλειες σε σύγκριση με τα ακτινικά. Τέλος, τα βροχοειδή δίκτυα εμφανίζουν το πλεονέκτημα ότι σε περίπτωση βλάβης υπάρχει η δυνατότητα τροφοδότησης του καταναλωτή από διαφορετική διαδρομή [2, κεφ.7].

5.2 Ανάλυση και Εκτίμηση Ζήτησης Νερού

5.2.1 Γενικά περί υδατικών χρήσεων

Ο σχεδιασμός και η διαμόρφωση ενός δικτύου ύδρευσης πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες ζήτησης του συνόλου των καταναλωτών. Ακόμα, θα πρέπει να μελετηθεί και να σχεδιαστεί κατά τρόπο, που να ικανοποιεί τις ανάγκες σε πίεση και ποιότητα. Συγκεκριμένα, η εκτίμηση, η πρόβλεψη και η εξέλιξη με το χρόνο των μελλοντικών καταναλώσεων

είναι απαραίτητα, τόσο για τη σύνταξη ολοκληρωμένης μελέτης και το προγραμματισμό της σχεδίασης νέων συστημάτων ύδρευσης ή την ανάπτυξη αυτών, όσο και για τη γρήγορη ανταπόκριση στις ανάγκες των εγκαταστάσεων που προκύπτουν στα υφιστάμενα δίκτυα ύδρευσης. Το πιο κρίσιμο σημείο που πρέπει να προσδιορίζεται με ακρίβεια, καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συνολική συμπεριφορά και ανταπόκριση ενός δικτύου διανομής νερού, είναι η ζήτηση νερού στους κόμβους [10,κεφ.1].

5.2.2 Συνολική ζήτηση

Η ζήτηση νερού είναι ουσιαστικά η κινητήρια δύναμη, υπεύθυνη για πρόκληση υδραυλικής δυναμικής σ' ένα δίκτυο διανομής ύδατος. Σ' ένα τέτοιο δίκτυο, το νερό μπορεί να το εγκαταλείψει σε οποιοδήποτε σημείο, το οποίο σε αυτήν την περίπτωση αποτελεί και σημείο ζήτησης ή αλλιώς σημείο κατανάλωσης. Αυτό μπορεί να είναι ιδιωτική παροχή, διαρροή κ.α. Σημειώνεται ότι το σύνολο της ζήτησης νερού περιλαμβάνει τους εξής τομείς:

- *Οικιακή χρήση.* Πρόκειται για το νερό που καλύπτει τις ανάγκες ενός σπιτιού, όπως είναι η πόση, το μαγείρεμα, η καθαριότητα, η διατήρηση του πρασίνου σε έναν κήπο, το πλύσιμο των αυτοκινήτων και άλλες οικιακές ανάγκες.
- *Βιομηχανία,* δηλαδή το νερό που καλύπτει τις ανάγκες της βιομηχανίας για ενσωμάτωση στο τελικό προϊόν, ψύξη, καθαρισμό κτλ.
- *Παραγωγή ενέργειας* και συγκεκριμένα η ποσότητα νερού για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας ή για την ψύξη θερμοηλεκτρικών σταθμών (απώλειες πύργου ψύξης).
- *Εμπορική χρήση,* περιλαμβάνει το νερό που καλύπτει τις ανάγκες εμπορικών κέντρων, γραφείων, ξενοδοχείων, εστιατορίων κτλ.
- *Δημόσια χρήση,* δηλαδή το νερό που καλύπτει τις ανάγκες δημοσίων και δημοτικών πάρκων, νοσοκομείων, σχολείων, δημοσίων υπηρεσιών, στρατώνων κτλ.
- *Πυρόσβεση,* όπου υπολογίζεται το νερό που διατίθενται για καταστολή πυρκαγιών.
- *Τουρισμός,* όπου το νερό της οικιακής και εμπορικής χρήσης αυξάνεται σημαντικά, λόγω της περιοδικής αύξησης του πληθυσμού.
- *Αγροτική και κτηνοτροφική χρήση.* Πρόκειται για το νερό που χρησιμοποιείται στο πότισμα αγροτεμαχίων, θερμοκηπίων και γενικότερα αγροτικών εκτάσεων, ενώ συνάμα χρησιμοποιείται και για τις ανάγκες των ζώων, μικρών και μεγάλων, που υδρεύονται από το δίκτυο ύδρευσης σε γεωργικούς οικισμούς και κτηνοτροφικές μονάδες [11,κεφ.7].

5.2.3 Διακύμανση κατανάλωσης

Για την ορθή μελέτη ενός δικτύου ύδρευσης απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί και ο υπολογισμός των απωλειών νερού, που συνήθως κυμαίνονται στο 20-30% της ολικής κατανάλωσης νερού και είναι γνωστές και ως μη τιμολογημένο νερό. Οι απώλειες του δικτύου ύδρευσης διακρίνονται στις πραγματικές απώλειες, οι οποίες αφορούν τις απώλειες λόγω διαρροών και θραύσεων στους αγωγούς, αλλά και υπερχειλίσεων στις δεξαμενές, και τις φαινόμενες απώλειες, οι οποίες οφείλονται σε υπομετρήσεις, μη εξουσιοδοτημένες καταναλώσεις, σφάλματα ανάγνωσης μετρητών, χειρισμού

δεδομένων και εσφαλμένης τιμολόγησης. Ο περιορισμός των απωλειών σε επίπεδα χαμηλότερα του 10% πολλές φορές κρίνεται ασύμφορος οικονομικά, δεδομένου ότι οι δαπάνες που απαιτούνται για τις επιδιορθώσεις των δικτύων έχουν υψηλότερο κόστος από το κόστος του χαμένου νερού.

Επιπροσθέτως, διακυμάνσεις στην κατανάλωση ενός δικτύου ύδρευσης μπορεί να οφείλεται στην αύξηση του πληθυσμού και των αρδευόμενων εκτάσεων, στην αστικοποίηση, καθώς και στην άνοδο του πολιτιστικού επιπέδου και τη δημιουργία νέων αναγκών

Το κλίμα κάθε περιοχής είναι σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την κατανάλωση νερού. Τους σημαντικότερους κλιματικούς παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση νερού αποτελούν η βροχή και η θερμοκρασία. Τα δύο αυτά κλιματικά φαινόμενα παρουσιάζουν μεγάλη συσχέτιση με τις ποσότητες του νερού που απαιτούνται σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Συγκεκριμένα, η ζήτηση για νερό φαίνεται να επηρεάζεται και να αυξάνεται σημαντικά όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή, δηλαδή κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου οι ανθρώπινες δραστηριότητες που συμπεριλαμβάνουν την κατανάλωση νερού είναι ιδιαίτερα αυξημένες, ξεκινώντας από το πιο λογικό που είναι η αύξηση των ωρών ποτίσματος ενός κήπου μέχρι το ατομικό επίπεδο, όπου αυξάνεται η ανάγκη για συχνότερη προσωπική καθαριότητα. Από την άλλη μεριά και στο ακραίο φαινόμενο του κρύου επίσης μπορεί να υπάρχει αρκετά αυξημένη κατανάλωση κυρίως λόγω φόβου για εμφάνιση πάγου εντός των σωλήνων του δικτύου, οπότε και επιδιώκεται τεχνητή συνεχόμενη ροή, η οποία όμως και πάλι έχει αρνητικά αποτελέσματα ως προς την κατανάλωση ύδατος. Σε αυτό το σημείο γίνεται πλήρως αντιληπτό πως οι μεταβολές που υφίσταται η κατανάλωση ανάλογα με την εποχιακή ζήτηση είναι σημαντικός παράγοντας και καθοριστικός για τη σωστή ανάπτυξη και σχεδιασμό ενός δικτύου ύδρευσης [12],[52].

5.2.4 Πρόβλεψη κατανάλωσης

Η πρόβλεψη κατανάλωσης νερού βασίζεται στην εκτίμηση της προβλεπόμενης αύξησης ή μείωσης του πληθυσμού της εκάστοτε περιοχής. Αυτό γίνεται με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων που προβλέπουν τη μεταβολή πληθυσμού. Τα κυριότερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι τα ακόλουθα [10, κεφ.1]:

- Μοντέλο σταθερής αύξησης ή μείωσης πληθυσμού.
- Μοντέλο γεωμετρικής αύξησης ή μείωσης πληθυσμού.
- Μοντέλο φθίνοντος ρυθμού αύξησης ή μείωσης πληθυσμού.
- Λογιστική καμπύλη, κ.α.

5.2.5 Ειδικές μόνιμες φορτίσεις δικτύου

5.2.5.1 Εισαγωγή

Η γεωργία είναι ίσως ο μεγαλύτερος καταναλωτής νερού, με συμμετοχή που ανέρχεται στο 70% σε παγκόσμιο επίπεδο και μεταξύ 75 και 80% στην Ελλάδα. Συνεπώς, εμφανίζει ιδιαίτερη βαρύτητα η ανάλυση τόσο της υφιστάμενης, όσο και της μελλοντικής κατάστασης, που διαμορφώνει αυτό το επίπεδο ζήτησης και η διερεύνηση δυνατοτήτων εξοικονόμησης νερού μέσα από κατάλληλες ενέργειες και παρεμβάσεις [52].

5.2.5.2 Φυτά και αρδεύσεις

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και από το εισαγωγικό κεφάλαιο η μεγαλύτερη χρήση του νερού επιτυγχάνεται για γεωργικές δραστηριότητες. Ο κύριος λόγος που η άρδευση είναι σημαντική για τη γεωργία, είναι πως μέσα από αυτήν οι καλλιέργειες μπορεί να πολλαπλασιαστούν και να αποφέρουν περισσότερα έσοδα σε αυτούς που την εκμεταλλεύονται. Εκτός όμως από τον εμπλουτισμό των καλλιεργειών η άρδευση αποσκοπεί και στη διασφάλιση καταστροφής της σοδειάς από λειψυδρίες που πολύ συχνά συμβαίνουν εξαιτίας χαμηλών βροχοπτώσεων. Γι' αυτόν τον λόγο είναι σημαντικό να δημιουργούνται σωστές και αξιόπιστες εγκαταστάσεις άρδευσης. Σε διεθνές ωστόσο επίπεδο σαν βασικός στόχος της άρδευσης είναι η εξασφάλιση της παραγωγής τροφίμων.

Σαφώς, η ανάγκη για άρδευση εντείνεται σε περιοχές που διαθέτουν υψηλά επίπεδα ξηρασίας, όπου το πλήθος των καλλιεργειών που μπορούν να συντηρηθούν και να αναπτυχθούν είναι πολύ μικρότερος σε σύγκριση με άλλες περιοχές που διατηρούν αρκετά καλά επίπεδα υδροφόρου ορίζοντα. Σε τέτοιες περιοχές όταν εγκαθίσταται αρδευτικό σύστημα, είναι δυνατό να τριπλασιαστεί ο αριθμός των καλλιεργούμενων προϊόντων και επομένως να υπάρξει και ανάλογη αύξηση των εσόδων των αγροτών. [52].

5.2.5.3 Ανάγκες σε αρδευτικό νερό

Με τον όρο "ανάγκες σε αρδευτικό νερό" εννοούνται οι παραπάνω ποσότητες νερού που είναι αναγκαίες για την ανάπτυξη των φυτών ή των καλλιεργειών εκτός από αυτές που προσφέρονται από τη φύση. Εκτός όμως από το νερό που χρησιμοποιείται εξολοκλήρου για την ανάπτυξη των καλλιεργειών μέσα σε αυτό τον όρο συμπεριλαμβάνεται και το νερό που χάνεται μέχρι να αποδοθεί στα φυτά, είτε λόγω εξάτμισης, είτε λόγω βλαβών σε διάφορα σημεία του αρδευτικού συστήματος, ακόμη και το νερό που χρησιμοποιείται για την περιποίηση ή την προστασία αυτών.

Για τον υπολογισμό των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό, αντικειμενικός σκοπός είναι να υπολογισθεί το απαραίτητο νερό για τον ανεφοδιασμό των καλλιεργειών, ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή ανάπτυξη και βελτιστοποίηση της απόδοσής τους σε συνδυασμό με την υψηλή ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων. Για τη ζήτηση αυτή πρέπει να υπολογιστεί η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, δηλαδή η εξάτμιση από το έδαφος, το φυτό και το φύλλωμα. Η εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται από την περίοδο ανάπτυξης, την πυκνότητα του φυλλώματος, την πυκνότητα του ριζικού συστήματος και τις αποστάσεις μεταξύ των φυτών μέσα στην καλλιέργεια.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής υποθέτουν συνήθως ότι υπάρχει πάντα επαρκές διαθέσιμο νερό στο έδαφος, το οποίο καταναλίσκεται με την εξατμισοδιαπνοή. Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς αποτελεί την εξατμισοδιαπνοή από μια επιφάνεια πλήρως καλυμμένη από γρασίδι ομοιόμορφου ύψους 8-15 cm, ελεύθερου από οποιαδήποτε ασθένεια με επαρκές διαθέσιμο εδαφικό νερό για την ανάπτυξη του [52].

5.2.5.4 Παροχές σχεδιασμού αρδευτικών δικτύων

Βασικός στόχος του εσωτερικού δικτύου ύδρευσης είναι η ικανοποίηση της ζήτησης του νερού καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Οι αλλαγές των καταναλώσεων μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο μιας τυχαίας ημέρας μπορεί να κυμανθεί από 0,2 έως 2 φορές τη μέση ημερήσια παροχή. Γενικά ο υπολογισμός

της παροχής για το σχεδιασμό των δικτύων ύδρευσης στηρίζεται στη μέγιστη ωριαία παροχή, Q_h^{max} , η οποία προκύπτει από την ήδη γνωστή μέση τιμή της ημερήσιας παροχής ως γινόμενο με τον κατάλληλο πολλαπλασιαστικό συντελεστή. Το χειρότερο σενάριο αποτελεί η περίπτωση που η μέγιστη ημερήσια παροχή, Q_d^{max} , ως σύνολο με την παροχή που χρειάζεται για την καταστολή των πυρκαγιών, Q_f , έχουν μεγαλύτερη τιμή από τη μέγιστη ωριαία, τότε ως τιμή παροχής σχεδιασμού λαμβάνεται το σύνολο των δύο παροχών που προαναφέρθηκαν. Στις περισσότερες των περιπτώσεων η μέγιστη ωριαία παροχή είναι μεγαλύτερη και για αυτό τον λόγο λαμβάνεται ως παροχή σχεδιασμού [52].

5.2.6 Ειδικές φορτίσεις ανάγκης δικτύου

Ο προσδιορισμός και η εκτίμηση των αναγκών σε νερό σε ποικίλους τομείς δραστηριοτήτων είναι σημαντικό μέγεθος στη Στρατηγική Διαχείριση των Υδατικών Πόρων. Τα έργα αποθήκευσης και διανομής στοχεύουν στη ρύθμιση των ποσοτήτων διαθέσιμου νερού στο χώρο και στο χρόνο, έτσι ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες σε νερό που παρουσιάζουν μεγάλη χωρική και χρονική διακύμανση. Μέρος αυτής της μελέτης περιλαμβάνει και τις ειδικές φορτίσεις ανάγκης δικτύου, όπως είναι αυτή της πυρόσβεσης.

Ο όγκος του νερού που καταναλώνεται στην κατάσβεση πυρκαγιών προσδιορίζεται μέσα από εμπειρικούς τύπους και μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούν ως κύρια μεταβλητή τον πληθυσμό ενός οικισμού. Η παροχή κατάσβεσης πυρκαγιών μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση Camp and Lawler:

$$Q_f = 64,6\sqrt{P}(1 - 0,01\sqrt{P}) \quad (5.1)$$

όπου P ο πληθυσμός σε χιλιάδες κατοίκους.

Η παραπάνω παροχή πρέπει να διατηρείται για 4 ώρες για 1000 κατοίκους, 6 ώρες για 2000 κατοίκους, 8 ώρες για 4000 κατοίκους και 10 ώρες για 6000 και άνω κατοίκους [52].

5.3 Υδατικοί πόροι και ποιότητα υδρευτικού νερού

5.3.1 Γενικά περί υδάτινων πόρων

Μεγαλύτερο μέρος από το 70% της επιφάνειας της γης καλύπτεται από νερό. Ωστόσο η μεγαλύτερη ποσότητα ύδατος είναι παγιδευμένη στις θάλασσες και τους ωκεανούς. Οι κύριες μορφές με τις οποίες εμφανίζεται το νερό, καθώς και οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να αξιοποιηθεί για χρήση του στο υδρευτικό σύστημα, είναι οι ωκεανοί και θάλασσες όπου εφαρμόζεται η μέθοδος της αφαλάτωσης, οι λίμνες και τα νερά, όπου εφαρμόζεται υδροληψία, τα υπόγεια νερά, τα οποία αξιοποιούνται ανάλογα με το βάθος ύπαρξης τους με πηγάδια ή γεωτρήσεις, τα επιφανειακά νερά, στα οποία εφαρμόζονται ταμειυτήρες ή λιμνοδεξαμενές, και τα όμβρια νερά, για τα οποία χρησιμοποιούνται στέρνες. Σημειώνεται πως συνήθως εκμεταλλεύσιμοι υδάτινοι πόροι καθίστανται τα επιφανειακά και τα υπόγεια νερά.

Για να αποτελέσει εκμεταλλεύσιμη πηγή νερού ένας υδάτινος πόρος πρέπει να πληρούνται οι προδιαγραφές που περιγράφονται παρακάτω:

- Το κόστος εκμετάλλευσης: Οι εγκαταστάσεις στις οποίες συλλέγονται τα επιφανειακά νερά όπως φράγματα, ταμιευτήρες, αγωγοί έχουν τεράστιο κόστος, σε αντίθεση με το κόστος που απαιτείται για τη λειτουργία τους που είναι συνήθως μικρό. Αντίθετα οι πάγιες εγκαταστάσεις αξιοποίησης και περισυλλογής των υπόγειων νερών, όπως γεωτρήσεις και αντλιοστάσια, χαρακτηρίζονται από χαμηλό κατασκευαστικό κόστος, αλλά το κόστος είναι ιδιαίτερα αυξημένο όταν πρόκειται για τη λειτουργία και τη συντήρηση αυτών των εγκαταστάσεων, ενώ εξαρτάται και από το βάθος άντλησης του ύδατος.
- Η ποιότητα του νερού. Τα επιφανειακά νερά παρουσιάζουν ευκολότερη ρύπανση με την έννοια ότι είναι αρκετά εκτεθειμένα, αλλά η «εξυγίανση» τους αποτελεί πιο εύκολη υπόθεση από την αντίστοιχη των υπογείων, διότι έχουν μεν λιγότερες πιθανότητες έκθεσης σε βλαβερά στοιχεία, ωστόσο η απομάκρυνσή τους είναι αποτέλεσμα πιο σύνθετων διαδικασιών και απαιτεί συγκεκριμένες διατάξεις φίλτρανσης.
- Η ποσότητα του νερού. Συνήθως τα υπόγεια ύδατα αποτελούν πηγή για αρκετά χρόνια, ενώ τα επιφανειακά ύδατα παρουσιάζουν διακυμάνσεις ως προς τη διαθεσιμότητα στη διάρκεια του χρόνου.
- Οι επιπτώσεις που θα έχει στο περιβάλλον η δημιουργία εγκαταστάσεων για την εκμετάλλευση τους [11, κεφ.4].

5.3.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού

Ο έλεγχος για την ποιότητα του νερού πραγματοποιείται κάτω από καθορισμένες συνθήκες του νόμου ως προς τη μέθοδο που ακολουθείται για τη δειγματοληψία και ως προς τη χρονική απόκλιση των δειγμάτων. Ακόμη σε επίπεδο πηγών και δικτύων ύδρευσης επίσης υπάρχει συγκεκριμένη νομοθεσία για παρακολούθηση των ποιοτικών παραμέτρων (δοκιμαστική, ελεγκτική και συμπληρωματική αν χρειαστεί). Συγκεκριμένα, η δοκιμαστική παρακολούθηση στοχεύει στην παράθεση ανά τακτά χρονικά διαστήματα των δεδομένων και των αποτελεσμάτων της μικροβιολογικής και οργανικής ανάλυσης της ποιότητας του νερού, των οποίων οι τιμές πρέπει να διαπιστώνεται πως βρίσκονται εντός των ορίων που είναι αποδεκτές για την ανθρώπινη υγεία και αναφέρονται στην εκάστοτε νομοθεσία. Στη συνέχεια ακολουθεί η ελεγκτική παρακολούθηση που περιλαμβάνει τον εξονυχιστικό έλεγχο πολλών παραμέτρων, ώστε να εξεταστεί η καταλληλότητα του νερού σε σχέση με όλες τις προδιαγραφές που πρέπει να πληρούνται. Τέλος, πραγματοποιείται και συμπληρωματική παρακολούθηση μόνο αν υπάρχει το ενδεχόμενο να βρίσκονται ουσίες και μικροοργανισμοί σε ποσότητες που αποδεικνύονται βλαβερές για την υγεία του ανθρώπου [2, κεφ.2].

5.3.3 Πρότυπα ποιότητας του φυσικού νερού

Η κατάσταση στην οποία βρίσκεται ένα δίκτυο ύδρευσης παρουσιάζει μεγάλη εξάρτηση και αλληλοσύνδεση με την ποιότητα στην οποία βρίσκεται το νερό και αντίστροφα. Το νερό που χρησιμοποιείται για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών με κυριότερη αυτή της πόσης, αποτελεί το σημαντικότερο καταναλωτικό αγαθό, γεγονός που το μεταθέτει πρώτο στη βαθμίδα αυστηρότητας

ελέγχου όσον αφορά την ποιότητά του. Η προστασία της ποιότητας του νερού αφορά τη δημόσια υγεία. Για τη διασφάλιση της ποιότητας του νερού, οι αρμόδιες αρχές έχουν θεσπίσει οριακές τιμές για τις κυριότερες ποιοτικές παραμέτρους του νερού. Πιο συγκεκριμένα, οι ποιοτικές παράμετροι του νερού είναι:

- Οι οργανοληπτικές παράμετροι, δηλαδή η ανάλυση του χρώματος, της θολερότητας, της γεύσης και της οσμής του νερού.
- Οι χημικές παράμετροι, δηλαδή ο έλεγχος της θερμοκρασίας, της ενεργού οξύτητας, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, της αλκαλικότητας, της σκληρότητας, των στερεών και του ανόργανου και οργανικού φορτίου.
- Οι μικροβιολογικές παράμετροι, δηλαδή η παρουσία ιών, βακτηρίων, μυκήτων, φυκιών κ.α. [2, κεφ.2].

5.3.4 Λειτουργικές απαιτήσεις

Η σωστή και ομαλή λειτουργία των δικτύων ύδρευσης εξασφαλίζεται με την απαιτούμενη παροχή, ικανοποιητική ταχύτητα και την κατάλληλη πίεση (μετριέται με το ύψος πίεσης) στους κόμβους. Οι ελάχιστες πιέσεις για την ομαλή λειτουργία των δικτύων ύδρευσης για μονώροφα, δώροφα και τριώροφα κτήρια κυμαίνεται μεταξύ 12-15, 16-17 και 20-23 m, αντίστοιχα. Για πολυώροφα κτίρια αριθμού ορόφων n , για κάθε κόμβο του δικτύου απαιτείται ελάχιστο ύψος πίεσης p_{min} , το οποίο δίνεται από την προσεγγιστική σχέση:

$$p_{min} = 4(n + 1) \quad (5.2)$$

Για την αντιμετώπιση της ανεπαρκούς πίεσης που μπορεί να παρουσιάζεται στους κόμβους ενός δικτύου, προτιμάται συνήθως τοποθέτηση της δεξαμενής τροφοδότησης σε μεγαλύτερο υψομετρικά σημείο, αλλιώς και εάν αυτό δεν είναι εφικτό τότε προτείνεται η τοποθέτηση νέων αγωγών (τουλάχιστον των κρίσιμων) μεγαλύτερων διαμέτρων από τους προηγούμενους. Εάν έχουν εξαντληθεί οι παραπάνω λύσεις, τοποθετούνται αντλίες στα κρίσιμα σημεία. Το ανάγλυφο του εδάφους αποτελεί το πιο βασικό στοιχείο που πρέπει να συνυπολογίζεται στο σχεδιασμό των ζωνών πίεσης του δικτύου και όπου είναι εφικτό εντός των πιεζομετρικών ζωνών πρέπει να εξασφαλίζεται η μικρότερη δυνατή υψομετρική διακύμανση. Ακόμα, απαιτείται ο περιορισμός της μέγιστης πίεσης. Η πίεση οφείλει να διατηρείται σε συγκεκριμένα επίπεδα, ώστε να αποφεύγονται βλάβες τόσο σε διάφορα σημεία του εξωτερικού δικτύου ύδρευσης, όσο και των υδραυλικών εγκαταστάσεων εντός των σπιτιών. Κατά κανόνα ισχύει πως σε σημεία εντός μιας οικίας η πίεση πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0,4bar, ενώ στο δίκτυο δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 7bar, όταν βρίσκεται το νερό σε στασιμότητα, και όχι σε κίνηση, όπου αναπτύσσονται και ακόμη μεγαλύτερες πιέσεις [3], [10].

5.3.5 Δείκτες αξιολόγησης δικτύου νερού

Η αξιολόγηση ενός δικτύου ύδρευσης επιτυγχάνεται μέσω κάποιων δεικτών αξιολόγησης. Με το συστηματικό υπολογισμό των δεικτών αξιολόγησης επιτυγχάνονται η διαχρονική παρακολούθηση της απόδοσης του δικτύου, ο εντοπισμός προβληματικών περιοχών και χρόνων που πρέπει να βελτιωθούν, η αντικειμενική μέτρηση της αποτελεσματικότητας κάθε παρέμβασης στο δίκτυο και η σύγκριση

δικτύων με όμοια χαρακτηριστικά. Οι δείκτες αξιολόγησης συνήθως βαθμολογούνται στην κλίμακα 1 (κακή λειτουργία) έως 5 (άριστη λειτουργία). Οι κύριοι δείκτες που αναπτύχθηκαν για τη διαχείριση των δικτύων ύδρευσης είναι οι ακόλουθοι:

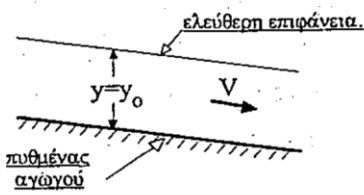
- *Ποσοστό Χρήσης*: Αποτελεί το ποσοστό στο οποίο τερματίζει η δυνατότητα παροχής προς κατανάλωση.
- *Επίπεδο Παρεχόμενων Υπηρεσιών*: Εκφράζεται από την πιθανότητα ικανοποίησης της ζήτησης νερού εντός κάποιου χρονικού διαστήματος μελέτης.
- *Ποιότητα Παρεχόμενων Υπηρεσιών*: Εκφράζεται από το ποσοστό ικανοποίησης της ζήτησης νερού εντός κάποιου χρονικού διαστήματος μελέτης.
- *Ταχύτητα Αντίδρασης*: Προσδιορίζεται από το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή της εκδήλωσης μιας απαίτησης – ζήτησης στο δίκτυο έως τη στιγμή που γίνεται δυνατή η ικανοποίησή της.
- *Αξιοπιστία / Επικινδυνότητα*: Ισοδυναμεί με την πιθανότητα να μη συμβεί αστοχία στο δίκτυο εντός κάποιου διαστήματος μελέτης. Είναι ο πλέον διαδεδομένος δείκτης ελέγχου του επιπέδου λειτουργίας ενός δικτύου. Την αντίθετη ακριβώς έννοια από τον δείκτη της αξιοπιστίας, έχει ο δείκτης της Επικινδυνότητας. Η αξιοπιστία έχει τον κυρίαρχο ρόλο, όταν χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το κόστος που συνοδεύει την πιθανή αστοχία του δικτύου, είναι πολλαπλάσιο του κόστους λειτουργίας και συντήρησής του.
- *Αξιοπιστία Στόχου*: Εκφράζει την πιθανότητα να μην συμβεί αστοχία του δικτύου κατά τη μεταφορά νερού από τους υδατικούς πόρους προς κάποιο συγκεκριμένο σημείο ζήτησης.
- *Διαθεσιμότητα*: Αναφέρεται στην πιθανότητα το δίκτυο σε κάποια δεδομένη χρονική στιγμή να βρίσκεται σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας, άσχετα αν, πριν ή μετά τη χρονική αυτή στιγμή, το δίκτυο αστοχεί.
- *Επιδιορθωσιμότητα*: Δείχνει το πόσο γρήγορα το δίκτυο επανέρχεται στην κατάσταση της κανονικής του λειτουργίας μετά την εμφάνιση μιας αστοχίας σ' αυτό.
- *Τρωτότητα Δικτύου*: Εκφράζει τη μέση σημαντικότητα μιας αστοχίας (μέγεθος των επιπτώσεών της) που παρουσιάζεται σε ένα δίκτυο. Αποτελεί τον πλέον «ευέλικτο» –από απόψεως ορισμού δείκτη– αφού μπορεί να ορισθεί με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με την κρίση του ερευνητή και τις συνθήκες που παρουσιάζονται.
- *Βιωσιμότητα*: Εκφράζεται από τον συνδυασμό υψηλής τιμής του Δείκτη Επιδιορθωσιμότητας και χαμηλής τιμής του δείκτη Τρωτότητας του δικτύου [12, κεφ.3].

5.4 Υπολογισμοί Δικτύων Ύδρευσης

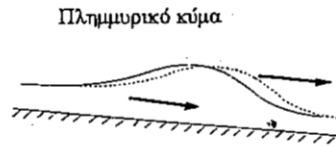
5.4.1 Ροή με ελεύθερη επιφάνεια

Στους ανοικτούς αγωγούς η ροή εμφανίζει ελεύθερη επιφάνεια, στην οποία επικρατεί σταθερή ατμοσφαιρική πίεση. Η ροή με ελεύθερη επιφάνεια μπορεί να ταξινομηθεί με κριτήριο τον χρόνο σε μόνιμη και μη μόνιμη. Συνήθως, συνθήκες μη μόνιμης παρουσιάζονται σε ανοικτά υδραγωγεία κατά τους χειρισμούς σε θυροφράγματα.

Μόνιμη ομοιόμορφη ροή



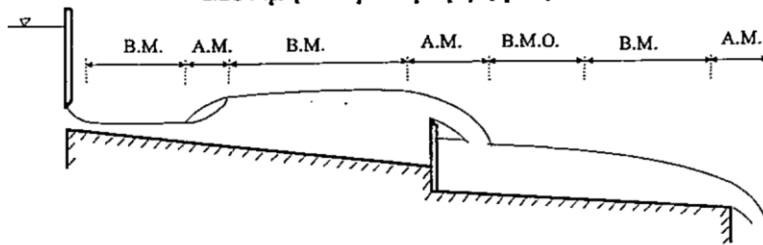
Μη Μόνιμη ανομοιόμορφη ροή



Ανάντη κινούμενο άλμα



Μόνιμη ανομοιόμορφη ροή



A.M. : Απότομα μεταβαλλόμενη
 B.M. : Βαθμιαία μεταβαλλόμενη
 B.M.O : B.M. σχεδόν ομοιόμορφη ροή

Σχήμα 5.5: Διαμορφώσεις της ροής σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια [53].

Οι ροές μπορεί επίσης να ταξινομηθούν με κριτήριο τον χώρο σε ομοιόμορφες, στις οποίες τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού και το βάθος της ροής διατηρούνται σταθερά, και μεταβαλλόμενες, οι οποίες διακρίνονται περαιτέρω σε βαθμιαία ή απότομα μεταβαλλόμενες. Ενδεικτικά, συνθήκες βαθμιαίας μεταβαλλόμενης ροής παρουσιάζονται στην αρχή και το τέλος του υδραγωγείου όταν εκεί περιλαμβάνεται δεξαμενή με κυμαινόμενη στάθμη, αλλά ιδιαίτερα σε σημεία όπου η διατομή ή η κλίση των αγωγών αλλάζουν. Κατά κανόνα, ο σχεδιασμός των αγωγών ελεύθερης επιφάνειας πραγματοποιείται για συνθήκες ομοιόμορφης ροής. Τα είδη της ροής για ανοικτούς αγωγούς παρουσιάζονται στο σχήμα (5.5) [2, κεφ.7].

5.4.1.1 Βασικές αρχές υπολογισμού ομοιόμορφης ροής

Ομοιόμορφη ροή θεωρείται η ροή κατά την οποία το βάθος, η υγρή διατομή, η μέση ταχύτητα διατηρούνται σταθερά σε όλο το μήκος του αγωγού υπό εξέταση. Στην περίπτωση της ομοιόμορφης ροής, η κλίση του πυθμένα I , είναι ίση με την κλίση γραμμής ενέργειας J .

Οι κύριες σχέσεις που έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή της μέσης ταχύτητας για ομοιόμορφη ροή είναι:

1. Η σχέση του Chezy:

$$V = C \cdot R^{1/2} \cdot J^{1/2} \quad (5.3)$$

όπου C ο συντελεστής αντίστασης στη ροή και R η υδραυλική ακτίνα.

2. Η σχέση του Manning:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (5.4)$$

όπου ο συντελεστής n καθορίζεται από το είδος της επιφάνειας της ροής και το σχήμα της διατομής.

Η σχέση Manning είναι ίσως η πιο διαδομένη σχέση που χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση ανοικτών αγωγών λόγω της απλότητας που παρουσιάζει και της καλής προσέγγισης πειραματικών αποτελεσμάτων. Η σχέση (5.5) που ακολουθεί, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ομοιόμορφου βάθους h_n , αν είναι γνωστά η τιμή της παροχής Q , τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού και η κλίση του [2, κεφ.7].

5.4.1.2 Βασικές αρχές υπολογισμού μόνιμης βαθμιαίας μεταβαλλόμενης ροής

Αν και στις περισσότερες των περιπτώσεων η ροή στα ανοικτά δίκτυα εξωτερικού υδραγωγείου είναι ομοιόμορφη, η παρεμβολή τεχνικών έργων συχνά προκαλεί συνθήκες μόνιμης βαθμιαίας μεταβαλλόμενης ροής. Για δεδομένη παροχή και συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, η μόνιμη βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή μπορεί να εμφανίσει τις ακόλουθες μορφές:

1. Το ύψος του βάθους είναι μεγαλύτερο του ομοιόμορφου βάθους ($h > h_n$), οπότε η μέση ταχύτητα ροής είναι μικρότερη από αυτή της ομοιόμορφης ροής ($V < V_n$), και κατ' επέκταση $J < I$.
2. Το ύψος του βάθους είναι μικρότερο του ομοιόμορφου βάθους ($h < h_n$), οπότε η μέση ταχύτητα ροής είναι μεγαλύτερη από αυτή της ομοιόμορφης ροής ($V > V_n$), και κατ' επέκταση $J > I$.

Στην περίπτωση της μόνιμης βαθμιαία μεταβαλλόμενης ροής, στην ανάλυση πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη οι συνθήκες της ροής σε κρίσιμη και υπερκρίσιμη κατάσταση. Η συνθήκη κρίσιμης ροής για δεδομένη παροχή Q , δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{A^3}{T} = \frac{Q^2}{g} \quad (5.5)$$

Η μεταβολή του βάθους προκύπτει κάνοντας χρήση του νόμου του Bernoulli και της εξίσωσης Manning, η οποία για πρισματικό αγωγό δίνεται από την ακόλουθη σχέση [2, κεφ.7]:

$$\frac{dh}{dx} = I \cdot \frac{1 - (h/h_n)^{10/3}}{1 - (h/h_n)^3} \quad (5.6)$$

5.4.2 Υπολογισμοί ροής υπό πίεση σε κλειστούς αγωγούς

Σε αντίθεση με τους αγωγούς ελεύθερης επιφάνειας που η ροή προκαλείται λόγω βαρύτητας, στη περίπτωση των κλειστών αγωγών η ροή προκαλείται επιβάλλοντας μια διαφορά πίεσης. Συχνά, για την επίτευξη της επιθυμητής πίεσης χρησιμοποιούνται μία ή περισσότερες αντλίες. Η ροή υπό πίεση σε κλειστούς αγωγούς μπορεί να ταξινομηθεί με κριτήριο τον χρόνο σε μόνιμη και μη μόνιμη ροή. Οι συνθήκες μη μόνιμης ροής δημιουργούνται συχνά λόγω υδραυλικών πηλημάτων, δηλαδή φαινομένων υπερπίεσης, τα οποία συμβαίνουν μετά από χειρισμούς σε δικλείδες ή διακυμάνσεις στην παροχή των αντλιοστασίων [2, κεφ.7].

5.4.2.1 Απώλειες ενέργειας σε κλειστούς αγωγούς

Οι γραμμικές απώλειες ενέργειας h_f , σε κλειστούς αγωγούς κυκλικής διατομής διαμέτρου D και μήκους L , υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση (εξίσωση Darcy-Weisbach):

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (5.7)$$

όπου f , ο συντελεστής τριβής του υλικού. Η τιμή συντελεστή τριβής είναι συνάρτηση του αριθμού Re και της σχετικής τραχύτητας του αγωγού ε/D , όπου ε (σε διαστάσεις μήκους) η απόλυτη επιφανειακή τραχύτητα των τοιχωμάτων του αγωγού.

Για μικρές τιμές του αριθμού Re , όπου η ροή είναι στρωτή, ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (5.8)$$

Για μεγαλύτερες τιμές του Re , η τιμή του συντελεστή τριβής μπορεί να υπολογιστεί μέσω της ακόλουθης σχέσης (εξίσωση Colebrook-White) που καλύπτει τη μεταβολική περιοχή μεταξύ υδραυλικά λείας περιοχής και πλήρως τραχείας περιοχής:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (5.9)$$

Πέρα από τη σχέση (5.8), για τον υπολογισμό των απωλειών σε έναν κλειστό αγωγό κυκλικής διατομής συχνά χρησιμοποιείται ο εμπειρικός τύπος των Hazan-Williams

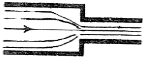
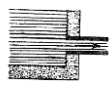
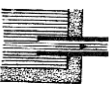


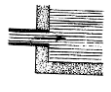

$$h_f = 6,815 \left(\frac{V}{C} \right)^{1,852} \left(\frac{1}{D} \right)^{1,167} \quad (5.10)$$

Επίσης, ο υπολογισμός της τιμής του συντελεστή τριβής μπορεί να πραγματοποιηθεί γραφικά με χρήση διαγράμματος Moody, όπως έχει ήδη αναφερθεί και αναλυθεί και στο κεφάλαιο 3 [2, κεφ.7].

5.4.2.2 Τοπικές απώλειες ενέργειας σε κλειστούς αγωγούς

Εκτός από τις γραμμικές απώλειες, στους κλειστούς αγωγούς εξωτερικού δικτύου, δημιουργούνται τοπικές απώλειες στα σημεία που αλλάζει η διατομή των αγωγών, στις στροφές, καθώς και στις θέσεις που τοποθετούνται ειδικές συσκευές. Οι σχέσεις υπολογισμού των τοπικών απωλειών για διάφορες διαμορφώσεις και διατάξεις αναφέρονται στον Πίνακα 5.1 [2, κεφ.7].

Πίνακας 5.1 : Σχέσεις υπολογισμού διάφορων τύπων γραμμικών απώλειών [2].

Περιγραφή Τοπικής Διαμόρφωση	Σχηματική Διάταξη	Σχέση Υπολογισμού Τοπικής Απώλειας j
Απότομη συστολή ($D_1 > D_2$)		$j = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{D_2^2}{D_1^2} \right) \frac{V^2}{2g}$
Έξοδος από δεξαμενή χωρίς εσοχή και συναρμογή		$j = \frac{1}{2} \frac{V^2}{2g}$
Έξοδος από δεξαμενή με εσοχή και συναρμογή		$j = \frac{V^2}{2g}$
Έξοδος από δεξαμενή με κυκλική συναρμογή		$j = 0,05 \frac{V^2}{2g}$
Απότομη διεύρυνσης ($D_1 < D_2$)		$j = \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2} \right) \frac{V^2}{2g}$
Είσοδος σε δεξαμενή		$j = a \frac{V^2}{2g}, \quad 1,06 < a < 1,10$
Καμπύλες		$j = K \frac{V^2}{2g}$
Δικλείδες		$j = K \frac{V^2}{2g}$

5.4.3 Υδραυλική ανάλυση δικτύων εσωτερικού υδραγωγείου

5.4.3.1 Εισαγωγή

Η υδραυλική ανάλυση των δικτύων αγωγών υπό πίεση βασίζεται σε ένα σύστημα εξισώσεων με πολυπλοκότητα ανάλογη με το μέγεθος του συστήματος. Στις μέρες μας, η ανάπτυξη των Η/Υ και η χρήση λογισμικών μοντελοποίησης καθιστούν την ανάλυση γρηγορότερη και πιο ακριβή. Στα πλαίσια της ανάλυσης, αρχικά πραγματοποιείται η σχηματοποίηση του δικτύου διανομής, και η αναπαράσταση των φυσικών χαρακτηριστικών του δικτύου σε ένα εννοιολογικό μοντέλο γράφου. Συγκεκριμένα, τα κύρια χαρακτηριστικά που περιλαμβάνονται στην ανάλυση είναι [8]:

- Οι *κόμβοι*, οι οποίοι αποτελούν είτε σημεία εισροής ή εκροής νερού, είτε σημεία που αλλάζουν η γεωμετρία ή τα χαρακτηριστικών των αγωγών. Για τους κόμβους είναι γνωστά το απόλυτο υψόμετρο z , και η παροχή εξόδου c , ενώ είναι άγνωστο το ενεργειακό υψόμετρο h .
- Οι *κλάδοι*, οι οποίοι αποτελούν στοιχεία μεταφοράς με άγνωστη ενιαία παροχή Q . Οι κλάδοι έχουν μήκος L και ίδια φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά σε όλο το μήκος τους.
- Η *δεξαμενή*, η οποία αποτελεί μία διάταξη αποθήκευσης νερού οφέλιμου όγκου V , με γνωστή αρχική στάθμη z_0 , και άγνωστη εκροή νερού y .

- Το *φρεάτιο*, η οποία αποτελεί διάταξη μηδενισμού της πίεσης και χαρακτηρίζεται από αμελητέα αποθετική ικανότητα. Το φρεάτιο διατηρεί σταθερή στάθμη z_0 .
- Η *βαλβίδα*, η οποία αποτελεί διάταξη ρύθμισης της πίεσης ή της παροχής. Η λειτουργία της περιγράφεται από μία γνωστή σχέση παροχής-ενεργειακών απωλειών.
- Η *αντλία*, οι οποία αποτελεί διάταξη ανύψωσης της πιεζομετρικής γραμμής, με γνωστή χαρακτηριστική καμπύλη.

Στη συνέχεια καθορίζονται οι εξισώσεις λειτουργίας των φυσικών χαρακτηριστικών και ορίζεται η τοπολογία και τα χαρακτηριστικά μεγέθη των στοιχείων του δικτύου, όπως περιγράφονται παραπάνω. Αφού καθοριστεί ο τρόπος φόρτισης του δικτύου, μέσα από υπολογισμούς προκύπτουν τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της ροής σε συνθήκες κατανάλωσης, τα οποία είναι οι μονάδες της ροής και το ενεργειακό υψόμετρο [11,κεφ.10].

5.4.3.2 Σχέση πλήθους κόμβων, κλάδων και βρόγχων δικτύου

Στη γενική περίπτωση που ένα δίκτυο που αποτελείται από n αριθμό κόμβων, m αριθμό κλάδων και r αριθμό βρόγχων, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$m = n + r - 1 \quad (5.11)$$

Επίσης, αν στο δίκτυο υπάρχουν n_0 τον αριθμό (>1) σημεία γνωστού ενεργειακού υψομέτρου, θεωρούνται $n_0 - 1$ ιδεατοί βρόχοι, οι οποίοι σχηματίζονται από τους εικονικούς κλάδους μηδενικής παροχής που συνδέουν τα σημεία αυτά.

$$m = n + r - n_0 \quad (5.12)$$

Η τοπολογία του δικτύου περιγράφεται από μια μήτρα A , διαστάσεων $n \times m$, με στοιχεία $a_{ik} = -1$ αν ο κλάδος k ξεκινά από τον κόμβο i , $a_{ik} = 1$ αν τελειώνει στον κόμβο i , και $a_{ik} = 0$ αν δεν συνδέεται με τον κόμβο i [11,κεφ.10].

5.4.3.3 Εκτίμηση Φόρτισης

Η εκτίμηση της κατανάλωσης του δικτύου πραγματοποιείται ξεχωριστά για κάθε χρήση νερού. Οι χρήστες διακρίνονται σε σημειακούς χρήστες (βιομηχανίες, ξενοδοχεία, νοσοκομεία, πάρκα, πυροσβεστικοί κρουνοί κ.α.) και μη σημειακούς (οικιακοί καταναλωτές, κάτοικοι παραθεριστικών περιοχών κ.α.). Οι μέγιστες ωριαίες παροχές των σημειακών καταναλωτών μεταφέρονται απευθείας ως σημειακές φορτίσεις στον εγγύτερο κόμβο, ενώ για τους μη σημειακούς καταναλωτές, η αθροιστική μέγιστη ωριαία παροχή q_k , ανά χρήση νερού k , ανάγεται στους κόμβους με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών κατανομής. Οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την κατανομή της παροχής μη σημειακών καταναλωτών είναι οι ακόλουθες:

1. Μέθοδος επιφανειών επιρροής, κατά την οποία θεωρείται πως κάθε κόμβος i , εξυπηρετεί συγκεκριμένη επιφάνεια a_i , σχήμα (5.6 (α)). Κατά συνέπεια, το ποσοστό συμμετοχής του κόμβου στη συνολική κατανάλωση w_i , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$w_i = \frac{\alpha_i}{\sum_i \alpha_i} \quad (5.13)$$

2. Μέθοδος ισοδύναμων μηκών επιρροής, κατά την οποία θεωρείται πως η παροχή που διανέμεται κατά μήκος κάθε αγωγού διαμερίζεται ισόποσα στον ανάντη και τον κατάντη κόμβο αν η παροχή ομοιόμορφη, σχήμα (5.6 (β)). Σε διαφορετική περίπτωση, η περιοχή διαχωρίζεται σε ζώνες διαφορετικής πυκνότητας μήκους L_{ij} , για τις οποίες εκτιμάται ο αντίστοιχος συντελεστής ανομοιομορφίας θ_{ij} . Βάση των τιμών αυτών, υπολογίζεται το ισοδύναμο μήκος επιρροής του κόμβου j προς τον κλάδο i , L_{ij}^* , σύμφωνα με τη σχέση:

$$L_{ij}^* = 0,5 \cdot \theta_{ij} \cdot L_{ij} \quad (5.14)$$

το ολικό ισοδύναμο μήκος επιρροής του κόμβου j , L_j^* , σύμφωνα με τη σχέση:

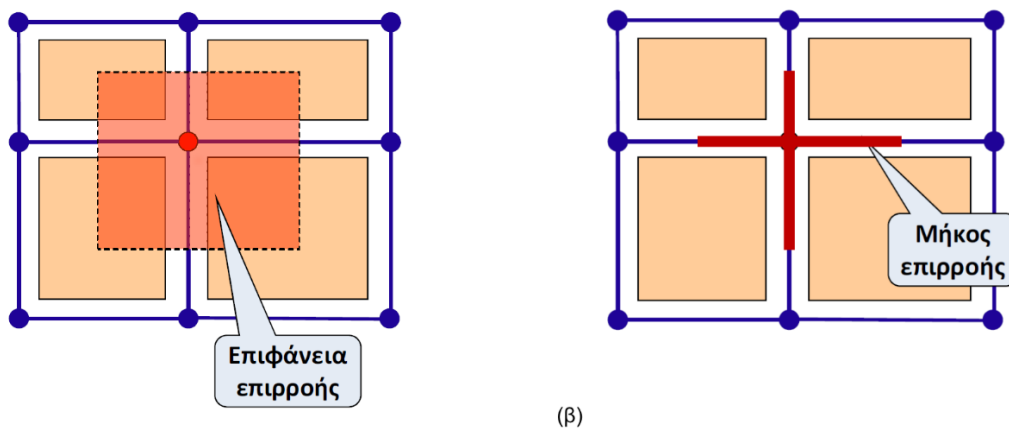
$$L_j^* = \sum_j L_j^* \quad (5.15)$$

και το ολικό ισοδύναμο μήκος L^* , το οποίο δίνεται από την σχέση:

$$L_j^* = \sum_i L_{ij}^* \quad (5.16)$$

Τέλος, ο συντελεστής κατανομής της ολικής παροχής για τη συγκεκριμένη χρήση στον κόμβο j θα είναι [11,κεφ.11] :

$$W_j = \frac{L_j^*}{L^*} \quad (5.17)$$



(α)

(β)

Σχήμα 5.6: Αναγωγή της παροχής των μη σημειακών καταναλωτών στους κόμβους σύμφωνα με την μέθοδο α) επιφανειών επιρροής και β) ισοδύναμων μηκών επιρροής [11].

5.4.3.4 Υπολογισμοί παροχής

Ο προσδιορισμός της παροχής στους κόμβους γίνεται κάνοντας χρήση των εξισώσεων διατήρησης της μάζας σε κάθε κόμβο. Για κάθε κόμβο i η εισροή και η εκροή νερού συνδέονται με τη σχέση:

$$\sum_j \alpha_{ij} \cdot Q_{ij} = y_i - c_i \quad (5.18)$$

όπου α_{ij} το στοιχείο του μητρώου πρόσπτωσης, Q_{ij} η παροχή από ή προς τον κόμβο i , και y_i , c_i οι παροχές εισόδου και εξόδου, αντίστοιχα.

Η εξίσωση συνέχειας μπορεί να εφαρμοστεί και συνολικά στο δίκτυο, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sum_i y_i = \sum_i c_i \quad (5.19)$$

Εάν το δίκτυο εμφανίζει βροχοειδή διάταξη, απαιτούνται περαιτέρω εξισώσεις, οι οποίες προκύπτουν κάνοντας χρήση την εξίσωση διατήρησης ενέργειας. Οι εξισώσεις διατήρησης ενέργειας σε ένα κλάδο, διατυπώνονται ως εξής σε γενικευμένη μορφή:

$$\sum_i \kappa_{ij} \cdot Q_{ij} \cdot |Q_{ij}|^\lambda = \sum_i \Delta h_{ij_i} \quad (5.20)$$

όπου Δh_{ij_i} η διαφορά μεταξύ των ενεργειακών υψομέτρων και κ_{ij} , λ συντελεστές που καθορίζεται από τις εξισώσεις υπολογισμού των απωλειών [11,κεφ.13].

5.4.3.5 Περιορισμοί ταχύτητας και πίεσης

Η ταχύτητα ροής στους αγωγούς κυμαίνεται μεταξύ συγκεκριμένων ορίων, προκειμένου να αποφευχθούν ανεπιθύμητα προβλήματα. Συγκεκριμένα, η ελάχιστη τιμή που επιτρέπεται να έχει η ταχύτητα ροής είναι 0,5 m/s ώστε να μη συμβούν αποθέσεις φερτών υλικών στους αγωγούς, ενώ η μέγιστη τιμή της ταχύτητας ροής είναι 2 m/s. Για μεγαλύτερες ταχύτητες ροής υπάρχει ο κίνδυνος πρόκλησης υπερπίεσεων και απωλειών νερού. Επιπλέον, τα όρια καθορίζονται μεταξύ 1- 2 m/s για κύριους αγωγούς, και 0,5 - 0,8 m/s για διακλαδώσεις μικρότερης διατομής.

Η σωστή λειτουργία των δικτύων ύδρευσης πέρα από την κατάλληλη ποσότητα παροχής πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις για την πίεση. Ωστόσο, η στατική διαφορά πίεσης μεταξύ της δεξαμενής και του χαμηλότερου σημείου του δικτύου δε πρέπει να ξεπερνά τα 60 m. Διαφορετικά, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος εμφάνισης διαρροών ή ακόμα και θραύσης σε κάποιο σημείο του δικτύου [11,κεφ.14].

5.4.3.6 Επίλυση δικτύου

Στη γενική περίπτωση, για ένα βρογχωτό δίκτυο με n αριθμό κόμβων, n_0 αριθμό σημείων γνωστού ενεργειακού υψομέτρου, και r βρόχων προκύπτει ένα μικτό σύστημα από $n - n_0$ γραμμικές εξισώσεις συνέχειας και r μη γραμμικές εξισώσεις διατήρησης ενέργειας, ως προς τις παροχές στους m των

αριθμό κλάδων. Στην περίπτωση που το δίκτυο εμφανίζει ακτινική διάταξη ($r = 0$), το σύστημα εξισώσεων απλοποιείται σημαντικά, αφού περιλαμβάνει μόνο τις γραμμικές εξισώσεις της συνέχειας.

Λόγω του μεγέθους και της μη γραμμικότητας του συστήματος εξισώσεων που προκύπτει, καθίσταται αναγκαία η χρήση αριθμητικών μεθόδων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι επαναληπτικές, δηλαδή ξεκινούν καθορίζοντας κάποιες αρχικές συνθήκες και επιδιώκουν την σταδιακή μείωση του σφάλματος, έως ότου αυτό φτάσει στην επιθυμητή τιμή. Οι βασικές τεχνικές που εφαρμόζονται είναι οι ακόλουθες:

- τεχνικές διόρθωσης του σφάλματος ανά εξίσωση (π.χ. μέθοδος Cross).
- τεχνικές επίλυσης μη γραμμικών συστημάτων (π.χ. μέθοδος Newton – Raphson).
- τεχνικές επίλυσης γραμμικοποιημένων συστημάτων, με χαλάρωση του σφάλματος [10, κεφ.3].

5.5 Στοιχεία Σχεδιασμού Δικτύων Ύδρευσης

5.5.1 Αγωγοί εξωτερικού υδραγωγείου

Κατά τον σχεδιασμό των ανοικτών αγωγών εξωτερικού υδραγωγείου λαμβάνονται υπόψη μια σειρά από δεδομένα, τα οποία σχετίζονται με τη ζητούμενη παροχή και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού, τις γεωγραφικές και τοπολογικές συνθήκες της περιοχής καθώς και ένα σύνολο οικονομικών και περιβαλλοντολογικών κριτηρίων [11, κεφ.11].

5.5.1.1 Στοιχεία σχεδίασης ανοικτών αγωγών εξωτερικού υδραγωγείου

Ο σχεδιασμός ενός ανοικτού εξωτερικού υδραγωγείου στην πράξη, αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία, της οποίας τα κύρια σημεία είναι τα ακόλουθα:

1. Η χάραξη του υδραγωγείου σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή: Η βέλτιστη χάραξη ενός ανοικτού αγωγού γίνεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το μήκος και η συνολική υψομετρική διαφορά από την αρχή έως το τέλος του υδραγωγείου. Επιπλέον, ζητούνται η ελαχιστοποίηση των διαστάσεων και κατ' επέκταση του κόστους κατασκευής της διατομής, αλλά και η μείωση των παρεμβαλλόμενων τεχνικών έργων (π.χ. σήραγγες, υδατογέφυρες κ.α.). Τέλος, στην ανάλυση πρέπει να συμπεριληφθεί το κόστος των απαραίτητων χωματουργικών έργων αλλά και αυτό μιας ενδεχόμενης άντλησής.
2. Η επιλογή του σχήματος και των υδραυλικών μεγεθών της διατομής: Το σχήμα της διατομής δεν πάντα αυτό που εξασφαλίζει την καλύτερη υδραυλική συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, όταν το έδαφος δράσης είναι μαλακό το βέλτιστο σχήμα της διατομής από οικονομικής και κατασκευαστικής άποψης είναι το τραπεζοειδές. Αντιθέτως, στην περίπτωση βραχωδών ή ημιβραχωδών εδαφών χρησιμοποιείται ορθογώνια διατομή.
3. Η κατασκευαστική διαμόρφωση της διατομής: Η κατασκευαστική διαμόρφωση της διατομής της διώρυγας γίνεται με βάση τον τύπο του εδάφους (μαλακά ή βραχώδη). Στα μαλακά εδάφη, στα οποία ενδείκνυται η χρήση τραπεζοειδούς διατομής, τα πρανή συνήθως διαμορφώνονται απευθείας, και έπειτα υποβάλλονται σε συμπύκνωση. Σε περιπτώσεις που η χάραξη διέρχεται από ελώδη ή οργανικά εδάφη, το ακατάλληλο έδαφος αφαιρείται και στη συνέχεια ακολουθεί η

διαμόρφωση των πρηνών. Στα βραχώδη εδάφη, στα οποία ενδείκνυται η χρήση ορθογώνιας διατομής, η εκσκαφή περιορίζεται μόνο στη διαμόρφωση των πλευρικών πρηνών. Η διασφάλιση της επιφάνειας και της επίπεδης επιφάνειας γίνεται με χρήση σπλισμένου σκυροδέματος.

4. Τα τεχνικά έργα: Συνήθως, οι ανοικτοί αγωγοί υδραγωγείου διασταυρώνονται με άλλα έργα. Κατά συνέπεια, κατά τον σχεδιασμό πρέπει να γίνει ανάλυση όσο αναφορά τις εναλλαγές διατομών, την συναρμογή έργων, καθώς και τις περιπτώσεις παρεμβολής αναστραμμένου σίφωνα
5. Τα έργα ρύθμισης: Η διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας του δικτύου και η αποφυγή οποιωνδήποτε προβλημάτων προκύψουν λόγω των διακυμάνσεων της παροχής κατανάλωσης επιτυγχάνονται με τη χρήση των συστημάτων ρύθμισης. Τα τρία κύρια βασικά συστήματα ρύθμισης είναι η α) εκ των ανάντη ρύθμιση, β) η εκ των κατάντη ρύθμιση και γ) η δυναμική ρύθμιση [11, κεφ.5].

5.5.1.2 Στοιχεία σχεδίασης κλειστών αγωγών εξωτερικού υδραγωγείου

Τα κύρια μέρη στο σχεδιασμό αγωγών κλειστού υδραγωγείου είναι τα ακόλουθα:

1. Η χάραξη του υδραγωγείου σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή: Σε σύγκριση με τους αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, η χάραξη των κλειστών αγωγών υπό πίεση μπορεί να περιλαμβάνει τόσο καθοδικές, όσο και ανοδικές κλίσεις, αρκεί να βρίσκονται κάτω από την υδραυλική γραμμή. Η χάραξη σε οριζοντιογραφία σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να είναι ευθύγραμμη έτσι ώστε, να ελαχιστοποιείται το απαιτούμενο μήκος του αγωγού. Αυτό ωστόσο δεν είναι πάντα τόσο εύκολο, καθώς μεταξύ την αρχή και το πέρας του υδραγωγείου μπορεί να παρεμβάλλονται φυσικά ή τεχνικά εμπόδια.
2. Ο σχεδιασμός του αγωγού: Κατά τον σχεδιασμό του αγωγού πρέπει να γίνει προσδιορισμός της εσωτερικής διαμέτρου και του υλικού κατασκευής του σωλήνα.
3. Η διαμόρφωση του σκάμματος τοποθέτησης του αγωγού: Τα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό του σκάμματος είναι το εύρος κατάληψης εργασιών, το βάθος και πλάτος εκσκαφής, ο έλεγχος των υπόγειων νερών, τα μέτρα αντιστήριξης, οι προδιαγραφές αποχέτευσης και το εύρος κατάληψης των εργασιών.
4. Οι συσκευές ασφάλειας: Τα μέσα ασφάλειας που χρησιμοποιούνται στους κλειστούς αγωγούς εξωτερικού υδραγωγείου υπό πίεση είναι οι δικλείδες, οι βαλβίδες αντεπιστροφής και ελέγχου, οι αερεξαγωγοί και οι εκκενωτές. Ειδικά τεχνικά έργα: Τα ειδικά τεχνικά έργα είναι κυρίως διάφοροι τύποι φρεατίων και σωμάτων αγκύρωσης [11, κεφ.5].

5.5.2 Στοιχεία σχεδιασμού αγωγών εσωτερικού υδραγωγείου

Κατά κύριο λόγο στα δίκτυα ύδρευσης χρησιμοποιούνται αγωγοί του εμπορίου διαφόρων υλικών και διαμέτρων. Το υλικό κατασκευής των αγωγών επιλέγεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου για αντοχή σε εσωτερική πίεση και εξωτερικά φορτία, αντιδιαβρωτική επικάλυψη, μόνωση κ.α. Οι αγωγοί ύδρευσης ταξινομούνται με κριτήριο την ευκαμψία τους σε:

- άκαμπτους αγωγούς, όπου οι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από χυτοσίδηρο, σκυρόδεμα και αμιαντοτσιμέντο.
- ημιάκαμπτοι αγωγούς, οι οποίοι κατασκευάζονται από όλκιμο σίδηρο και χάλυβα
εύκαμπτους αγωγούς, οι οποίοι κατασκευάζονται από διάφορα πολυμερή, όπως το PVC και το πολυαιθυλένιο, καθώς και από πλαστικό ενισχυμένο με γυαλί [11, κεφ.11].

5.5.3 Αντλίες

5.5.3.1 Βασικά χαρακτηριστικά αντλιών

Συνήθως, η βαρύτητα από μόνη της δεν μπορεί να εξασφαλίσει τα επιθυμητά επίπεδα ροής στους αγωγούς του υδραγωγείου, οπότε και καθίσταται αναγκαία η χρήση αντλιών. Οι αντλίες είναι μηχανές οι οποίες πραγματοποιούν τη μεταφορά ενός ρευστού με μεγάλο βαθμό ροής καταναλώνοντας μηχανικό έργο (χρήση κινητήρα). Ένα σύστημα αντλήσεως ή αντλιοστάσιο απαρτίζεται από το τμήμα αναρρόφησης, το οποίο μεταφέρει το υγρό στην εισαγωγή της αντλίας, το σύστημα αντλιών (συχνά χρησιμοποιείται περισσότερες από μία), και το τμήμα καταθλίψεως, στο οποίο διοχετεύεται το ρευστό από την αντλία. Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά των αντλιών, τα οποία λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό του αντλιοστασίου είναι τα ακόλουθα:

- Μανομετρικό ύψος H_m (σε m), το οποίο εκφράζεται ως η διαφορά του ύψους της γραμμής ενέργειας ανάντη και κατόντη που προκαλείται από την αντλία.
- Μηχανική ισχύς κινητήρα P_m (σε kW), το οποίο για παροχή Q υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_m = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_m \quad (5.21)$$

όπου ρ η πυκνότητα του νερού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας

- Παραγόμενο μηχανικό έργο W_m (σε kJ), το οποίο για συνολικό όγκο νερού V υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$W_m = \rho \cdot g \cdot V \cdot H_m \quad (5.22)$$

- Βαθμός απόδοσης n , ο οποίος εκφράζει τον λόγο της ωφέλιμης ισχύος προς την καταναλισκόμενη ισχύ
- Συνολική ισχύς αντλίας P_t , η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_t = \frac{P_m}{n} \quad (5.23)$$

- Καταναλισκόμενη ενέργεια, E_C , η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_C = \frac{W_m}{n} \quad (5.24)$$

Στις περισσότερες περιπτώσεις, μια αντλία δεν καλύπτει τις απαιτούμενες ανάγκες του δικτύου, οπότε και χρησιμοποιούνται περισσότερες από μια αντλίες. Η διάταξη των αντλιών σε ένα αντλιοστάσιο γίνεται σε σειρά όταν επιθυμείται η αύξηση του μανομετρικού ύψους, χωρίς να μειώνεται σημαντικά η απόδοση του συστήματος άντλησης, ενώ η παροχή διατηρείται σταθερή. Σε περίπτωση που επιθυμείται η αύξηση της τιμής της παροχής, οι αντλίες διατάσσονται παράλληλα, με αποτέλεσμα οι παροχές των αντλιών να αθροίζονται, χωρίς να μεταβάλλεται το μανομετρικό ύψος [2, κεφ.7].

5.5.3.2 Τύποι Αντλιών

Οι αντλίες μπορεί να ταξινομηθούν με κριτήριο τον τρόπο που μεταβιβάζουν το μηχανικό έργο στο ρευστό, σε αντλίες θετικής εκτοπίσεως και δυναμικές αντλίες.

Στις αντλίες θετικής εκτοπίσεως η μεταβίβαση του έργου πραγματοποιείται ασκώντας μια δύναμη στο υγρό, η οποία προκαλεί την αύξηση της πίεσης. Οι αντλίες αυτές συνήθως χρησιμοποιούνται για μικρές παροχές νερού, ενώ αποδίδουν για ένα μεγάλο εύρος μανομετρικό υψών. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα αντλιών θετικής εκτόπισης που εφαρμόζονται στο δίκτυο ύδρευσης είναι οι αντλίες χειρός εμβόλου, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στις αναπτυσσόμενες χώρες για οικιακή άντληση, και οι περιστροφικές αντλίες.

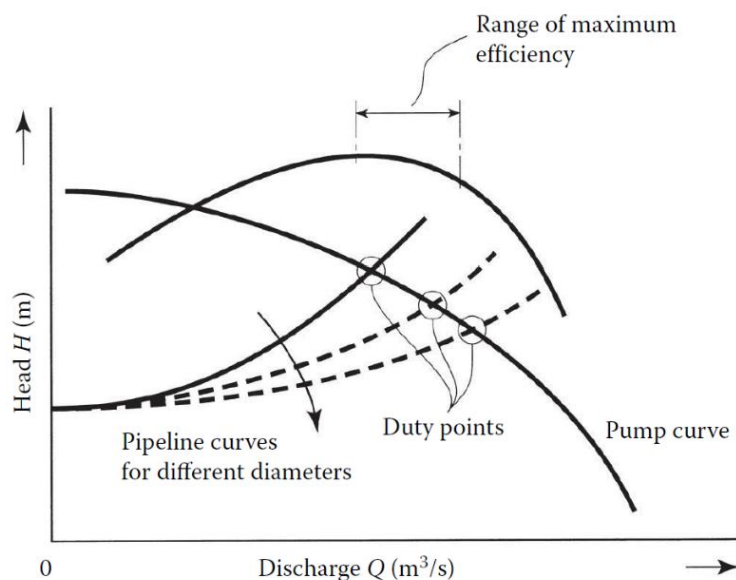
Η λειτουργία των δυναμικών αντλιών στηρίζεται στην περιστροφή μιας πτερωτής ή ενός ρότορα, που προσδίδουν κινητική ενέργεια στο νερό, Οι βασικές κατηγορίες δυναμικών αντλιών είναι:

- οι φυγοκεντρικές αντλίες, οι οποίες είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες αντλίες στο δίκτυο ύδρευσης, καθώς αποδίδουν αποτελεσματικά για ένα μεγάλο εύρος παροχών νερού. Οι φυγοκεντρικές αντλίες διαθέτουν στροφέιο που φέρει πτερύγια και βρίσκεται μέσα στο κέλυφος της αντλίας. Το στροφέιο περιστρέφεται από ένα περιστρεφόμενο άξονα, με αποτέλεσμα το στροφέιο να ωθεί το νερό με πίεση εκτός της αντλίας.
- οι αντλίες αξονικής ροής, οι οποίες διαθέτουν μια έλικα που στεγάζεται μέσα σε ένα σωλήνα που λειτουργεί ως σωλήνας παροχής. Η μονάδα ισχύος περιστρέφει την προπέλα μέσω ενός μακρού άξονα που βρίσκεται στη μέση του σωλήνα, με αποτέλεσμα το νερό να ανυψώνεται στον σωλήνα. Οι αντλίες αυτές είναι πολύ αποτελεσματικές στην ανύψωση μεγάλων παροχών νερού υπό χαμηλή πίεση. Συγκεκριμένα, ενδείκνυνται για την άντληση νερού από ποτάμια ή λίμνες σε κανάλια για άρδευση ή αποστράγγιση, όπου απαιτείται η μεταφορά μεγάλων παροχών νερών για μικρή απόσταση.
- οι αντλίες μικτής ροής, οι οποίες αποτελούν ένα συνδυασμό φυγοκεντρικών και αξονικών αντλιών, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματά τους. Δηλαδή, μπορούν να αντλήσουν μεγαλύτερες παροχές νερού σε σχέση με τις φυγοκεντρικές αντλίες και παράλληλα δημιουργώντας υψηλότερη πίεση από τις αντλίες αξονικής ροής [19, κεφ.6].

5.5.3.3 Σύνδεση αντλίας με καταθλιπτικό αγωγό

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος αντλιοστασίου-καταθλιπτικού αγωγού εξαρτάται τόσο από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά, όσο και από το κόστος. Σχετικά με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά, το σημείο λειτουργίας της αντλίας για ένα δεδομένο σύστημα προσδιορίζεται διάγραμμα όπως αυτό του σχήματος (5.7). Η αντλία αντιπροσωπεύεται από τις καμπύλες λειτουργίας και απόδοσης, οι οποίες προσδιορίζονται από τον κατασκευαστή για δεδομένο τύπο αντλίας, ενώ ο καταθλιπτικός αγωγός

αντιπροσωπεύεται από την αντίστοιχη καμπύλη λειτουργίας αγωγού, η οποία προκύπτει μέσω υδραυλικών υπολογισμών. Το σημείο που τέμνονται οι δύο καμπύλες λειτουργίας είναι το μοναδικό σημείο στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει το συγκεκριμένο σύστημα αντλιοστασίου-καταθλιπτικού αγωγού. Παράλληλα, για να θεωρηθεί ο συνδυασμός αποδεκτός το σημείο τομής των δύο καμπυλών, πρέπει να βρίσκεται εντός του αποδεκτού εύρους απόδοσης για την αντλία. Επίσης, στο σχήμα (5.7) παρουσιάζονται και οι καμπύλες λειτουργίας διαφορετικών αγωγών, οι οποίες θα αποδίδουν ένα αποδεκτό από υδραυλικής άποψης σύστημα. Γίνεται αντιληπτό, ότι τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της ροής μπορεί να επιτευχθούν από διαφορετικά συστήματα. Για τις εναλλακτικές αυτές, πρέπει να ακολουθήσει η οικονομική ανάλυση έτσι ώστε να διαμορφωθεί το βέλτιστο αντλιοστάσιο [19, κεφ.6].



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα σύνδεσης αντλίας-καταθλιπτικού αγωγού [54].

5.5.4 Δεξαμενές Αποθήκευσης

Οι δεξαμενές αποθήκευσης καθαρού νερού αποτελούν ένα εκ των βασικών στοιχείων των δικτύων ύδρευσης. Τα μέσα αποθήκευσης βρίσκονται στη μονάδα επεξεργασίας, στο τέλος του εξωτερικού υδραγωγείου ή σε οποιοδήποτε άλλο σημείο του εσωτερικού υδραγωγείου. Τα κυριότερα μέσα αποθήκευσης νερού είναι οι επίγειες και υπόγειες δεξαμενές, ενώ πιο σπάνια χρησιμοποιούνται υδατόπυργοι, οι οποίοι περιορίζονται σε περιοχές με μικρή κλίση, καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής.

Η επιλογή της θέσης εγκατάστασης της δεξαμενής επηρεάζει τη λειτουργία και κατ' επέκταση τον σχεδιασμό του συνόλου των υδρευτικών έργων. Κατά τον υδραυλικό σχεδιασμό δεξαμενών αποθήκευσης τα μεγέθη που λαμβάνονται υπόψη είναι η α) ωφέλιμη χωρητικότητα, η οποία καθορίζεται από τον όγκο ρύθμισης εξισορρόπησης και τον όγκο ασφαλείας, β) η ανώτατη στάθμη λειτουργίας και γ) η κατώτατη στάθμη λειτουργίας. Ο όγκος ρύθμισης εξισορρόπησης εξαρτάται από τις διακυμάνσεις της ζήτησης του νερού σε ημερήσιο επίπεδο και υπολογίζεται μέσω ενός ισοζυγίου εκροής/εκροής για τη δεξαμενή σε ωριαία βάση, συνήθως υποθέτοντας σταθερή παραγωγή που τροφοδοτεί τη δεξαμενή και μεταβλητή ζήτηση που παρέχεται από αυτήν. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κατανάλωσης, ο όγκος εξισορρόπησης κυμαίνεται μεταξύ 10% και 30% της μέγιστης κατανάλωσης [16]. Ο όγκος ασφαλείας αφορά τη λειτουργία της δεξαμενής κάτω από μη

ομαλές συνθήκες, όπως διαστήματα συντήρησης, περιπτώσεις βλάβης του εξωτερικού υδραγωγείου ή πυρκαγιά. Τέλος, η κατώτατη και ανώτατη στάθμη λειτουργίας επιβάλλονται με σκοπό η δεξαμενή να μην παραμείνει στεγνή και ως προστασία έναντι υπερχειλίσεων της δεξαμενής, αντίστοιχα. Σημειώνεται πως η διαστασιολόγηση των δεξαμενών, εφόσον πρόκειται για ημερήσια ρύθμιση, καθορίζεται από τις συνθήκες κατανάλωσης της δυσμενέστερης ημέρας του έτους σχεδιασμού [11, κεφ.10].

5.5.5 Φρεάτια Πιεζοθραύσης

Η πίεση στους αγωγούς του δικτύου δεν πρέπει να ξεπερνά μια μέγιστη τιμή, καθώς εντείνεται ο κίνδυνος πρόκλησης μιας διαρροής ή θραύσης στο δίκτυο. Για να αποφευχθούν τέτοιες καταστάσεις, στα σημεία του δικτύου, όπου εκτιμάται ότι θα αναπτυχθούν υδροστατικές πιέσεις μεγαλύτερες από τις επιτρεπτές, κατασκευάζεται ένα φρεάτιο πιεζοθραύσης, το οποίο «σπάει» την πίεση που έχει αναπτυχθεί. Σαν φρεάτια πιεζοθραύσης μπορούν να λειτουργήσουν οι θάλαμοι διανομής και συλλογής, αλλά και οι δεξαμενές αποθήκευσης και καθαρισμού. Συνήθως, τα φρεάτια πιεζοθραύσης χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της πίεσης σε:

1. σημεία που το νερό κατεβαίνει από μεγάλο υψόμετρο υπό την επίδραση της βαρύτητας, και η πίεση δεν μπορεί να ελεγχθεί διαφορετικά.
2. σε περιπτώσεις που η κλίση είναι αρκετά μεγάλη, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υψηλές ταχύτητες παροχής και κατ' επέκταση υψηλή υδροστατική πίεση.

Ο αριθμός και τα σημεία εγκατάστασης των φρεατίων πιεζοθραύσης, καθορίζονται από τα σημεία υψηλής πίεσης του δικτύου, τα οποία προσδιορίζονται μέσω υδραυλικών υπολογισμών. Επίσης, ο χώρος εγκατάστασης τους θα πρέπει να επιλέγεται με βάση τη διαθεσιμότητα των υλικών για την κατασκευή και το κόστος κατασκευής [11, κεφ.11].

5.6 Μέθοδοι άρδευσης

5.6.1 Γενικά

Κατά την άρδευση μιας καλλιέργειας πραγματοποιείται είναι η πρόσθετη παροχή νερού με σκοπό να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες σε βαθιά διήθηση και επιφανειακή απορροή. Το αρδευτικό δίκτυο ορίζεται ως το σύνολο των μέσων μεταφοράς του νερού από την πηγή, και διανομής του στην περιοχή που λαμβάνει χώρα η εκάστοτε καλλιέργεια. Με κριτήριο τον τρόπο εφαρμογής του νερού, οι κυριότερες μέθοδοι άρδευσης είναι η α) επιφανειακή άρδευση, β) η άρδευση με καταιονισμό και γ) η μικροάδρευση. Στη συνέχεια της ενότητας θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά των εναλλακτικών μεθόδων άρδευσης [55].

5.6.2 Μέθοδοι επιφανειακής άρδευσης

Στις μεθόδους επιφανειακής άρδευσης το νερό εφαρμόζεται στην επιφάνεια του χωραφιού. Το νερό είτε είναι στάσιμο όταν η κλίση της επιφάνειας του χωραφιού είναι μηδενική (οριζόντια άρδευση), είτε εν κινήσει όταν η επιφάνεια του χωραφιού εμφανίζει κλίση που προκαλεί τη ροή του νερού (κεκλιμένη άρδευση). Στις μεθόδους επιφανειακής άρδευσης και ιδιαίτερα στις περιπτώσεις κεκλιμένης άρδευσης, το νερό διοχετεύεται από ένα η περισσότερα σημεία και στη συνέχεια ρέει κατά μήκος της ξηρής επιφάνειας του εδάφους, ενώ παράλληλα ένα ποσοστό του νερού διηθείται στο έδαφος. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να γίνει πλήρης διαβροχή της ξηρής επιφάνειας ονομάζεται χρόνος προέλασης. Η διοχέτευση του νερού διαρκεί περισσότερο του χρόνου προέλασης, έτσι ώστε να διηθηθεί η αναγκαία ποσότητα νερού έως ότου ακολουθήσει η διακοπή της παροχής. Η φάση αυτή καλείται φάση αποθήκευσης, ενώ το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη διακοπή της παροχής μέχρι την απόσυρση του νερού από το σημείο εξόδου ονομάζεται χρόνος επιβράδυνσης. Στη συνέχεια ακολουθεί η φάση απόσυρσης, της οποίας το τέλος σηματοδοτείται με την απομάκρυνση του νερού στο σύνολο του συστήματος.

Τα συστήματα επιφανειακής άρδευσης περιλαμβάνει τις ακόλουθες μεθόδους:

1. *Άρδευση με κατάκλυση*
2. *Άρδευση με περιορισμένη διάχυση*
3. *Άρδευση με αυλάκια*

Κατά τον σχεδιασμό ενός επιφανειακού συστήματος άρδευσης πρέπει να γίνει εκτίμηση του βάθους άρδευσης, καθώς και της ταχύτητας ροής του νερού, η οποία εξαρτάται από την κλίση του εδάφους, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και την παροχή εισόδου. Ακόμα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα γεωγραφικά και τοπολογικά χαρακτηριστικά του χωραφιού [55].

5.6.3 Μέθοδοι καταιονισμού

Στις μεθόδους καταιονισμού το νερό παρέχεται σε όλη την επιφάνεια του χωραφιού μέσω εκτοξευτήρων, κατά τρόπο που παρομοιάζει τις φυσικές βροχοπτώσεις. Κατά συνέπεια, παρατηρείται ομοιομορφία και καλύτερος έλεγχος της διανομής του νερού σε σύγκριση με τις μεθόδους επιφανειακής άρδευσης. Οι μέθοδοι καταιονισμού ενδείκνυνται όταν η διαθέσιμη παροχή άρδευσης είναι σχετικά μικρή και όταν το έδαφος είναι πολύ διαπερατό, ανομοιόμορφο, αβαθές, με υψηλή υπόγεια στάθμη, μεγάλη κλίση και ανώμαλη τοπογραφία. Τα κύρια τμήματα του δικτύου είναι τα ακόλουθα:

- το αντλητικό συγκρότημα, το οποίο αποτελείται από τον κινητήρα και την αντλία και έχει σκοπό να εξασφαλίζει το μέγεθος και την πίεση παροχής που απαιτούνται για τη σωστή λειτουργία του αρδευτικού δικτύου
- το δίκτυο μεταφοράς, το οποίο αποτελείται από αγωγούς που είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά του νερού υπό πίεση σε όλες τις υδροληψίες των αγωγών εφαρμογής
- το δίκτυο εφαρμογής, το οποίο απαρτίζεται από αγωγούς μικρότερης διατομής πάνω στους οποίους τοποθετούνται οι εκτοξευτήρες

- οι εκτοξευτήρες, οι οποίοι διοχετεύουν το νερό στον αέρα με τη μορφή σταγόνων μέσα από τα ακροφύσια, τα οποία ρυθμίζουν την παροχή, την ακτίνα εκτόξευσης, την κατανομή και το μέγεθος των σταγόνων

Ανάλογα με τον τρόπο εγκατάστασης και λειτουργίας, τα συστήματα καταιονισμού κατηγοριοποιούνται σε μόνιμα, όπου οι αγωγοί μεταφοράς, αγωγοί εφαρμογής και εκτοξευτήρες τοποθετούνται σε μόνιμες θέσεις, και ημιμόνιμα, όπου μόνο οι αγωγοί εφαρμογής έχουν μεταβαλλόμενη θέση και γ) μεταφερόμενα, όπου όλα τα τμήματα του συστήματος είναι κινητά [13, κεφ.6].

5.6.4 Μικροάδρευση

Με τον όρο μικροάδρευση εννοείται η άρδευση με σταγόνες ή (εναλλακτικά όπου αυτό προσφέρεται καλύτερα) με μικροεκτοξευτήρες και υπόγεια με σταγόνες. Το κοινό χαρακτηριστικό των μεθόδων αυτών είναι ότι λειτουργούν με σχετικά χαμηλή πίεση στο δίκτυο και χαμηλές παροχές ποσότητες νερού. Τα κύρια τμήματα ενός ολοκληρωμένου συστήματος μικροάδρευσης είναι :

1. το *δίκτυο μεταφοράς*, το οποίο αποτελείται από τους κεντρικούς αγωγούς μεταφοράς, οι οποίοι διοχετεύουν το νερό στους αγωγούς τροφοδοσίας. Από εκεί, το νερό τροφοδοτείται με την απαιτούμενη παροχή και φορτίο στις υδροληψίες των αγωγών εφαρμογής. Συνήθως, χρησιμοποιούνται αγωγοί άκαμπτου PVC, ενώ του δικτύου τοποθετούνται υπόγεια, τόσο για την προστασία τους όσο και για τη διευκόλυνση της κυκλοφορίας στο χωράφι των καλλιεργητικών μηχανημάτων.
2. το *δίκτυο εφαρμογής*, το οποίο περιλαμβάνει εύκαμπτους σωλήνες πολυαιθυλενίου. Σε προκαθορισμένες θέσεις των αγωγών τοποθετούνται οι σταλάκτες ή μικροεκτοξευτήρες, οι οποίοι διοχετεύουν το νερό στο έδαφος με τη μορφή σταγόνων.
3. η *μονάδα ελέγχου*, η οποία περιλαμβάνει μετρητές, μέσα ρύθμισης και συσκευές εφαρμογής λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. [13, κεφ.7].

5.6.5 Αρδευτική αποδοτικότητα

Κατά τις διαδικασίες άρδευσης παρατηρούνται απώλειες σε όλο το μήκος των συστημάτων άρδευσης, οπότε απαιτούνται μεγαλύτερες ποσότητες νερού από αυτές που πραγματικά απαιτούνται για την κάλυψη των αναγκών των καλλιεργειών. Οι επιπρόσθετες ποσότητες νερού που απαιτούνται καθορίζεται από τον συντελεστή αρδευτικής αποδοτικότητας, ο οποίος εξαρτάται από τον τύπο του αρδευτικού δικτύου. Η γνώση της αρδευτικής αποδοτικότητας πέρα από τη λειτουργία του δικτύου άρδευσης καθορίζει και τον σχεδιασμό του. Η αρδευτική αποδοτικότητα E_p ενός αρδευτικού δικτύου που περιέχει ταμιευτήρα υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_p = E_s \cdot E_d \cdot E_f \quad (5.25)$$

όπου E_s η αποδοτικότητα αποθήκευσης του ταμιευτήρα, και E_d και E_f η αρδευτική ικανότητα του δικτύου διανομής και πλήρους άρδευσης, αντίστοιχα. Οι τιμές των αποδοτικότητας διανομής και εφαρμογής, προκύπτουν από δίκτυα που βρίσκονται σε λειτουργία για πολλά χρόνια [55].

5.7 Προβλήματα Δικτύων Ύδρευσης

5.7.1 Γενικά

Κατά τη λειτουργία των δικτύων ύδρευσης συχνά παρουσιάζονται προβλήματα που επηρεάζουν τόσο την κάλυψη των αναγκών κατανάλωσης, όσο και την ποιότητα του νερού. Τα πιο σημαντικά προβλήματα που εμφανίζουν τα δίκτυα ύδρευσης επικεντρώνονται στο ζήτημα των απωλειών, στην έλλειψη εξασφάλισης ικανοποιητικής παροχής και στην αλλοίωση της ποιότητας του νερού από το σημείο λήψης μέχρι την τελική κατανάλωση.

Οι απώλειες νερού στο δίκτυο ύδρευσης οφείλονται σε διαρροές των αγωγών, σε περιπτώσεις θραύσης τους, αλλά και σε ποσότητες νερού που χάνονται λόγω μη εξουσιοδοτημένης χρήσης του νερού. Ο υπολογισμός των απωλειών δεν είναι συνήθως μια εύκολη διαδικασία, καθώς η εκτίμηση των απωλειών λόγω υπομέτρησης, κοινωφελή ή δημόσιας χρήσης νερού που δεν μετριέται ή πυρόσβεσης είναι εξαιρετικά δύσκολη. Κατά κύριο λόγο, τα αποδεκτά όρια απωλειών νερού για ένα αστικό δίκτυο ύδρευσης βρίσκονται μεταξύ 5-10 %. Για τον προσδιορισμό των απωλειών, οι κυριότεροι δείκτες που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Μη τιμολογούμενο νερό, το οποίο ορίζεται ως η διαφορά της μετρούμενης κατανάλωσης από το σημείο διοχέτευσης του νερού στην είσοδο δικτύου. Συνήθως μεγάλες τιμές του δείκτη συνεπάγονται με την ύπαρξη σημαντικών απωλειών νερού στο δίκτυο.
- Ειδική κατανάλωση νερού, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της παροχής εισόδου προς τον εξυπηρετούμενο πληθυσμό στη διάρκεια μίας ημέρας. Αν και η τιμή της ειδικής κατανάλωσης διαφέρει από χώρα σε χώρα, μια διεθνώς αποδεκτή τιμή θεωρείται η ειδική κατανάλωση 200 λίτρων ανά κάτοικο και ημέρα. Τιμές μεγαλύτερη από αυτή σηματοδοτούν καταστάσεις απωλειών νερού.
- Υδατικό αποτύπωμα, το οποίο εκφράζει την ποσότητα γλυκού νερού που χρησιμοποιείται κατά την παραγωγή προϊόντων και υπηρεσιών.

Η φυσική ακεραιότητα του δικτύου αφορά την αντοχή των αγωγών σε εσωτερικές πιέσεις και εξωτερικές φορτίσεις, όπως καιρικές και εδαφολογικές συνθήκες. Η μείωση της φυσικής ακεραιότητας αντικατοπτρίζεται από την ποσότητα και τον τύπο θραύσεων (π.χ. περιμετρική, αξονική, σημειακή, ανομοιόμορφη κ.α.). Συγκεκριμένα, ο δείκτης που χρησιμοποιείται στην προκειμένη περίπτωση είναι ο ρυθμός εμφάνισης βλαβών (στο σύνολο ή σε τμήμα του δικτύου), ο οποίος εκφράζεται ως ο αριθμός βλαβών ανά μήκος αγωγών και ανά χρονικό διάστημα επανεμφάνισης της βλάβης. Για τον περιορισμό των βλαβών στο δίκτυο ύδρευσης είναι αναγκαία η τήρηση βάσης δεδομένων σχετικά με τη συχνότητα και τον τύπο των βλαβών, καθώς και η σωστή ανάλυση των δεδομένων λειτουργίας του.

Η παροχρητευτική ικανότητα του δικτύου ύδρευσης εκφράζει τη δυνατότητα του δικτύου να καλύψει τις ανάγκες κατανάλωσης σε ποσότητα νερού και σε κατάλληλη πίεση. Η αδυναμία εκπλήρωσης

αυτών των στόχων συνεπάγεται μειωμένη παροχτευτική ικανότητα. Συνεπώς, η παροχτευτική ικανότητα του δικτύου περιορίζεται σε περιπτώσεις που μειώνεται η πίεση παροχής σε περιόδους αιχμής της ζήτησης ή υπάρχει δυσκολία στην αναπλήρωση του νερού στις δεξαμενές αποθήκευσης. Συνήθως, η μειωμένη παροχτευτική ικανότητα του δικτύου οφείλεται στη λανθασμένη διαστασιολόγηση των αγωγών και στη δημιουργία θρόμβων ή κρούστας στα τοιχώματά.

Η ποιότητα του νερού επηρεάζεται άμεσα από την κατάσταση του δικτύου και την πηγή προέλευσης του νερού. Για τη διασφάλιση της ποιότητας του ποσίμου νερού πρέπει λαμβάνουν χώρα συνεχείς έλεγχοι, έτσι ώστε να ικανοποιούνται πάντα οι απαιτήσεις ποιότητας που έχουν θεσμοθετηθεί από τις αρμόδιες αρχές. [12, κεφ.1].

5.7.2 Αιτίες προβλημάτων

Για την επίλυση των προβλημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός των αιτιών που τα προκαλούν. Οι σχέσεις μεταξύ αιτίας-αιτιατού δεν είναι μονοσήμαντα καθορισμένες, αφού ένα πρόβλημα μπορεί να είναι αποτέλεσμα πολλών αιτιών. Οι σημαντικότερες αιτίες προβλημάτων είναι:

1. Η *διάβρωση των αγωγών* ενός δικτύου ύδρευσης, η οποία διάβρωση ουσιαστικά είναι αποτέλεσμα μίας ηλεκτροχημικής αντίδρασης που συμβαίνει μεταξύ δύο υλικών με διαφορετικό δυναμικό, όταν αυτά έρθουν σε επαφή. Η διάβρωση λαμβάνει χώρα τόσο στο εσωτερικό των αγωγών, όπου ο διαβρωτικός παράγοντας είναι το νερό, όσο και εξωτερικά, όπου η διάβρωση προκαλείται λόγω της επαφή του αγωγού με το έδαφος. Στη δεύτερη περίπτωση, τα χαρακτηριστικά του εδάφους καθορίζουν το ρυθμό της διάβρωσης. Τα σημαντικότερα προβλήματα που σχετίζονται με τη διάβρωση των αγωγών είναι οι απώλειες νερού, η μείωση της παροχτευτικής ικανότητας και η αλλοίωση της ποιότητας του νερού.
2. Η μείωση της παροχτευτικής ικανότητας, η οποία διαταράσσει τη συνολική λειτουργία του δικτύου ύδρευσης. Οι συνήθεις λόγοι που οδηγούν σε μειωμένη παροχτευτική ικανότητα είναι τα λειτουργικά σφάλματα, η έλλειψη ελέγχου στο δίκτυο αγωγών, η λανθασμένη διαστασιολόγηση των αγωγών και γενικότερο ο εσφαλμένος σχεδιασμός του δικτύου. Επίσης, η παροχτευτική ικανότητα μειώνεται λόγω της υποδιαστασιολόγησης των δεξαμενών αποθήκευσης, η οποία δημιουργεί διακυμάνσεις στη στάθμη του νερού. Τέλος,
3. Οι *διαρροές*, οι οποίες παρουσιάζονται συνήθως στις ενώσεις των αγωγών και στις συνδέσεις του δικτύου με τους καταναλωτές. Οι διαρροές είναι αποτέλεσμα εσωτερικών πιέσεων και εξωτερικών φορτίων, οι οποίες με την πάροδο του χρόνου οδηγούν σε αστοχία του υλικού. Αξίζει να σημειωθεί πως οι διαρροές δημιουργούν σημαντικές απώλειες νερού σε βάθος χρόνου, καθώς ο εντοπισμός τους είναι ιδιαίτερα δύσκολος.
4. Οι *θραύσεις*, οι οποίες είτε προκύπτουν με την πάροδο του χρόνου σε σημεία διαρροής, είτε συμβαίνουν ακαριαία σε ένα σημείο. Οι θραύσεις προκαλούν σημαντικά προβλήματα στη λειτουργία του δικτύου ύδρευσης, ωστόσο ο εντοπισμός της θέσης τους και η αποκατάστασή τους είναι σχετικά εύκολη διαδικασία. Οι κυριότερες αιτίες θραύσης είναι η υπέρβαση της αντοχής των αγωγών σε εξωτερικές φορτίσεις και εσωτερικές πιέσεις, η αστοχία του υλικού, η διάβρωση αλλά και η σεισμική δραστηριότητα.

5. Η υποβάθμιση της ποιότητας του νερού, η οποία συμβαίνει κατά τη μεταφορά του νερού στο δίκτυο στους αγωγούς. Τα βασικά αίτια της υποβάθμισης της ποιότητας του νερού είναι η ρύπανση με ουσίες που εισέρχονται από οπές που σχηματίζονται στους αγωγούς και η διάχυση ουσιών από τα τοιχώματα των αγωγών λόγω διάβρωσής τους.
6. Άλλα προβλήματα, τα οποία σχετίζονται με τις φαινόμενες απώλειες και συσκευές οι οποίες λειτουργούν λανθασμένα [12, κεφ.1].

5.8 Βέλτιστη Λειτουργία Δικτύων Ύδρευσης

5.8.1 Γενικά

Η λειτουργία ενός δικτύου ύδρευσης μπορεί να θεωρηθεί ως βέλτιστη όταν η παροχή νερού διοχετεύεται κατά τρόπο τέτοιο που οι απώλειες ελαχιστοποιούνται και η ποιότητά εξυπηρέτησης των καταναλωτών είναι άριστη. Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι ολοκληρωμένοι τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων που παρουσιάζονται στα δίκτυα ύδρευσης (όπως αυτά περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα). Οι ενέργειες που πραγματοποιούνται για την ολοκληρωμένη αντιμετώπιση των προβλημάτων αποσκοπούν στην αντιμετώπιση ενός μεμονωμένου προβλήματος ή ενός συνόλου προβλημάτων και σχετίζονται με αλλαγές στα χαρακτηριστικά του δικτύου και βελτιώσεις στη λειτουργία και τη συντήρηση του δικτύου [12, κεφ.6-10].

5.8.2 Βελτίωση των φυσικών χαρακτηριστικών του δικτύου ύδρευσης

Η βέλτιστη λειτουργία του δικτύου ύδρευσης προϋποθέτει ότι το δίκτυο περιλαμβάνει τα κατάλληλα μέσα ρύθμισης και μέτρησης της παροχής του νερού. Για να διασφαλιστεί η ορθή μέτρηση της κατανάλωσης, τοποθετούνται οι απαραίτητοι μετρητές, ενώ σε περίπτωση βλάβης των υφιστάμενων μετρητών είναι αναγκαία η άμεση επισκευή ή αντικατάστασή τους. Σε αυτό συντελούν επίσης οι βαλβίδες απομόνωσης και οι βαλβίδες εξαερισμού, οι οποίες τοποθετούνται στα υψηλότερα σημεία του δικτύου. Τα κυριότερα μέσα ρύθμισης αφορούν την αποφυγή εμφάνισης υδραυλικού πλήγματος. Μερικά εξ αυτών είναι οι ειδικές βάνες που απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος του πλήγματος, οι δεξαμενές τροφοδοσίας και οι αντλίες παράκαμψης.

Επιπροσθέτως, στα πλαίσια της βελτίωσης των χαρακτηριστικών του δικτύου περιλαμβάνεται ο καθαρισμός των εσωτερικών τοιχωμάτων, η κατάλληλη επένδυση των αγωγών με μονωτικά και η εξωτερική ενίσχυση της αντοχής των τοιχωμάτων των αγωγών. Η εκτέλεση των παραπάνω ενεργειών περιορίζει την εμφάνιση διαβρώσεων των τοιχωμάτων των αγωγών, μειώνει τον κίνδυνο εμφάνισης αστοχίας του υλικού, ενώ παράλληλα διασφαλίζει την ποιότητα του νερού. Για την αποφυγή των διαβρώσεων, χρησιμοποιούνται χημικά μέσα, γνωστά ως αναστολείς, τα οποία προστίθενται σε μικρή ποσότητα στο νερό και επιβραδύνουν την ανάπτυξη της διάβρωσης [12, κεφ.6-10].

5.8.3 Βελτίωση λειτουργίας και συντήρησης δικτύου ύδρευσης

Συχνά, η λειτουργία του δικτύου υφίστανται αλλαγές και βελτιώσεις, με σκοπό το δίκτυο να ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν καλύτερα στις απαιτήσεις παροχής του νερού και εξυπηρέτησης των καταναλωτών. Στα πλαίσια αυτά διαφοροποιούνται οι πρακτικές εκσκαφής, κατασκευής και

εγκατάστασης των αγωγών. Το υφιστάμενο δίκτυο διαμορφώνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να προσαρμόζεται η οξύτητα του νερού εντός των αγωγών και να περιορίζονται τα φαινόμενα οξείδωσης των τοιχωμάτων που ενδέχεται να προκαλέσουν διαβρώσεις. Επιπλέον, συχνά τροποποιείται η λειτουργία των αντλιών και των βαλβίδων πίεσης έτσι ώστε, βελτιστοποιείται η λειτουργία τους.

Όσον αφορά τη συντήρηση του δικτύου, καθίσταται αναγκαίος ο τακτικός καθαρισμός των αγωγών, ο συνεχής έλεγχος της λειτουργίας των βαλβίδων πίεσης και η γρήγορη ανίχνευση και αποκατάσταση διαρροών και θραύσεων στους αγωγούς. Τέλος, απαιτείται η σωστή συντήρηση των μετρητών κατανάλωσης, αλλά και ο εντοπισμός της μη εξουσιοδοτημένης χρήσης του νερού [12, κεφ.6-10].

5.9 Συμπεράσματα

Βασικός σκοπός του 5^{ου} κεφαλαίου είναι η ανάλυση και η μελέτη των δικτύων ύδρευσης στο περιβάλλον μιας πόλης. Στην αρχή πραγματοποιείται μία πιο διευρυμένη προσέγγιση για τη διαμόρφωση ενός δικτύου ύδρευσης με συγκεκριμένη αναφορά στο διαχωρισμό αυτού στα δύο βασικά του μέρη που είναι το εξωτερικό και το εσωτερικό υδραγωγείο.

Στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια προσέγγισης και εκτίμησης της ζήτησης νερού σε ένα δίκτυο πόλης, ανάλογα με τις δραστηριότητες που κυριαρχούν σε αυτήν, ενώ παράλληλα σε αυτό το πλαίσιο εξετάζεται η διακύμανση της κατανάλωσης και η πρόβλεψη αυτής.

Έπειτα παρατίθενται γενικοί ορισμοί περί υδάτινων πόρων. Ταυτόχρονα αναφέρονται οι απαιτήσεις που αφορούν την ποιότητα του πόσιμου νερού, καθώς επίσης και της ποιότητας των δικτύων ύδρευσης. Επιπλέον παρουσιάζονται και οι δείκτες μέσω των οποίων επιτυγχάνεται τελικά η αξιολόγηση ενός δικτύου νερού.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται περιληπτικά τυπικοί υπολογισμοί που αφορούν τα δίκτυα ύδρευσης του εσωτερικού και εξωτερικού υδραγωγείου, κυρίως με σχέσεις κλειστών και ανοικτών αγωγών, καθώς επίσης και σχέσεις που ισχύουν σε κλάδους και κόμβους, ενώ δεν παραλείπονται αναφορές σε σχέσεις παροχής νερού.

Κατόπιν αναφέρονται στοιχεία και μέρη από την κατασκευαστική σχεδίαση των δικτύων ύδρευσης, ενώ στη συνέχεια γίνεται μία σύντομη αναφορά στις μεθόδους άρδευσης.

Εν κατακλείδι παρουσιάζονται ενδεικτικά προβλήματα των δικτύων ύδρευσης, προσεγγίζοντας περισσότερο τις αιτίες που τα δημιουργούν, ενώ παράλληλα αναφέρονται και τρόποι με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί η βελτίωση των δικτύων που αποτελούν αντικείμενο αναφοράς αυτού του κεφαλαίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΑΡΑΛΛΗΛΙΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

6.1 Γενικά

Τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και ύδρευσης λειτουργούν με κυρίαρχο στόχο την κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών ενός αστικού περιβάλλοντος σε ηλεκτρική ενέργεια και νερό, αντίστοιχα. Στα κεφάλαια 4 και 5 που προηγούνται αναλύονται και μελετώνται σε βάθος τα δίκτυα ύδρευσης και ηλεκτρικής ενέργειας που υφίστανται σε ένα αστικό περιβάλλον. Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου γίνεται προσπάθεια παραλληλισμού αυτών των δύο δικτύων.

Βασικός σκοπός των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αδιάλειπτη τροφοδότηση των καταναλωτών για κάλυψη των φορτίων ζήτησης, παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια υψηλής ποιότητας με σταθερή τάση και συχνότητα. Με παρόμοιο τρόπο και τα δίκτυα ύδρευσης υποχρεούνται να καλύπτουν μόνιμα τους καταναλωτές με τις ζητούμενες ποσότητες ύδατος, το οποίο διατηρεί σχετικά σταθερή πίεση, ενώ συνάμα χαρακτηρίζεται από καθαρότητα και διαύγεια.

Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται μέσω των δικτύων διανομής και μεταφοράς στο σύνολο της γεωγραφικής έκτασης της Ελλάδας. Ανάλογα με την ηλεκτρική τάση που μεταφέρει το ηλεκτρικό ρεύμα εντός των αγωγών των δικτύων, τα δίκτυα αυτά χωρίζονται σε υψηλής, μέσης και χαμηλής τάσης. Κατασκευαστικά όλες οι κατηγορίες δικτύων ανήκουν στα βροχωτά δίκτυα με τη διαφορά ότι οι δύο πρώτες κατά σειρά αναφοράς κατηγορίες δικτύων έχουν ρόλο μεταφοράς, ενώ τα δίκτυα χαμηλής τάσης λαμβάνοντας ρόλο διανομής, λειτουργούν με ακτινικό τρόπο. Στα ακτινικά ηλεκτρικά δίκτυα, το εκάστοτε φορτίο εξυπηρετείται μέσα από μία μόνο γραμμή, η οποία όμως μέσω χρήσης συγκεκριμένων διατάξεων μπορεί να μετατίθεται σε διαφορετική διαδρομή.

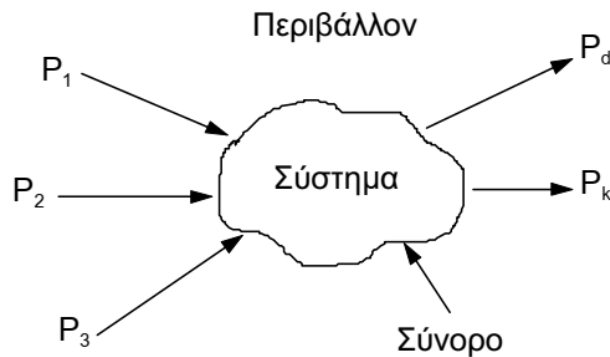
Αντίθετα με τα ηλεκτρικά δίκτυα, τα δίκτυα ύδρευσης για τη μεταφορά τους κοντά στα μεγάλα αστικά κέντρα κάνουν χρήση ακτινικών δικτύων, ενώ η διανομή του νερού μέσω του εσωτερικού υδραγωγείου πραγματοποιείται είτε με βροχωτά δίκτυα, είτε με συνδυασμό βροχωτών και ακτινικών δικτύων [14, §7.1].

6.2 Βασικά μεγέθη

6.2.1 Μέγεθος σθένου

Η προσομοίωση κάθε φυσικού συστήματος επιτυγχάνεται με τη χρήση συνιστωσών, οι οποίες ορίζονται πλήρως από μαθηματικές σχέσεις. Κατ' αυτόν τον τρόπο, για κάθε ηλεκτρικό ή υδραυλικό σύστημα υπάρχουν φυσικά μεγέθη που το περιγράφουν και παίρνουν διάφορες τιμές συναρτήσει του

χρόνου και ορίζονται ως μεταβλητές κατάστασης ενέργειας ή ισχύος του εκάστοτε συστήματος. Κάθε σύστημα στο οποίο επιτυγχάνεται ροή ισχύος μεταξύ των υποσυστημάτων του, ονομάζεται θύρα. Πολύθυρα καλούνται τα συστήματα που αποτελούνται από περισσότερες από μία θύρες. Επίσης, κάθε σύστημα διέπεται από την αρχή διατήρησης της ισχύος και λαμβάνοντας πάντα ως θετική την ενέργεια που παρέχεται στο σύστημα από το περιβάλλον (Σχήμα 6.1) προκύπτει ο ισολογισμός της ισχύος για ένα σύστημα.



Σχήμα 6.1: Φυσικό σύστημα και ροή ισχύος [13, §1.3].

$$\sum_{i=1}^k P_i = \frac{dE(t)}{dt} + P_d \quad (6.1)$$

Ως $\sum_{i=1}^k P_i$ ορίζεται το σύνολο των εισροών ισχύος, $\frac{dE(t)}{dt}$ ο ρυθμός μεταβολής της συσσωρευμένης ενέργειας και P_d ορίζεται η διαχεόμενη ισχύς.

Για τον καλύτερο σχεδιασμό και τη διεξαγωγή πορίσματος σχετικά με τη ροή ισχύος μεταξύ πολυθύρων που αλληλοσυσχετίζονται, οι μεταβλητές κατάστασης ισχύος ταξινομούνται σε μεγέθη που εξυπηρετούν. Σε αυτά ανήκουν το μέγεθος σθένους, το μέγεθος ροής, το μέγεθος γενικευμένης ορμής και το μέγεθος γενικευμένης μετατόπισης.

Ανάλογα με τον τρόπο ανταλλαγής ισχύος ορίζονται οι μεταβλητές σθένους [13, §1.4]:

Πίνακας 6.1 Μεταβλητές σθένους [13].

Πεδίο	Σθένος, $e(t)$	Μονάδα μέτρησης
Μηχανική μετατόπιση	Δύναμη, $F(t)$	[N]
Μηχανική περιστροφή	Ροπή, $T(t)$	[N·m]
Υδραυλικό	Πίεση, $P(t)$	[Pa]
Ηλεκτρικό	Τάση, $V(t)$	[V]

6.2.2 Μέγεθος ροής

Με ανάλογο τρόπο με αυτόν του ορισμού μεταβλητών σθένους, ορίζονται και οι εξής μεταβλητές ροής

Πίνακας 6.2 Μεταβλητές ροής [13].

Πεδίο	Ροή, $f(t)$	Μονάδα μέτρησης
Μηχανική μετατόπιση	Ταχύτητα, $v(t)$	[m/s]
Μηχανική περιστροφή	Γωνιακή ταχύτητα, $\omega(t)$	[rad/s]
Υδραυλικό	Παροχή όγκου, $Q(t)$	[m ³ /s]
Ηλεκτρικό	Ρεύμα, $I(t)$	[A]

Από το γινόμενο μιας μεταβλητής σθένους και μίας μεταβλητής ροής προκύπτει η ροή της ισχύος που λαμβάνει χώρα μεταξύ των υποσυστημάτων μίας θύρας, δηλαδή [13, §1.4]:

$$P(t) = e(t) \cdot f(t) \quad (6.2)$$

6.2.3 Μέγεθος γενικευμένης ορμής

Σε συνέχεια των μεταβλητών ροής και με αντίστοιχο τρόπο με αυτόν των δύο προηγούμενων πινάκων, παρατίθεται ο πίνακας (Πίνακας 6.3) που φανερώνει τις μεταβλητές γενικευμένης ορμής. Το μέγεθος της γενικευμένης ορμής όμως δεν είναι πρωτογενές, αλλά προκύπτει από το ολοκλήρωμα των μεταβλητών σθένους [33], [13, §1.4].

$$p(t) = \int e(t) dt \quad (6.3)$$

Πίνακας 6.3 Μεταβλητές γενικευμένης ορμής [33].

Πεδίο	ορμή, $p(t)$	Μονάδα μέτρησης
Μηχανική μετατόπιση	Ορμή, $p(t)$	[N·s]
Μηχανική περιστροφή	Στροφορμή, $L(t)$	[N·m·s]
Υδραυλικό	Δυναμικό ιξώδες, $\eta(t)$	[Pa·s]
Ηλεκτρικό	Μαγνητική Πεπλεγμένη ροή, $\varphi(t)$	[V·s]

6.2.4 Μέγεθος γενικευμένης μετατόπισης

Έπειτα από τις μεταβλητές γενικευμένης ορμής και με αντίστοιχο τρόπο με αυτόν των τριών προηγούμενων πινάκων, παρατίθεται ο πίνακας (Πίνακας 6.4) που φανερώνει τις μεταβλητές γενικευμένης μετατόπισης. Το μέγεθος της γενικευμένης μετατόπισης προκύπτει και αυτό από ολοκλήρωμα, με τη μόνη διαφορά πως προκύπτει από το ολοκλήρωμα των μεταβλητών ροής [33], [13, §1.4].

$$q(t) = \int f(t) dt \quad (6.4)$$

Πίνακας 6.4 Μεταβλητές γενικευμένης μετατόπισης [33].

Πεδίο	μετατόπιση, $q(t)$	Μονάδα μέτρησης
Μηχανική μετατόπιση	Μετατόπιση, $x(t)$	[m]
Μηχανική περιστροφή	Γωνία, $\theta(t)$	[rad]
Υδραυλικό	Όγκος, $V(t)$	[m ³]
Ηλεκτρικό	Φορτίο, $q(t)$	[C]

6.2.5 Ισχύς

Τόσο τα ηλεκτρικά δίκτυα, όσο και οι διατάξεις των εγκαταστάσεων των δικτύων ύδρευσης περιέχουν συσκευές που καταναλώνουν άεργο ισχύ όπως είναι οι αντλίες, οι μετασχηματιστές, οι συμπιεστές κ.α. Η τιμή της άεργου και της ενεργού ισχύος δίνονται από τις σχέσεις (2.200) και (2.199) που αναγράφονται στο κεφάλαιο 6, δηλαδή $P = \tilde{V} \cdot \tilde{I} \cdot \sin(\varphi)$ και $Q = \tilde{V} \cdot \tilde{I} \cdot \cos(\varphi)$, όπου \tilde{V}, \tilde{I} οι ενεργές τιμές της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος αντίστοιχα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ενεργός ισχύς P είναι η χρήσιμη ισχύς που μεταφέρεται και αποδίδεται πάνω στη σύνθετη αντίσταση, ενώ η άεργος ισχύς Q αποθηκεύεται και αποδίδεται ξανά στο κύκλωμα μέσω της ύπαρξης πηνίων και πυκνωτών, χωρίς όμως να παράγει έργο [25].

6.3 Βασικά στοιχεία

6.3.1 Πηγές

Από τα στοιχεία που προαναφέρθηκαν, τα μοναδικά που προσδίδουν ισχύ σε ένα σύστημα είναι οι πηγές ροής και σθένους. Και τα δύο αποτελούν στοιχεία που διατηρούνται σταθερά με το χρόνο ή μεταβάλλονται. Όπως προκύπτει και από τους πίνακες 6.1 και 6.2, το ζεύγος των μεταβλητών που αντιστοιχούν στο ηλεκτρικό πεδίο είναι η μεταβλητή τάση ως πηγή σθένους και η μεταβλητή ένταση ως πηγή ροής.

Κατά αντίστοιχο τρόπο, από τους ίδιους πίνακες προκύπτουν οι μεταβλητές που λειτουργούν ως πηγές για το υδραυλικό πεδίο. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβλητή πίεση του ρευστού αποτελεί την πηγή σθένους, ενώ η παροχή του ρευστού αποτελεί την πηγή ροής στο υδραυλικό ανάλογο.

Σε πρακτικό επίπεδο, ξεφεύγοντας από τον μικρόκοσμο των μεγεθών, η προσοχή εστιάζεται σε μεγαλύτερα συστήματα. Έτσι σε ηλεκτρικά συστήματα, οι συσκευές που λειτουργούν ως πηγές ροής και σθένους είναι οι γεννήτριες, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος συνεχούς ή εναλλασσόμενου.

Παράλληλα σε υδραυλικά συστήματα, οι συσκευές που λειτουργούν ως πηγές ροής και σθένους είναι οι αντλίες (ύδρευσης ή άρδευσης), οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν ή να συμπιέζουν ένα ρευστό [20, §1.1], [13, §1.4].

6.3.2 Στοιχείο γενικευμένης αντίστασης

Το στοιχείο της γενικευμένης αντίστασης R είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τις μεταβλητές ροής και σθένους και υφίσταται σε όλα τα πεδία που αναφέρονται στους πίνακες των προηγούμενων παραγράφων. Συγκεκριμένα προκύπτει από τη σχέση:

$$e = R \cdot f \quad (6.5)$$

Παρακάτω φαίνεται η εφαρμογή της σχέσης 6.5 σε κάθε ένα από τα πεδία που αναφέρονται στους πίνακες 6.1 έως 6.4.

- Πεδίο μηχανικής μετατόπισης: $F = b \cdot v$
- Πεδίο μηχανικής περιστροφής: $T = b \cdot \omega$
- Υδραυλικό πεδίο: $P = R \cdot Q$
- Ηλεκτρικό πεδίο: $V = R \cdot I$

Η αντιστοιχία του στοιχείου της γενικευμένης αντίστασης στα ηλεκτρικά κυκλώματα είναι ουσιαστικά η ηλεκτρική αντίσταση, ενώ αντίστοιχα στα υδραυλικά συστήματα το ρόλο αυτό καταλαμβάνει η πτώση πίεσης που δημιουργούνται εξαιτίας της ύπαρξης τριβών μεταξύ του ρευστού και του σωλήνα.

Ο ορισμός της αντίστασης σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα προκύπτει από το νόμο του Ohm, σύμφωνα με τον οποίο η ωμική αντίσταση R ενός αγωγού ισούται από το πηλίκο της ηλεκτρικής τάσης V που εφαρμόζεται στα άκρα του αγωγού και προκαλεί τη ροή ρεύματος έντασης I προς αυτήν την ένταση I , δηλαδή:

$$R = \frac{V}{I} \quad (6.6)$$

Αντίστοιχα οι απώλειες ενέργειας ενός αγωγού εξαιτίας της τριβής του ρευστού στα τοιχώματα με δεδομένες τις τιμές της υδραυλικής αντίστασης R , της παροχής Q , του συντελεστή τριβής f και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σωλήνα με μήκος L και διάμετρο D , υπολογίζονται διαμέσου της σχέσης:

$$\Delta p = 8 \cdot \rho \cdot f \cdot \frac{L}{D^5} \cdot \frac{1}{\pi^2} \cdot Q^2 \quad (6.7)$$

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί μία βασική διαφορά που προκύπτει και από τις παραπάνω σχέσεις. Η αντίσταση που αφορά το ηλεκτρικό πεδίο, παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη από την ποσότητα ροής ηλεκτρικού ρεύματος, σε αντίθεση με την αντίσταση στο υδραυλικό πεδίο που επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ποσότητα της παροχής του ρευστού, δηλαδή αυξάνεται, όσο αυξάνεται η παροχή [13, §1.4], [7, κεφ.9], [6, §3.4].

6.3.3 Στοιχείο γενικευμένης αδράνειας

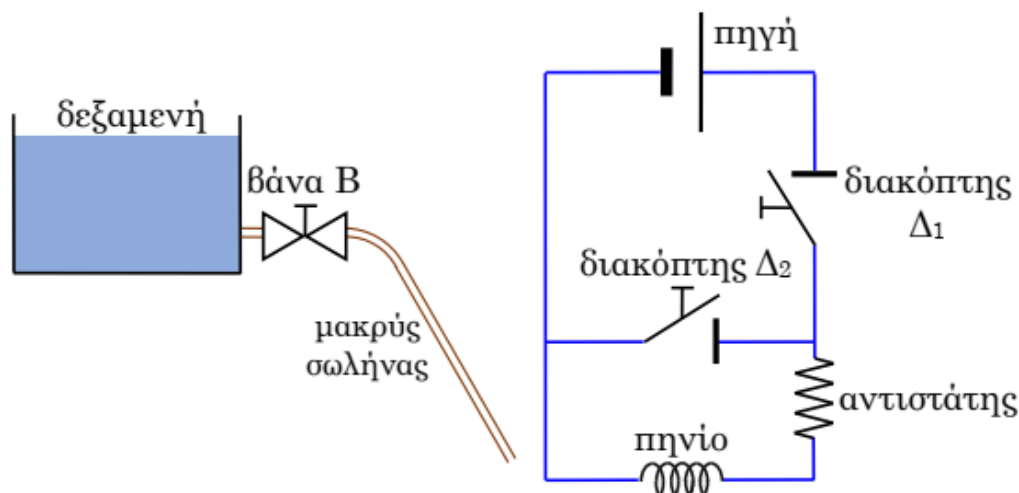
Το στοιχείο της γενικευμένης αδράνειας I , όπως και αυτό της γενικευμένης αντίστασης R είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τις μεταβλητές ροής και σθένους και υφίσταται σε όλα τα πεδία που αναφέρονται στους πίνακες των προηγούμενων παραγράφων. Συγκεκριμένα προκύπτει από τη σχέση:

$$e = I \cdot \frac{df}{dt} \quad (6.8)$$

Παρακάτω φαίνεται η εφαρμογή της σχέσης 6.8 σε κάθε ένα από τα πεδία που αναφέρονται στους πίνακες 6.1 έως 6.4.

- Πεδίο μηχανικής μετατόπισης: $F = m \cdot \frac{dv}{dt}$
- Πεδίο μηχανικής περιστροφής: $T = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$
- Υδραυλικό πεδίο: $P = I \cdot \frac{dQ}{dt}$
- Ηλεκτρικό πεδίο: $V = L \cdot \frac{dI}{dt}$

Η φυσική σημασία του στοιχείου γενικευμένης αδράνειας στα ηλεκτρικά συστήματα είναι το πηνίο, ενώ στα υδραυλικά συστήματα οι σωλήνες, αλλά πιο συγκεκριμένα οι σωλήνες που χρησιμοποιούνται για πλήρωση άλλων σωλήνων ή δεξαμενών.



Σχήμα 6.2: Στοιχείο γενικευμένης αδράνειας σε υδραυλικό (αριστερά) και ηλεκτρικό (δεξιά) πεδίο [7, σχ.13.29].

Έστω ένα υδραυλικό σύστημα (σχήμα 6.2) που αποτελείται από μία δεξαμενή με νερό, από την οποία εξέρχεται ένας αγωγός που επάνω του διαθέτει μία βάννα και στη συνέχεια ακολουθεί άλλο μακρύ τμήμα αγωγού με ελεύθερο άκρο και ύψος κατώτερο από αυτό της δεξαμενής. Όταν η βάννα ανοίγει, τότε παρατηρείται ροή νερού μέσα από το μακρύ τμήμα του αγωγού. Ακαριαία, τη στιγμή που η βάννα κλείνει διακόπτει τη ροή νερού στο σωλήνα, ωστόσο στο ελεύθερο άκρο του παρατηρείται ακόμη ροή εξαιτίας της αδράνειας.

Με αντίστοιχο τρόπο, ένα ηλεκτρικό κύκλωμα (σχήμα 6.2) αποτελείται από μία πηγή, δύο διακόπτες, μία αντίσταση και ένα πηνίο. Τη χρονική στιγμή που κλείνει ο διακόπτης Δ1 ηλεκτρικό ρεύμα ρέει στο πηνίο και παρατηρείται μείωση της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του. Έπειτα, ο διακόπτης Δ1 ανοίγει και ο διακόπτης Δ2 κλείνει. Τότε στα άκρα του πηνίου αναπτύσσεται αντιηλεκτρεγερτική δύναμη που προσπαθεί να διατηρήσει το ρεύμα που υπόκειται σε συνεχόμενη μείωση [13, §1.4], [7, §13.5].

6.3.4 Στοιχείο γενικευμένης χωρητικότητας

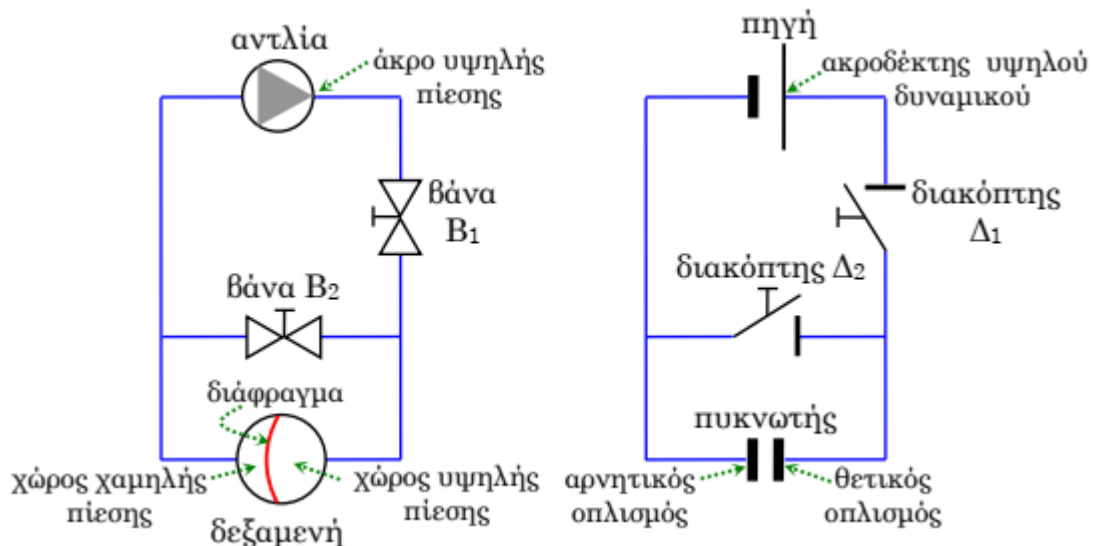
Το στοιχείο της γενικευμένης χωρητικότητας C , όπως και αυτό της γενικευμένης αδράνειας I είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τις μεταβλητές ροής και σθένους και υφίσταται σε όλα τα πεδία που αναφέρονται στους πίνακες των προηγούμενων παραγράφων. Συγκεκριμένα προκύπτει από τη σχέση:

$$f = C \cdot \frac{de}{dt} \quad (6.9)$$

Παρακάτω φαίνεται η εφαρμογή της σχέσης 6.9 σε κάθε ένα από τα πεδία που αναφέρονται στους πίνακες 6.1 έως 6.4.

- Πεδίο μηχανικής μετατόπισης: $v = \frac{1}{k} \cdot \frac{dF}{dt}$
- Πεδίο μηχανικής περιστροφής: $\omega = \frac{1}{k} \cdot \frac{dT}{dt}$
- Υδραυλικό πεδίο: $Q = C \cdot \frac{dP}{dt}$
- Ηλεκτρικό πεδίο: $I = C \cdot \frac{dV}{dt}$

Η φυσική σημασία του στοιχείου γενικευμένης χωρητικότητας στα ηλεκτρικά συστήματα είναι ο πυκνωτής, ενώ στα υδραυλικά συστήματα είναι το δοχείο διαστολής, το οποίο ουσιαστικά είναι ένα βαρελάκι χωρισμένο σε δύο ίσα τμήματα που ενδιάμεσα τους είναι τοποθετημένη μία ελαστική μεμβράνη, ενώ τα δύο άκρα του υφίστανται διαφορετικές πιέσεις. Η λειτουργία του πυκνωτή και του δοχείου διαστολής μπορεί να γίνει πιο κατανοητή μέσω του σχήματος 6.3.



Σχήμα 6.3: Στοιχείο γενικευμένης χωρητικότητας σε υδραυλικό (αριστερά) και ηλεκτρικό (δεξιά) πεδίο [7, σχ.6.8].

Τα δύο τμήματα του δοχείου συνδέονται μεταξύ τους μέσω σωλήνων και μίας αντλίας που είναι υπεύθυνο για την κυκλοφορία του νερού στους σωλήνες. Διατηρώντας τη βάνια 1 ανοιχτή και τη βάνια 2 κλειστή, το νερό ρέει διαμέσου του δοχείου με κατεύθυνση από το σημείο υψηλής πίεσης στο χαμηλής τεντώνοντας την ελαστική μεμβράνη. Ωστόσο το τμήμα του δοχείου με το περισσότερο νερό έχει και μεγαλύτερη πίεση. Η ροή σταματάει όταν η πίεση που δέχεται το διάφραγμα είναι ίση με την πίεση που ασκεί η αντλία, οπότε και η βάνια 1 κλείνει, αλλά η διαφορά πίεσης στο δοχείο διατηρείται.

Αν η βάννα 2 ανοίξει τότε νερό θα μεταβεί από το χώρο υψηλής πίεσης, στο χώρο χαμηλής πίεσης των αγωγών.

Με παρόμοια λογική εξήγηση, η πηγή στο ηλεκτρικό κύκλωμα του σχήματος 6.3 δημιουργεί εξαναγκασμένη κίνηση ηλεκτρονίων και διατηρώντας το διακόπτη Δ1 κλειστό και τον Δ2 ανοιχτό φορτίζεται ο πυκνωτής μέχρι τη στιγμή που αποκτά ίδια διαφορά δυναμικού με αυτή της πηγής. Σε αυτό το σημείο ανοίγει ο διακόπτης Δ1, αλλά το φορτίο του πυκνωτή διατηρείται για όσο ο διακόπτης Δ2 είναι ανοιχτός. Αν κλείσει μετά ο διακόπτης Δ2, τότε αρχίζουν τα ηλεκτρόνια να μεταφέρονται από τον αρνητικά φορτισμένο οπλισμό του πυκνωτή προς το θετικό οπλισμό μέσω των καλωδίων και πραγματοποιείται σταδιακή εκφόρτιση του πυκνωτή [13, §1.4], [7, §6.4].

6.3.5 Στοιχείο κατανάλωσης

Στοιχεία κατανάλωσης στα ηλεκτρικά συστήματα αποτελούν τα φορτία του συστήματος. Είναι ουσιαστικά τα φορτία που ζητούν οι καταναλωτές, τα οποία κυρίως με βάση το μέγεθός τους χωρίζονται σε κατηγορίες. Έτσι διακρίνονται τα οικιακά, τα βιομηχανικά κ.α. Η ζήτηση των φορτίων παρουσιάζει μεταβολές που διαμορφώνονται με βάση την ανθρώπινη δραστηριότητα σε μηνιαίο, εβδομαδιαίο και ημερήσιο επίπεδο. Δεδομένου ότι οι άνθρωποι παραμένουν δραστήριοι κατά τις πρωινές μέχρι βραδινές ώρες, τότε παρουσιάζεται και υψηλή ζήτηση, σε αντίθεση με τη νύχτα όπου τα φορτία μειώνονται. Η άθροιση των επιμέρους φορτίων όλων των κατηγοριών των καταναλωτών αποτελεί και το συνολικό φορτίο του ηλεκτρικού συστήματος.

Με αντίστοιχο τρόπο με αυτόν των ηλεκτρικών συστημάτων ενέργειας, στοιχεία κατανάλωσης των υδραυλικών συστημάτων ορίζονται όλα τα σημεία κατανάλωσης ύδατος. Εδώ οι καταναλωτές χωρίζονται επίσης σε κατηγορίες με βάση την ποσότητα και το σκοπό ζήτησης. Έτσι διακρίνονται και πάλι οι οικιακοί καταναλωτές, οι δημόσιοι καταναλωτές, οι αγροτικοί καταναλωτές κ.ο.κ. Η κατανάλωση σε νερό ενός δικτύου ύδρευσης είναι το σύνολο της κατανάλωσης όγκου νερού όλων των κατηγοριών των καταναλωτών του δικτύου, και κατά αντιστοιχία με τα ηλεκτρικά δίκτυα μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας με γνώμονα την ανθρώπινη δραστηριότητα [34, §7.1], [12, §1.1]

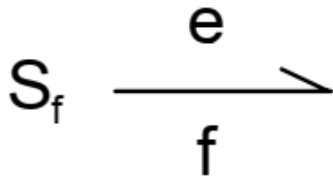
6.4 Βασικοί νόμοι

6.4.1 Εξίσωση συνέχειας ροής

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, για την πλήρη περιγραφή ενός συστήματος και την απεικόνισή του μέσω μαθηματικού μοντέλου, απαραίτητη είναι η διευκρίνιση της ροής ισχύος μέσω των διάφορων μονόθυρων στοιχείων. Η αναπαράσταση αυτής της ροής επιτυγχάνεται διαμέσου διαγραμμάτων δεσμών. Έτσι για τα παθητικά στοιχεία, η ενέργεια παίρνει θετικό πρόσημο όταν ρέει προς το στοιχείο και συμβολίζεται με μία γραμμή με μισό βελάκι που δείχνει την πορεία της.

$$\text{Σύμβολο: } \frac{e}{f} \rightarrow C$$

Σχήμα 6.4: Διάγραμμα δεσμού παθητικού μονόθυρου πυκνωτή [13].



Σχήμα 6.5: Διάγραμμα δεσμού ενεργητικού μονόθυρου στοιχείου πηγής [13].

πάλι με μία γραμμή με μισό βελάκι στην άκρη του (Σχήμα 6.5). Τα μονόθυρα στοιχεία, αλληλοσυνδέονται μεταξύ τους κάτω από συγκεκριμένους περιορισμούς. Οι συνδέσεις αυτές ονομάζονται πολύθυροι κόμβοι, οι οποίοι είναι δύο ειδών. Ο πρώτος ονομάζεται κόμβος «0» ή διαφορετικά κόμβος κοινού σθένους και αποτελεί την εξίσωση συνέχειας της ροής. Το διάγραμμα αυτού απεικονίζεται στο σχήμα 6.6, καθώς οι σχέσεις που συνδέουν τα στοιχεία μεταξύ τους είναι οι εξής:

$$e_1 = e_2 = e_3 \quad (6.10)$$

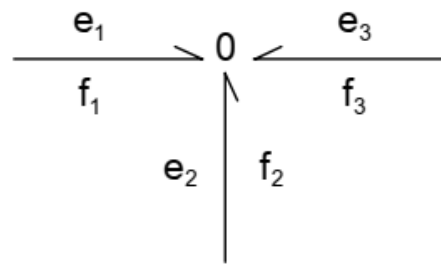
$$f_1 + f_2 + f_3 = 0 \quad (6.11)$$

Ουσιαστικά η παραπάνω σύνδεση εκφράζεται για τα ηλεκτρικά κυκλώματα μέσω του 1^{ου} νόμου του Kirchhof, δηλαδή το νόμο των ρευμάτων που αποδεικνύει πως το άθροισμα των ρευμάτων σε έναν κόμβο είναι ίσο με το μηδέν. Κατά αντιστοιχία, στα υδραυλικά συστήματα το άθροισμα των παροχών νερού ενός κόμβου είναι ίσο με το μηδέν. Η εφαρμογή του 1^{ου} νόμου του Kirchhoff για τα ηλεκτρικά συστήματα και για τα υδραυλικά συστήματα, βάση των σχημάτων 6.7 και 6.8 αντίστοιχα είναι οι εξής [35, §1.5]:

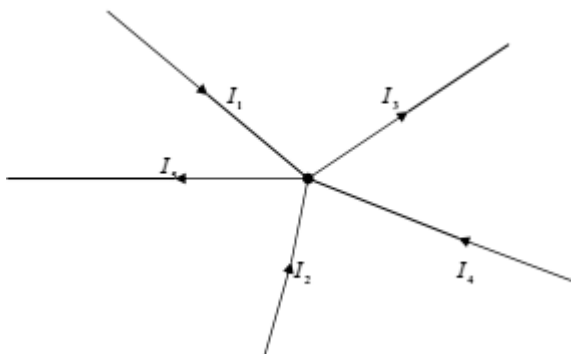
$$I_1 + I_2 + I_4 - I_3 - I_5 = 0 \quad (6.12)$$

$$Q_4 - Q_2 - Q_1 - Q_3 = 0 \quad (6.13)$$

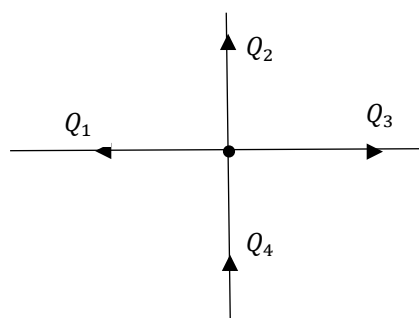
Ενδεικτικά για το παθητικό στοιχείο της χωρητικότητας το διάγραμμα δεσμού που δείχνει και την ροή της ενέργειας αποτυπώνεται στο σχήμα 6.4. Ακόμη για τα ενεργητικά μονόθυρα στοιχεία, όπως είναι η πηγή, η ενέργεια παίρνει θετικό πρόσημο όταν εξέρχεται από την πηγή και συμβολίζεται και



Σχήμα 6.6: Κόμβος κοινού σθένους [13].



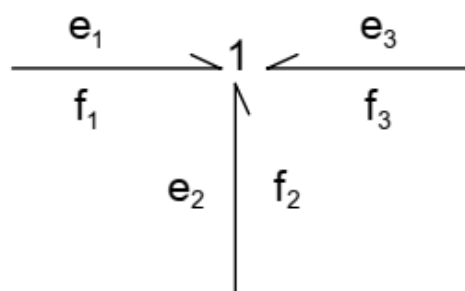
Σχήμα 6.7: Ρεύματα σε κοινό κόμβο [14, §7.3].



Σχήμα 6.8: Παροχές σε κοινό κόμβο.

6.4.2 Εξίσωση συνέχειας σθένους

Εν συνεχεία των όσων αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, ορίζεται ο δεύτερος τρόπος αλληλοσύνδεσης των στοιχείων ως κόμβος «1» ή διαφορετικά κόμβος κοινής ροής και αποτελεί την εξίσωση συνέχειας σθένους. Το διάγραμμα αυτού απεικονίζεται στο σχήμα 6.9, καθώς οι σχέσεις που συνδέουν τα στοιχεία μεταξύ τους είναι οι εξής:



Σχήμα 6.9: Κόμβος κοινής ροής [13].

$$f_1 = f_2 = f_3 \quad (6.14)$$

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0 \quad (6.15)$$

Ουσιαστικά η παραπάνω σύνδεση εκφράζεται για τα ηλεκτρικά κυκλώματα μέσω του 2^{ου} νόμου του Kirchhoff, δηλαδή το νόμο των τάσεων, που αποδεικνύει πως το άθροισμα των τάσεων σε έναν κόμβο τύπου 'I', δηλαδή σε ένα βρόχο, είναι ίσο με το μηδέν. Κατά αντιστοιχία, στα υδραυλικά συστήματα το άθροισμα της πτώσης πίεσης ενός κόμβου τύπου 'I', δηλαδή σε ένα βρόχο, είναι ίσο με το μηδέν [35, §1.5].

6.4.3 Εξίσωση συνέχειας ισχύος

Όπως είναι γνωστό, κάθε σύστημα αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του και εναλλάσσουν ισχύ. Τα περισσότερα συστήματα χαρακτηρίζονται ως δυναμικά, διότι τα μεγέθη που το χαρακτηρίζουν μεταβάλλονται με το χρόνο ώστε να διατηρούν μία μόνιμη κατάσταση. Βασικότερος νόμος που ισχύει στα δυναμικά συστήματα είναι η αρχή διατήρησης της ισχύος όπως περιγράφεται και από τη σχέση (6.1). Στον παρακάτω πίνακα 6.1 αντιπαρατίθενται τα μέσα, ως προς την κατασκευαστική τους

διαμόρφωση που επιτυγχάνεται η ροή της ισχύος συγκεκριμένα των ηλεκτρικών και των υδραυλικών δικτύων, που είναι και το βασικό αντικείμενο της εργασίας αυτής.

Πίνακας 6.1 Κατασκευαστική σύγκριση ηλεκτρικών δικτύων και δικτύων ύδρευσης [14].

ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	ΔΙΚΤΥΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ
Δίκτυα υψηλής τάσης: βροχωτά	Εξωτερικό υδραγωγείο: ακτινωτό
Δίκτυα μέσης τάσης: βροχωτά ή ακτινωτά	Εξωτερικό υδραγωγείο: ακτινωτό
Δίκτυα χαμηλής τάσης: βροχωτά ως προς την κατασκευή ακτινωτά: ως προς τη λειτουργία	Εσωτερικό υδραγωγείο: βροχωτό με ακτινικές επεμβάσεις

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μία γενική σύγκριση ως προς τα στοιχεία, τα μεγέθη και τους νόμους που ακολουθούν τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και τα δίκτυα ύδρευσης.

Πίνακας 6.2 Κατασκευαστική σύγκριση ηλεκτρικών δικτύων και δικτύων ύδρευσης [14, §7.4].

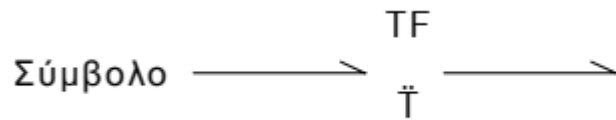
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	ΔΙΚΤΥΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ
Σθένος: Ηλεκτρική τάση V	Σθένος: Πίεση P
Ροή: Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος I	Ροή: Παροχή Q
Πηγή: Γεννήτρια	Πηγή: Αντλία
Κατανάλωση: Φορτίο	Κατανάλωση: Κατανάλωση ύδατος
1^{ος} Νόμος του Kirchhoff: Νόμος των ρευμάτων $I_1 + I_2 + I_3 = 0$	1^{ος} Νόμος του Kirchhoff: Νόμος των παροχών $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$
2^{ος} Νόμος του Kirchhoff: Νόμος των τάσεων $V_1 + V_2 + V_3 = 0$	2^{ος} Νόμος του Kirchhoff: Νόμος των πιέσεων $\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 0$
Νόμος του Ohm: $\Delta V = I \cdot R$	Νόμος του Ohm: $\Delta P = Q^2 \cdot R$

Μία διαφοροποίηση που παρατηρείται από τον πίνακα των συγκρίσεων είναι πως ο νόμος του Ohm για τα υδραυλικά δίκτυα παρουσιάζει εξάρτηση από το τετράγωνο της παροχής, ενώ η αντίστοιχη σχέση στα ηλεκτρικά δίκτυα δεν εμφανίζει τετράγωνο [14, §7.4].

6.5 Δίθυρα στοιχεία

6.5.1 Γενικά

Με τον όρο δίθυρα στοιχεία ορίζονται οι συσκευές που έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν το είδος της ενέργειας, αλλάζοντας της μορφή. Πρόκειται ουσιαστικά για μετατροπείς ενέργειας που συνδέουν ένα ζευγάρι μεταβλητών ισχύος (e_1, f_1) , με ένα δεύτερο (e_2, f_2) , με βασική προϋπόθεση τη διατήρηση της ισχύος. Η διατήρηση της ισχύος είναι και ο λόγος που τα στοιχεία αυτά χαρακτηρίζονται ως ιδανικά, δηλαδή οι μεταβλητές που περιγράφουν τη συμπεριφορά τους δεν παρουσιάζουν μεταβολές με το χρόνο, είναι γραμμικά και δεν έχουν απώλειες. Απαιτείται η ύπαρξη δύο διαφορετικών ειδών μετατροπέων ενέργειας. Ο πρώτος, χρησιμοποιεί στοιχεία που το σθένος παραμένει σθένος και μετά τη μετατροπή και αντίστοιχα η ροή παραμένει ροή, ο συμβολισμός του φαίνεται στο σχήμα (6.10) και καλείται μετασχηματιστής. Ο δεύτερος, χρησιμοποιεί στοιχεία που το σθένος μετατρέπεται σε ροή και αντίστοιχα η ροή μετατρέπεται σε σθένος, ο συμβολισμός του φαίνεται στο σχήμα (6.11) και καλείται αναστροφέας.



Σχήμα 6.10: Συμβολισμός 2-θυρου μετασχηματιστή [13].



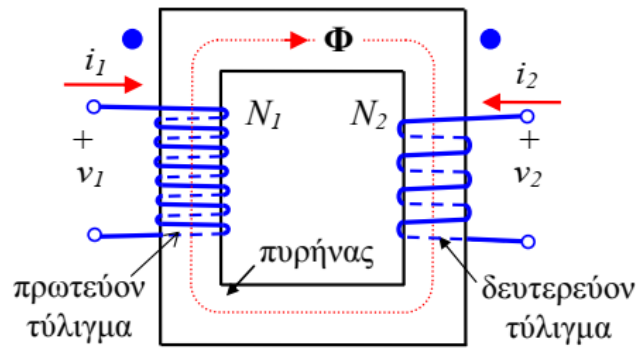
Σχήμα 6.11: Συμβολισμός 2-θυρου αναστροφέα [13].

Στις επόμενες ενότητες παρατίθενται τα στοιχεία που λειτουργούν ως μετασχηματιστές ή αναστροφείς στα ηλεκτρικά δίκτυα και στα υδραυλικά δίκτυα [13, §1.7].

6.5.2 Δίθυρα στοιχεία ηλεκτρικών δικτύων

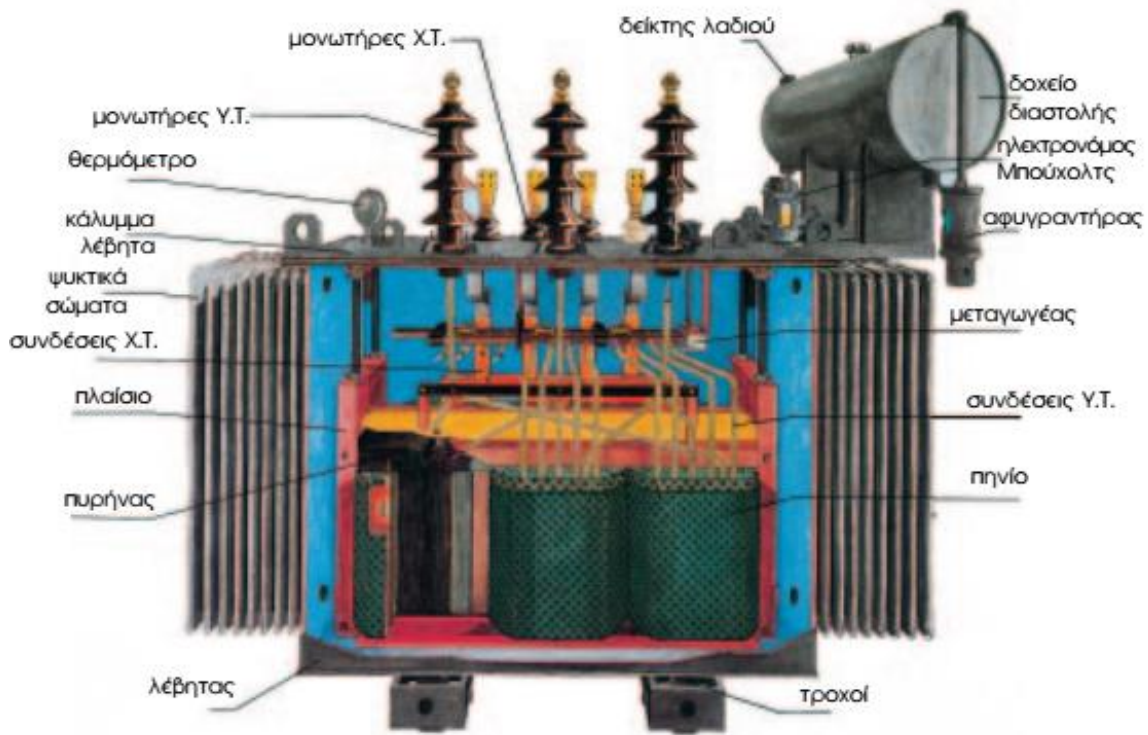
➤ Μετασχηματιστής

Με απώτερο σκοπό τη μείωση απωλειών ενέργειας στα ηλεκτρικά δίκτυα, απαραίτητη κρίνεται η χρήση μετασχηματιστών. Πρόκειται για μία κατηγορία συσκευών που έχουν τη δυνατότητα να εναλλάσσουν τα επίπεδα των τάσεων του ρεύματος που μεταφέρεται στα ηλεκτρικά δίκτυα. Έτσι στη μεταφορά, προτιμώνται υψηλή τάση και χαμηλή ένταση ρεύματος, ενώ κοντά στα αστικά κέντρα ή στους σταθμούς παραγωγής απαιτείται ο υποβιβασμός ή αντίστοιχα ανύψωση της τάσης. Κατασκευαστικά, ένας μονοφασικός μετασχηματιστής διαθέτει τουλάχιστον δύο τυλίγματα, το πρωτεύον και το δευτερεύον, σημεία όπου πραγματοποιείται η είσοδος και αντίστοιχα η έξοδος της ηλεκτρικής ισχύος.



Σχήμα 6.12: Σχηματική απεικόνιση μονοφασικού μετασχηματιστή [36, κεφ.2].

Εξαιτίας της εμπλοκής των τυλιγμάτων αυτών σε μαγνητικό πεδίο και αναλόγως του αριθμού των σπειρών στα δύο τυλίγματα, επιτυγχάνεται και η ανύψωση ή ο υποβιβασμός της τάσης. Η αρχή λειτουργίας ενός μονοφασικού μετασχηματιστή καθώς και η σχηματική του απεικόνιση φαίνεται στο σχήμα (6.12), ενώ μια τομή ενός μετασχηματιστή διανομής λαδιού φαίνεται στο σχήμα (6.13) [36, κεφ.2].



Σχήμα 6.13: Μετασχηματιστής διανομής λαδιού [37].

➤ *Ηλεκτρική γεννήτρια*

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι μία συσκευή που παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μηχανική. Συνοπτικά, η λειτουργία της στηρίζεται στο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα και παράγει ηλεκτρική τάση. Βασική όμως προϋπόθεση για τη λειτουργία μιας γεννήτριας που λειτουργεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί το γεγονός πως ο δρομέας πρέπει να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα.

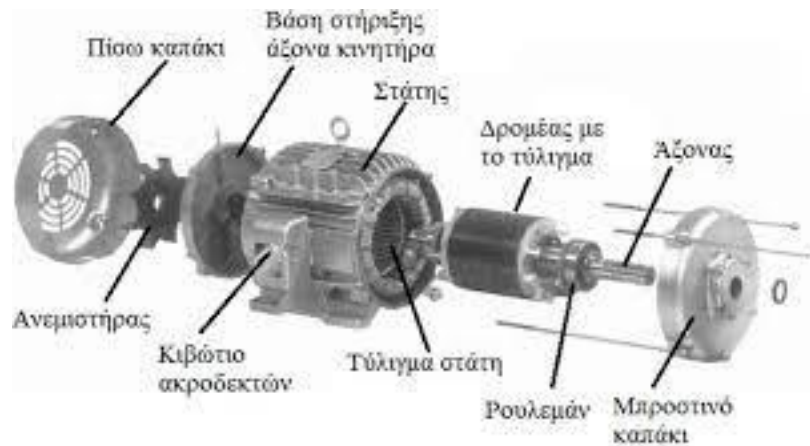
Κάθε γεννήτρια διαθέτει συγκεκριμένες προδιαγραφές, δηλαδή κάποια ονομαστικά στοιχεία που δηλώνουν κατά κάποιο τρόπο τις οριακές συνθήκες λειτουργίας της. Αυτά είναι η ονομαστική τάση, η ονομαστική συχνότητα, η ονομαστική ταχύτητα, ο συντελεστής ισχύος, το ρεύμα διέγερσης [38, κεφ.5].



Σχήμα 6.14: Εικόνα σύγχρονης γεννήτριας 34,4 kVA με ηχομονωτικό περίβλημα [39].

➤ *Ηλεκτρικός κινητήρας*

Ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι μία συσκευή που παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής μηχανικής ενέργειας από ηλεκτρική, έχοντας δηλαδή ανάποδη λειτουργία από αυτή της γεννήτριας. Ένας κινητήρας αποτελείται από το δρομέα και το στάτη. Ο στάτης συνήθως συνδέεται με τριφασικό ρεύμα και παράγει στο εσωτερικό του μαγνητικό πεδίο. Έτσι ο δρομέας που βρίσκεται στο εσωτερικό του στάτη τη στιγμή που τροφοδοτείται με ρεύμα διέγερσης, παράγει και αυτός μαγνητικό πεδίο που αλληλεπιδρά με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη και ο δρομέας εξαναγκάζεται σε περιστροφή και παράγει μηχανική ενέργεια [38, κεφ.6].



Σχήμα 6.15: Μέρη επαγωγικού κινητήρα [39].

➤ *Ρυθμιστές τάσης*

Προς αποφυγή αποκλίσεων από την ονομαστική τάση, στα ηλεκτρικά δίκτυα τροφοδότησης των καταναλωτών, υπάρχουν διατάξεις που ρυθμίζουν τις μεταβολές στην τιμή της τάσης.

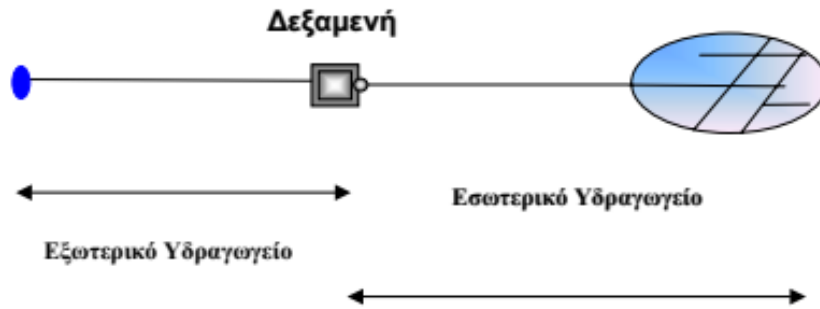
Αυτές οι διατάξεις καλούνται ρυθμιστές τάσης και φροντίζουν για τη διατήρηση της τάσης κοντά στην ονομαστική της τιμή με απόκλιση $\pm 10\%$, αφού η ονομαστική τάση δεν καλύπτει πάντα τις ανάγκες του δικτύου στην πράξη. Οι ρυθμιστές τάσεις είναι οι εξής:

- Ρυθμιστές τάσης υπό φορτίο, οι οποίοι μπορεί, είτε να βρίσκονται μέσα στους μετασχηματιστές της υψηλής και της μέσης τάσης, είτε να βρίσκονται μόνοι τους πάνω στις γραμμές μέσης τάσης, και έχουν τη δυνατότητα αυτόματης μεταβολής της τάσης σε διάστημα μερικών δευτερολέπτων.
- Οι λήψεις των μετασχηματιστών υψηλής και μέσης τάσης. Σε αυτές τις διατάξεις η μεταβολή της τάσης δεν πραγματοποιείται αυτόματα, αλλά χειροκίνητα και με απαραίτητη προϋπόθεση ο μετασχηματιστής να έχει πρωτύτερα αποσυνδεθεί από το δίκτυο.
- Οι εγκάρσιοι πυκνωτές. Χρησιμοποιούνται σε αρκετά σημεία και συγκεκριμένα σε διακλαδώσεις μέσης τάσης των υποσταθμών υψηλής και μέσης τάσης. Οι εγκάρσιοι πυκνωτές μπορεί να έχουν μόνιμη λειτουργία ή να απενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται μέσω διακοπών και αυτοματισμού.
- Οι πυκνωτές σε σειρά. Χρησιμοποιούνται πολύ σπανιότερα από τους εγκάρσιους πυκνωτές και η εγκατάστασή τους γίνεται κυρίως στα συστήματα μεταφοράς και εξαναγκάζει το ρεύμα να διέρχεται από μέσα τους. Κύριος σκοπός της ύπαρξης αυτών είναι η μείωση της πτώσης τάσης μέσω κατάλληλης γείωσης της επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής [34, κεφ.8].

6.5.3 Δίθυρα στοιχεία δικτύων ύδρευσης

➤ *Δεξαμενή ρύθμισης*

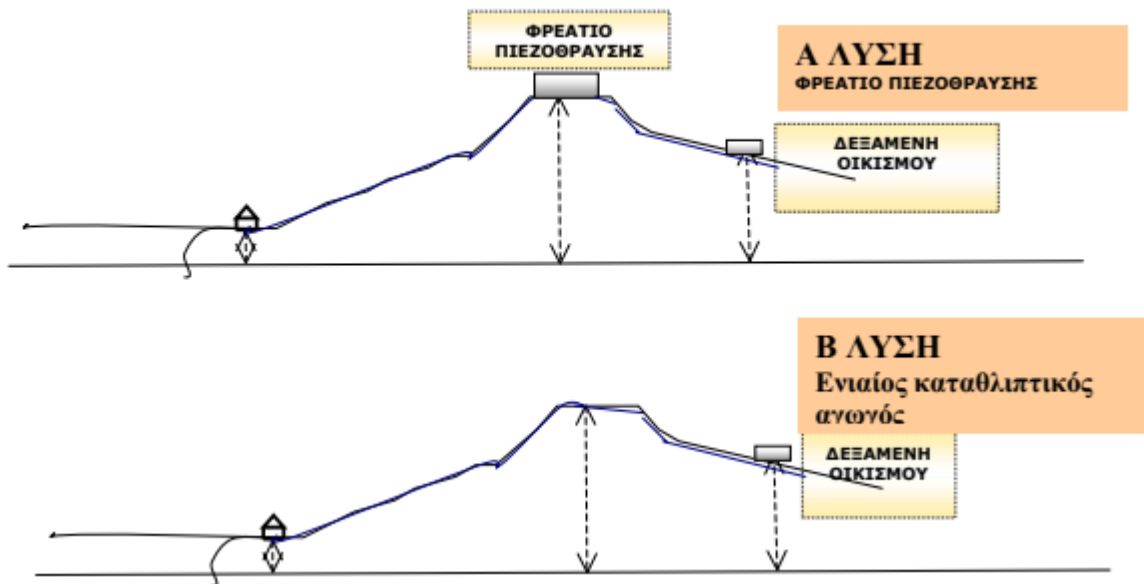
Βρίσκεται ενδιάμεσα του εξωτερικού και του εσωτερικού υδραγωγείου και χρησιμοποιείται για την εξισορρόπηση μεταξύ της παροχής που καταφτάνει από το εξωτερικό υδραγωγείο και είναι περίπου σταθερή, με την κατανάλωση του νερού από τα δίκτυα διανομής που παρουσιάζει αρκετές μεταβολές.



Σχήμα 6.16: Θέση δεξαμενής ρύθμισης δικτύου ύδρευσης [10, κεφ.2].

➤ Φρεάτιο αποδόσεως ή πιεζοθραύσεως

Πρόκειται για μία μικρογραφία μίας δεξαμενής που τοποθετείται στο τέλος ενός αγωγού κατάθλιψης, ωστόσο σε υψηλότερο σημείο από αυτό της δεξαμενής που τροφοδοτεί έναν οικισμό. Σκοπός του είναι η ρύθμιση της πίεσης και η εξισορρόπησή της με αυτήν της ατμόσφαιρας, ώστε η διαδρομή προς τη δεξαμενή να επιτυγχάνεται με φυσική ροή. Επειδή οι καταθλιπτικοί αγωγοί είναι αρκετά μεγαλύτερης διαμέτρου από αυτούς της διανομής, και για διαδρομή μεγάλου μήκους απαιτείται η χρήση μεγαλύτερων και ισχυρότερων αντλιών που είναι αρκετά ακριβότερες, προτιμάται η κατασκευή τους μόνο μέχρι τα φρεάτια αποδόσεως όπως φαίνεται στο 6.17 [9, κεφ.4].



Σχήμα 6.17: Χρήση φρεατίου πιεζοθραύσεως (A ΛΥΣΗ) και ενιαίος καταθλιπτικός αγωγός (B ΛΥΣΗ) [10, κεφ.2].

➤ *Ρυθμιστής πίεσης*

Ο ρυθμιστής πίεσης αποτελεί μία διάταξη που χρησιμοποιείται σαν εναλλακτική λύση από αυτή των φρεατίων πιεζοθραύσεως σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν αρκετές υψομετρικές διαφορές μεταξύ δεξαμενών. Ο ρυθμιστή πίεσης ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε να δίνει συγκεκριμένη πίεση στην έξοδό του. Έτσι ενεργοποιείται μόνο όταν δέχεται μεγαλύτερη πίεση από αυτή που καλείται να δώσει, δηλαδή να τη μειώσει. Ακόμη σε περίπτωση αντίστροφης ροής, διακόπτει τη ροή. Προκύπτει πως ένας ρυθμιστής πίεσης διαδραματίζει τριπλό ρόλο. Έτσι μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα ως ρυθμιστής, ως μειωτής και ως βαλβίδα αντεπιστροφής.



Σχήμα 6.18: Ρυθμιστής πίεσης [41].

➤ *Αντλία*

Οι αντλίες αποτελούν ένα είδος υδροδυναμικών μηχανών που προσδίδουν ποσά ενέργειας στο ρευστό. Οι αντλίες χωρίζονται κυρίως σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Αυτές είναι οι *αντλίες θετικής μετατόπισης* και οι *δυναμικές αντλίες*. Στα δίκτυα ύδρευσης οι αντλίες χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μεταφορά νερού από σημεία με χαμηλό μανομετρικό ύψος σε σημεία με υψηλότερο.

➤ *Υδροστρόβιλοι*

Οι υδροστρόβιλοι αποτελούν το δεύτερο είδος υδροδυναμικών μηχανών που δεσμεύουν ποσά ενέργειας από το σύστημα και κατ' επέκταση το ρευστό και το μεταφέρουν σε έναν άξονα με τη μορφή περιστροφικής κίνησης. Συνήθως ο άξονας των υδροστρόβιλων συνδέονται με μία γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μηχανική.

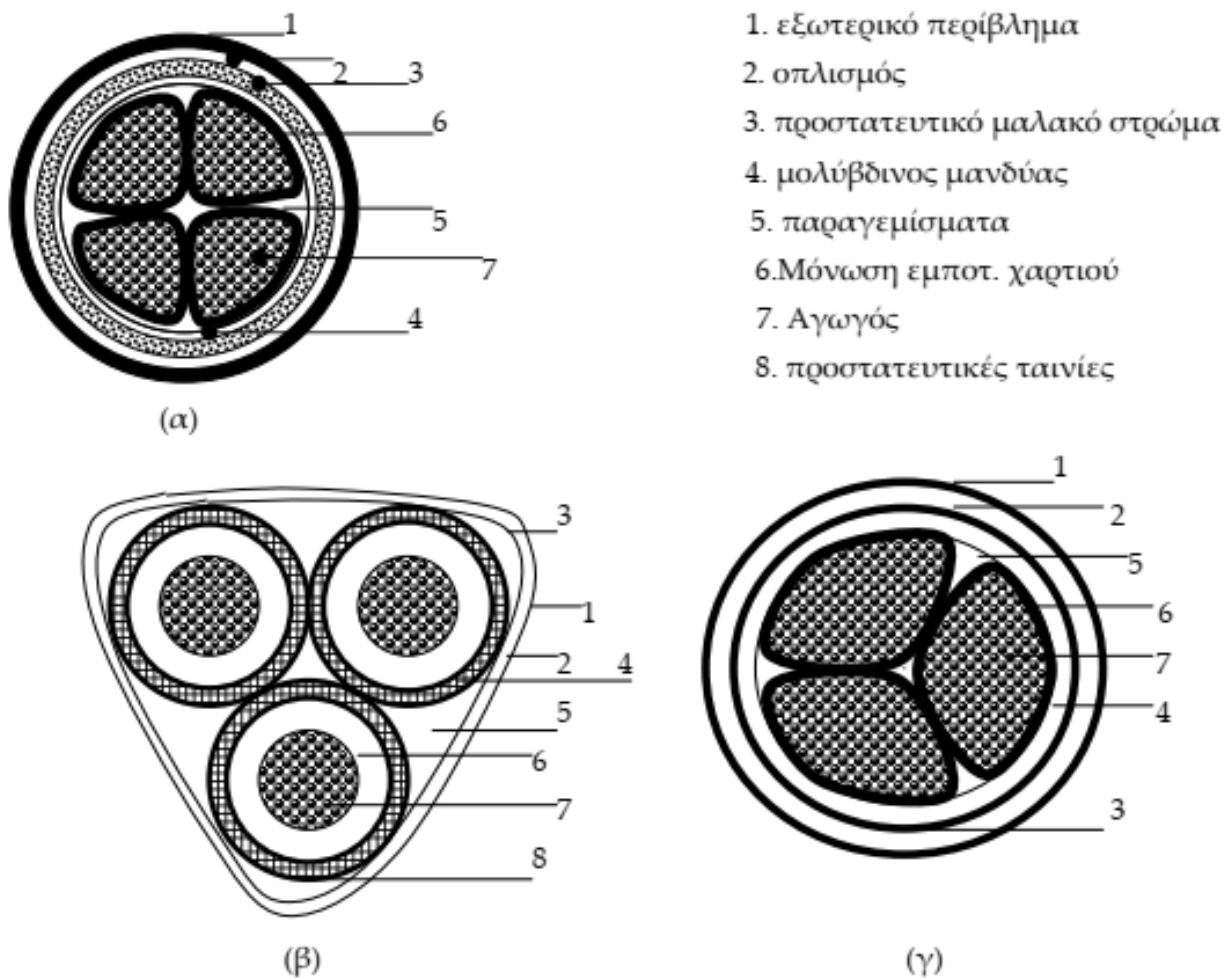


Σχήμα 6.18: Υποβρύχια αντλία 4"Shakti [56].

6.5.4 Σωλήνες και αγωγοί

Οι αγωγοί αποτελούν τα μέσα, από τα οποία επιτυγχάνεται η μεταφορά και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αγωγοί χωρίζονται σε μονόκλωνους και πολύκλωνους αναλόγως αν αποτελούνται από μονό αριθμό συρμάτων ή από περισσότερους. Τα υλικά που προτιμώνται για την κατασκευή των αγωγών είναι ο χαλκός και το αλουμίνιο, εξαιτίας της ευκολίας που παρουσιάζουν την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος. Συνήθως, κυρίως λόγω της ιδιότητάς τους να διαθέτουν ευκαμψία, στη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται οι πολύκλωνοι αγωγοί.

Οι ηλεκτρικοί αγωγοί είναι πάντα μονωμένοι, σχηματίζοντας τα καλώδια, εκτός της περίπτωσης του εναέριου δικτύου που στηρίζονται πάνω σε μονωτήρες γυμνοί. Το πάχος και το υλικό της μόνωσης είναι οι προσδιοριστικοί παράγοντες για την αντοχή του καλωδίου σε ένταση και τάση, καθώς από συγκεκριμένες τιμές αυτών και πάνω η μόνωση δεν αντέχει στη θερμοκρασία που δημιουργείται. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μόνωση των καλωδίων είναι το πολυβινυλοχλωρίδιο, γνωστό και με την αγγλική συντομογραφία PVC ή το πολυαιθυλένιο (PE) [42].



Σχήμα 6.19: Καλώδια (α) χαμηλής τάσης, (β) μέσης τάσης με πολλαπλούς μανδύες, (γ) μέσης τάσης με μόνο μανδύα [42].

Όσον αφορά τα δίκτυα ύδρευσης, η μεταφορά του νερού επιτυγχάνεται μέσω των σωλήνων. Πρόκειται για σωλήνες που διαθέτουν συγκεκριμένες διαστάσεις και προδιαγραφές και υπάρχουν

τυποποιημένες στο εμπόριο, ενώ για ειδικές κατασκευές μπορεί να κατασκευαστούν και με παραγγελία. Εκτός από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι, οι αγωγοί διαφέρουν και ως προς την πίεση που μπορούν να δεχτούν. Τα πιο συνηθισμένα υλικά κατασκευής των αγωγών είναι και πάλι το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), όπως και στη μόνωση των καλωδίων, το πολυαιθυλένιο (HDPE), οι χαλυβδοσωλήνες και κατά το παρελθόν σωλήνες αμιάντου, που όμως έχουν απαγορευτεί λόγω πρόκλησης ασθνεσιών. Οι αγωγοί πολυαιθυλενίου είναι ανθεκτικοί στις πιέσεις και χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στα υδραυλικά δίκτυα, ενώ ταυτόχρονα είναι και πιο οικονομικοί. Οι αλλαγές των διευθύνσεων και οι καμπυλότητες που είναι αναγκαίες στην κατασκευή ενός δικτύου με πολυαιθυλένιο επιτυγχάνονται με τη χρήση ειδικών εξαρτημάτων και μηχανών για τη συγκόλληση αυτών, καθώς είναι ιδιαίτερος σκληροί και άκαμπτοι [9, κεφ.5].



Σχήμα 6.20: Σωλήνες πολυαιθυλενίου[43]

6.6 Διατάξεις ασφαλείας

6.6.1 Διατάξεις ασφαλείας ηλεκτρικών δικτύων

➤ Ασφάλειες

Οι ασφάλειες είναι ιδιαίτερος γνωστές στο άκουσμά τους και αυτό επειδή χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό και στις εσωτερικές εγκαταστάσεις, λόγω χάρη εσωτερικά ενός σπιτιού. Ωστόσο διαφέρουν αρκετά κατασκευαστικά από αυτές που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα διανομής και στα δίκτυα χαμηλής και μέσης τάσης. Όπως προκύπτει και από το όνομά τους, χρησιμεύουν στην προστασία των δικτύων αλλά και των καταναλωτών από μεγάλες τάσεις ή εντάσεις του ρεύματος. Το μέγεθος μίας ασφάλειας και η κατασκευαστική της δομή εξαρτάται από την τάση που μπορεί να εφαρμοστεί. Οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι ασφάλειες είναι κλειστού τύπου και εκτονώσεως, με τις τελευταίες να έχουν μοναδική χρήση στα εναέρια δίκτυα της μέσης τάσης. Και οι δύο τύποι ασφαλειών λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο, αφού περικλείουν εσωτερικά μία αντίσταση που λιώνει όταν η θερμοκρασία υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο. Η αντίσταση αυτή, στις «κλειστού τύπου» αντιστάσεις, περιβάλλεται από υλικό που έχει την ικανότητα να απορροφά την υψηλή θερμοκρασία σε περίπτωση τήξης, ενώ στις «εκτόνωσης», τα θερμά αέρια από την καύση της αντίστασης εκτονώνονται στο περιβάλλον, καθώς ο θάλαμος που περιβάλλει το τηκόμενο στοιχείο είναι ανοιχτός από τη μία άκρη. Ενδεικτικές ασφάλειες φαίνονται στα σχήματα (6.21) και (6.22) που ακολουθούν [1, §7.3].



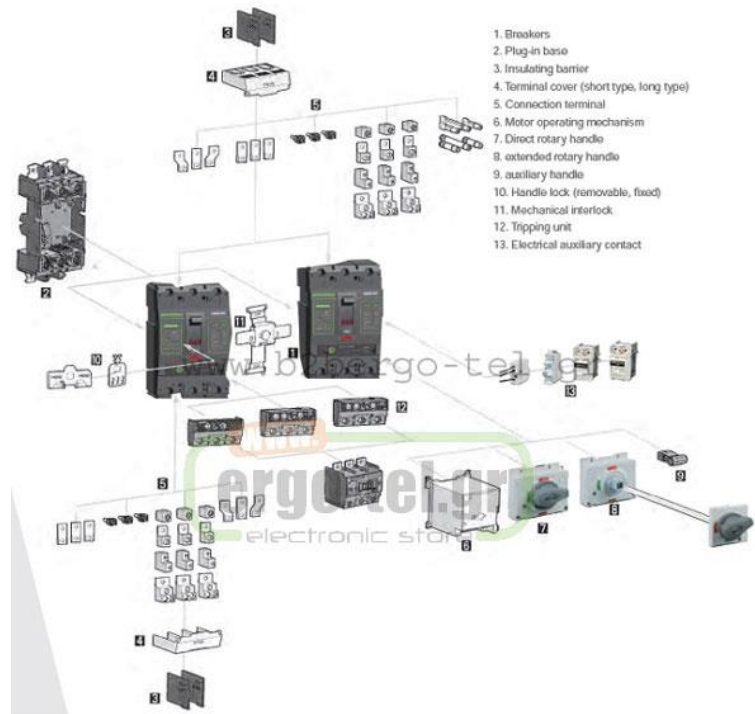
Σχήμα 6.21: Ασφάλεια εκτόνωσης MT [44]



Σχήμα 6.22: Ασφάλειες MT [45]

➤ Διακόπτες ισχύος

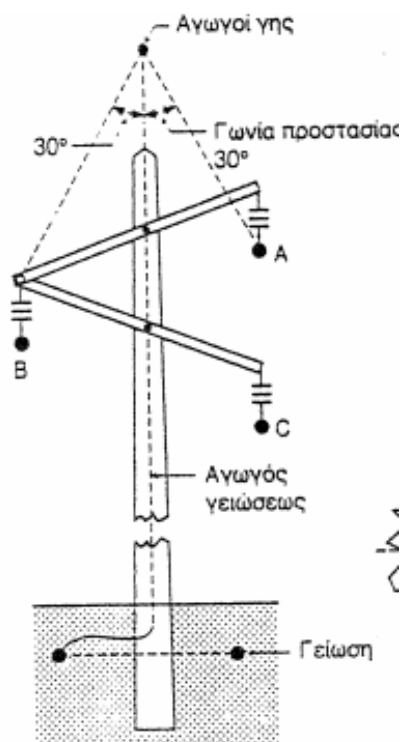
Οι διακόπτες ισχύος όπως και οι ασφάλειες έχουν την ικανότητα μέσω των ηλεκτρονόμων υπερεντάσεως να ανιχνεύουν το πότε η ένταση του ρεύματος υπερβαίνει κάποια συγκεκριμένη τιμή. Διαθέτουν συνήθως θερμικά και μαγνητικά στοιχεία. Έτσι, όταν ο ηλεκτρονόμος το αντιληφθεί κλείνει και ο διακόπτης ανοίγει. Οι αυτόματοι διακόπτες ισχύος, μπορεί να είναι είτε «σταθερού χρόνου», είτε «αντίστροφου χρόνου», με βασική διαφορά ότι οι πρώτοι έχουν συγκεκριμένο χρόνο λειτουργίας ανεξαρτήτως του μεγέθους της απόκλισης από την ενδεικνυόμενη ένταση [1, §7.3].



Σχήμα 6.23: Διακόπτης ισχύος [46]

➤ *Αγωγοί προστασίας*

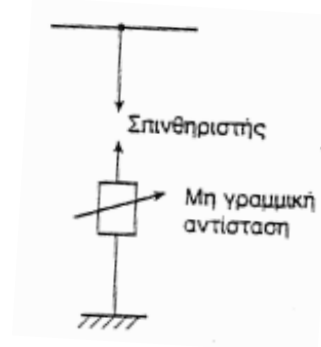
Πρόκειται για αγωγούς, παρόμοιους κατασκευαστικά με αυτούς που χρησιμοποιούνται στις γραμμές μέσης και υψηλής τάσης, οι οποίοι όμως τοποθετούνται σε ανώτερα σημεία από αυτά των γραμμών, ώστε να απορροφούν αυτοί τα πλήγματα από πιθανά φυσικά και καταστροφικά για τις γραμμές μεταφοράς ενέργειας φαινόμενα, όπως οι κεραυνοί. Βασικά χαρακτηριστικά της αποτελεσματικότητας των αγωγών προστασίας, είναι η γωνία προστασίας η οποία πρέπει να καλύπτει τους ενεργούς αγωγούς και η αντίσταση της γείωσης του αγωγού της γης από την οποία εξαρτάται η διαφορά δυναμικού που μπορεί να αναπτυχθεί μεταξύ γειωμένων στοιχείων και αγωγών φάσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα (6.24) [1, §7.4].



Σχήμα 6.24: Γραμμή MT με αγωγό προστασίας [1,σχ.7.17]

➤ *Απαγωγείς υπερτάσεων*

Είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την κατά κάποιο τρόπο «απόκρουση» των κεραυνών και τη διοχέτευσή τους προς τη γη. Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως με τα αλεξικέραυνα και τα διάκενα. Τα επικρατέστερα αλεξικέραυνα είναι τα τύπου βαλβίδος, που αποτελούνται από τον σπινθηριστή και μία μη γραμμική αντίσταση. Σε περίπτωση λοιπόν υπερέντασης από κεραυνό, το διάκενο που διαθέτει ο σπινθηριστής καλύπτεται και η τάση διέρχεται μέσω της αντίστασης στη γη. Η σχηματική παράσταση ενός αλεξικέραυνου τύπου βαλβίδος φαίνεται στο σχήμα (6.25) [1, §7.4].

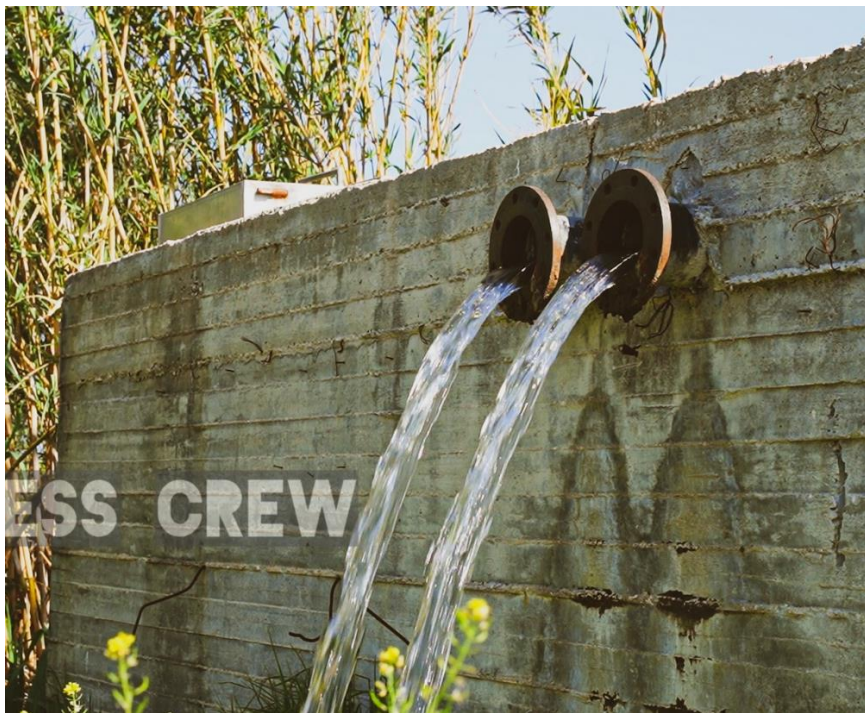


Σχήμα 6.25: Σχηματική παράσταση αλεξικέραυνου βαλβίδος [1,σχ.7.18]

6.6.2 Διατάξεις ασφαλείας δικτύων ύδρευσης

➤ Σημεία υπερχείλισης

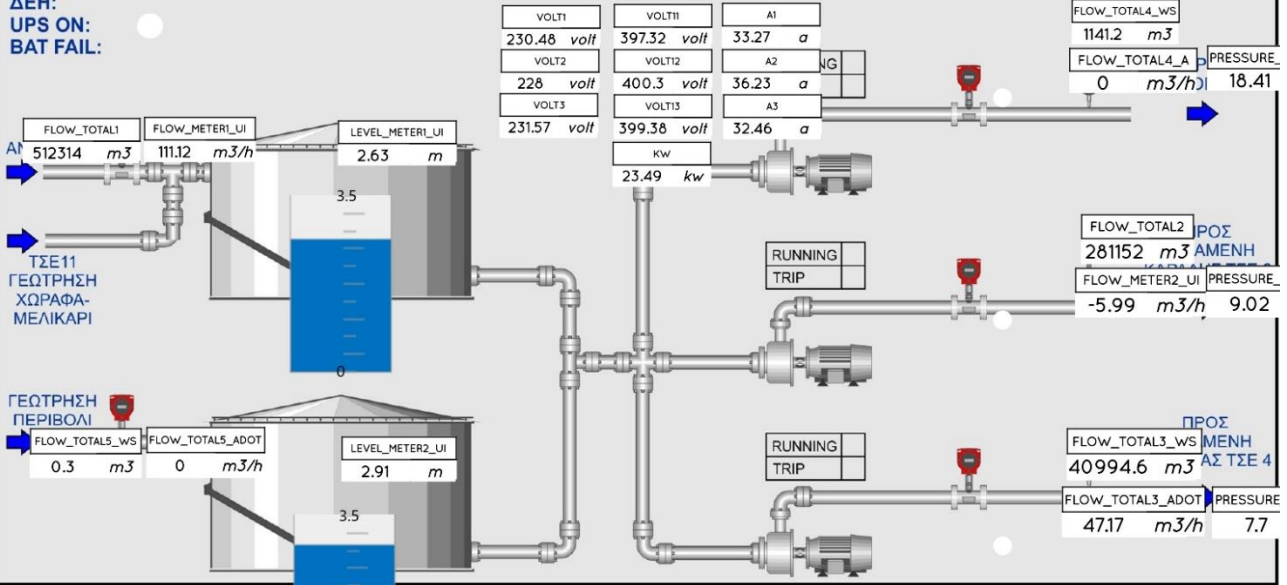
Οι υπερχείλισεις των δικτύων ύδρευσης συνήθως λαμβάνουν χώρα σε μέρη όπου υπάρχει συσσωρευμένη ποσότητα ύδατος, όπως είναι οι δεξαμενές. Το φαινόμενο της υπερχείλισης παρατηρείται κατά τις νυχτερινές ώρες, κατά το χρονικό διάστημα δηλαδή που δεν υπάρχει ζήτηση από τους καταναλωτές. Η πιο απλή λύση και οικονομική λύση για τη διαπίστωση υπερχείλισης είναι η χρήση αγωγών υπερχείλισης που εξέρχονται από τις δεξαμενές και έπειτα από επίσκεψη στα σημεία αυτά



Σχήμα 6.26: Αγωγοί υπερχείλισης δεξαμενής στο Ζευγολατιό [47]

και οπτικό έλεγχο της περιοχής συμπεραίνεται η ύπαρξη ή μη υπερχείλισης. Παράδειγμα δεξαμενής που διαθέτει αγωγό υπερχείλισης φαίνεται στην εικόνα του σχήματος (6.26). Ωστόσο με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την εισαγωγή του αυτόματου ελέγχου σχεδόν σε όλες τις ανθρώπινες επαγγελματικές δραστηριότητες, υπάρχουν πολλά διαθέσιμα λογισμικά, όπως το SCADA, που μέσα από την εγκατάσταση προηγμένων διατάξεων τηλεελέγχου και τηλεχειρισμού των αντλιών και με ταυτόχρονη χρήση αισθητήρων δημιουργούν απομακρυσμένο έλεγχο στάθμης και λειτουργίας ενός αντλιοστασίου. Μία ενδεικτική αποτύπωση προγράμματος τηλεελέγχου σε υπολογιστή με χρήση λογισμικού της Aqualog Master σε αντλιοστάσιο της Σκύρου φαίνεται στο σχήμα (6.27) που ακολουθεί [48, §7.3].

ΔΕΗ:
UPS ON:
BAT FAIL:



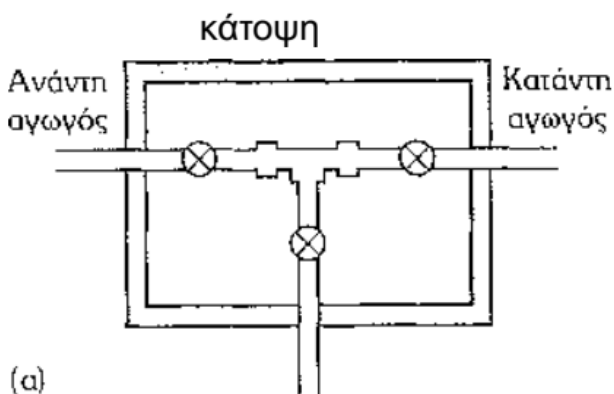
Σχήμα 6.27: Αυτόματος έλεγχος αντλιοστασίου της Σκύρου μέσω SCADA

➤ *Σημεία εξαερισμού*

Ιδιαίτερος σημαντικό ρόλο για την ομαλή λειτουργία των δικτύων ύδρευσης και την προστασία αυτών παίζουν τα σημεία εξαερισμού του δικτύου. Σε αυτά τα σημεία συνήθως τοποθετούνται ασφαλιστικές διατάξεις που καλούνται αεραεξαγωγοί μονής ή διπλής ενέργειας. Η θέση τους σε ένα δίκτυο ύδρευσης είναι συνήθως κάποιο ψηλό σημείο όπου έχει συγκεντρωθεί αέρας από το υπόλοιπο μέρος του δικτύου που πρέπει να απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα. Οι αεραεξαγωγοί μονής ενέργειας εκτελούν αποκλειστικά και μόνο την παραπάνω λειτουργία, ενώ οι αεραεξαγωγοί διπλής ενέργειας, όπως αυτός του σχήματος (6.28), εκτός από την εξαγωγή του αέρα διαθέτουν επιπλέον τη δυνατότητα εισαγωγής αυτού, σε περίπτωση δημιουργία υποπίεσης στους αγωγούς.



Σχήμα 6.28: Αεραεξαγωγός διπλής ενέργειας AVK [49]



Σχήμα 6.29: Δεικλίδα εκκενώσεως εντός φρεατίου [50]

Άλλες διατάξεις εξαερισμού αποτελούν οι εκκενωτές ή διαφορετικά δικλείδες εκκενώσεως, οι οποίες τοποθετούνται σε αντίθετα σημεία από αυτά των αεραεξαγωγών, δηλαδή σε κατώτερα υψομετρικά σημεία. Κατασκευαστικά μοιάζουν με ένα ταφ που κάθε μία του πλευρά διαθέτει μία βάνα. Τη μία από αυτές, διαδέχεται ένα ελεύθερο τμήμα αγωγού όπου επιτυγχάνεται η χειροκίνητη εκκένωση του αγωγού για πιθανή επισκευή βλάβης στο δίκτυο. Συχνά τέτοιες διατάξεις εκκενώσεως βρίσκονται τοποθετημένες εντός φρεατίων [9, κεφ.5].

6.7 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια για παραλληλισμό των ηλεκτρικών δικτύων και των δικτύων ύδρευσης, γεγονός που αποτελεί και τον τελικό στόχο της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά η σύγκριση επιτυγχάνεται σε επίπεδο μεταβλητών, στοιχείων και μεγεθών, μέσα από γενικότερες έννοιες που συμπεριλαμβάνουν τα στοιχεία αυτά, και χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση όλων των φυσικών συστημάτων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πηγές, τα στοιχεία γενικευμένης αντίστασης, αδράνειας και χωρητικότητας, που είναι βασικά στοιχεία που προκύπτουν από μαθηματικούς συνδυασμούς και σχέσεις των βασικών μεγεθών που προαναφέρθηκαν.

Έπειτα παρακολουθώντας τη ροή ισχύος στα συστήματα, μελετώνται οι βασικοί νόμοι που διέπουν τα μεγέθη ροής και σθένους, με παραλληλισμό αυτών με τους νόμους που ισχύουν στα ηλεκτρικά και υδραυλικά δίκτυα.

Κατόπιν, εισάγεται η έννοια των δίθυρων στοιχείων, διατάξεων που μετατρέπουν τις μορφές της ενέργειας ενός συστήματος, ενώ γίνεται ανάλυση της αρχής λειτουργίας και της χρησιμότητας των δίθυρων αυτών στοιχείων που εγκαθίστανται στα δίκτυα του βασικού σκελετού της εργασίας. Στα ηλεκτρικά δίκτυα υπάρχουν οι μετασχηματιστές, οι γεννήτριες, οι κινητήρες, οι ρυθμιστές τάσης, ενώ στα υδραυλικά δίκτυα υπάρχουν οι αντλίες, οι δεξαμενές ρύθμισης, τα φρεάτια πιεζοθραύσεως, οι ρυθμιστές πίεσης, οι στρόβιλοι κ.α.

Τελικά, γίνεται αναφορά σε συγκεκριμένες διατάξεις ασφαλείας που προστατεύουν τα ηλεκτρικά δίκτυα από υπερτάσεις και υπεραντάσεις, ενώ τα δίκτυα ύδρευσης από υδραυλικά πλήγματα και υπερπιέσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB

7.1 Ανάπτυξη προγράμματος

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική θεωρία του 4^{ου} κεφαλαίου αναπτύσσεται ο σχετικός κώδικας σε MATLAB, προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα υπολογισμού της πτώσης τάσης κατά την ακτινική λειτουργία ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε γραμμή με πολλές διακλαδώσεις, συγκεντρωμένα φορτία επί των κόμβων με σταθερή ισχύ ζήτησης (φορτία σταθερής ισχύος). Τα βασικά στάδια/βήματα της μεθόδου προσομοίωσης περιλαμβάνουν:

- ✓ **1^ο στάδιο: Δεδομένα εισόδου.** Ο χρήστης πρέπει να δώσει πρώτα από όλα τη μορφή του δικτύου υπό τη μορφή της τοπολογικής μήτρας A_diktyo , όπου το στοιχείο $A_diktyo(i, j)$ του i -ιστού κλάδου και του j -ιστού κόμβου είναι "1", αν ο j -ιστός κόμβος τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από τον i -ιστό κλάδο, ή "0", αν δεν ισχύει αυτό. Ακολούθως υπολογίζονται οι διαστάσεις της μήτρας, οι οποίες πρέπει να ταυτίζονται (τετραγωνική μήτρα), λόγω της ειδικής διαμόρφωσης του δικτύου. Έπειτα δίνεται το φορτίο ζήτησης σταθερής ισχύος κάθε κόμβου υπό μορφή μιγαδικού αριθμού σε καρτεσιανές συντεταγμένες (ενεργός ισχύς το πραγματικό μέρος σε kW, άεργος ισχύς το φανταστικό μέρος σε kVAr) σχηματίζοντας έτσι ένα διάνυσμα στήλη $Skombwn$. Επίσης, δίνεται η ονομαστική τάση τροφοδοσίας V_n του δικτύου σε kV και ο συντελεστής προσαύξησης της τάσης δικτύου στον κεντρικό κόμβο τροφοδοσίας "0" $a_prosaujisi$, ο οποίος μεταβάλλει την τάση εισόδου του κόμβου "0" με τη βοήθεια του χρήστη λόγω χρήσης του αντίστοιχου ρυθμιστή τάσης στην είσοδο της γραμμής τροφοδοσίας, προκειμένου να διατηρηθούν οι τάσεις κόμβων εντός των αντίστοιχων προδιαγραφών (π.χ. όρια τάσης λειτουργίας $\pm 5\%$ της ονομαστικής, όρια διακύμανσης τάσης ανά κόμβο $\pm 3\%$ γύρω από την αντίστοιχη μέση τιμή). Επιπλέον δίνονται το επιτρεπτό όριο απόκλισης ρεύματος κόμβου μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων $limit_J$ σε A και το μέγιστο πλήθος επαναλήψεων $Teran$, που θα εξηγηθούν ακολούθως. Από πλευράς διαμόρφωσης δικτύου δίνονται οι σύνθετες αντιστάσεις των κλάδων υπό τη μορφή $R+jX$ στο διάνυσμα στήλη κλάδων $Zgrammi$ σε Ω .
- ✓ **2^ο στάδιο: Αρχικοί υπολογισμοί.** Προσδιορίζονται οι αρχικές τιμές ρεύματος φορτίου στον j -ιστό κόμβο υπό τη μορφή:

$$J_j = \frac{S_j}{\sqrt{3} \cdot V_n} \quad (7.1)$$

Θεωρώντας ότι όλοι οι κόμβοι έχουν σε 1^η επανάληψη την ονομαστική τάση, σχηματίζεται το αντίστοιχο διάνυσμα ρευμάτων κόμβων J_kombwn .

Επίσης διαμορφώνεται η τετραγωνική μήτρα σύνθετων αντιστάσεων Zb , η οποία στο διαγώνιο της στοιχείο έχει το $Zb(i,i)$ και είναι ίσο με τη σύνθετη αντίσταση του i -ιοστού κλάδου/στοιχείου του διάνυσματος στήλης $Zgrammi(i)$, ενώ όλα τα μη διαγώνια στοιχεία είναι μηδενικά.

Επιπλέον αρχικοποιούνται οι παράμετροι του πλήθους επαναλήψεων $Tplithos_epanalifewn$ και της σημαίας ελέγχου $flag_check$ που αφορά τη μεταβολή των ρευμάτων κόμβων μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων με τιμές 0 και 1 αντίστοιχα.

- ✓ **3^ο στάδιο:** Υπολογισμοί επαναληπτικής διαδικασίας. Επισημαίνεται ότι λόγω της ύπαρξης φορτίου σταθερής ισχύος και όχι σταθερής έντασης ρεύματος, η μεταβολή τάσης σε κόμβο επιφέρει και τη μεταβολή ρεύματος σε κόμβο λόγω φορτίου σταθερής ισχύος. Γι' αυτό χρειάζεται η ακόλουθη επαναληπτική διαδικασία.

Αρχικά προσδιορίζεται με το τρέχον διάνυσμα ρευμάτων κόμβων J_kombwn το αντίστοιχο διάνυσμα στήλη ρευμάτων κλάδων I_kladwn σε A ως εξής:

$$I_kladwn = A_diktyo \cdot J_kombwn^T \quad (7.2)$$

Υπολογίζεται η πτώση τάσης σε κάθε κλάδο DV_kladwn σε V ως εξής:

$$DV_kladwn = Zb \cdot I_kladwn \quad (7.3)$$

Υπολογίζεται η πτώση τάσης σε κάθε κόμβο σε σχέση με τον κόμβο αναχώρησης "0" DV_kombwn σε V ως εξής:

$$DV_kombwn = A_diktyo^T \cdot DV_kladwn \quad (7.4)$$

Υπολογίζεται η φασική τάση κάθε j -ιοστού κόμβου $V_kombwn(j)$ σε kV ως εξής:

$$V_kombwn(j) = (1 + a_prosaujisi) \cdot \frac{Vn}{\sqrt{3}} - \frac{DV_kombwn(j)}{1000} \quad (7.5)$$

όπου ο πρώτος όρος αφορά τη φασική τάση τροφοδοσίας κόμβου αναχώρησης και ο δεύτερος την αντίστοιχη πτώση τάσης ως τον j -ιοστό κόμβο.

Έτσι σχηματίζεται το διάνυσμα των τάσεων κόμβων V_kombwn .

Συγχρόνως υπολογίζεται για την εκάστοτε τάση κόμβου η αντίστοιχη νέα ένταση ρεύματος κόμβου $J_kombwn_new(j)$ ως εξής:

$$J_kombwn_new(j) = \frac{Skombwn(j)}{3 \cdot V_kombwn(j)} \quad (7.6)$$

Ακολούθως γίνεται ο έλεγχος σύγκλισης της επαναληπτικής διαδικασίας. Δηλαδή αν η ένταση ρεύματος j -ιοστού κόμβου κατά την τρέχουσα επανάληψη $J_kombwn(j)$ διαφέρει από την

παραπάνω επαναυπολογιζόμενη ένταση ρεύματος j -ιοστού κόμβου $J_kombwn_new(j)$ περισσότερο από το όριο $limit_J$ ως προς τα μέτρα τους, τότε η σημαία ελέγχου $flag_check$ γίνεται "0". Αν για κανέναν κόμβο δε συμβεί αυτό, τότε το $flag_check$ μένει "1", όπως είχε τεθεί πριν ξεκινήσει ο έλεγχος σύγκλισης. Συγχρόνως γίνεται και η ανάθεση της νέας τιμής ρεύματος κόμβου στο διάνυσμα της αρχικής τιμής ρεύματος κόμβου, δηλαδή:

$$J_kombwn(j) = J_kombwn_new(j) \quad (7.7)$$

Επιπλέον προσαυξάνεται το πλήθος επαναλήψεων $Trplithos_epanalifewn$ κατά 1.

Μέσω μιας εντολής while-loop ελέγχεται μέσω κριτηρίων ελέγχου σύγκλισης και μη υπέρβασης μεγίστου αριθμού επαναλήψεων $Trplithos_epanalifewn < Teran$ η σύγκλιση του αλγορίθμου. Αν δεν έχει γίνει σύγκλιση, γίνεται η επιστροφή στην αρχή του 3^{ου} σταδίου, αλλιώς γίνεται η μετάβαση στο 4^ο στάδιο.

- ✓ **4^ο στάδιο:** Προσδιορισμός απωλειών γραμμής μεταφοράς. Μετά τη σύγκλιση της επαναληπτικής διαδικασίας μέσω της σχέσης (7.2) υπολογίζονται τα ρεύματα των κλάδων I_kladwn και οι αντίστοιχες ενεργές τιμές (μέσω της συνάρτησης "abs" λαμβάνεται το μέτρο), που αποθηκεύονται στο διάνυσμα $I_kladwn_energws$. Ακολούθως υπολογίζονται οι απώλειες του εκάστοτε κλάδου ως εξής:

$$S_apwleiw(n) = 3 \cdot I_kladwn_energws(i)^2 \cdot Zgrammi(i) \quad (7.8)$$

Τα τελικά αποτελέσματα καταγράφονται στη μήτρα $ejodos$, η οποία περιέχει τα εξής:

1^η στήλη: Μέτρο / ενεργός τιμή ρεύματος κλάδου σε A.

2^η στήλη: Μέτρο / ενεργός τιμή πτώσης τάσης κλάδου σε V.

3^η στήλη: Μέτρο / ενεργός τιμή πτώσης τάσης κόμβου ως προς την τάση του κόμβου αναχώρησης "0" σε V.

4^η στήλη: Εκατοστιαία πτώση τάσης κόμβου με βάση την ονομαστική φασική τάση σε % ως εξής:

$$DV_kombwn_Percentage = \frac{DV_kombwn(V)}{1000 \cdot \frac{Vn}{\sqrt{3}}} \cdot 100 \% \quad (7.9)$$

5^η στήλη: Μέτρο / ενεργός τιμή πολικής τάσης κόμβου σε kV.

6^η στήλη: Απώλειες ενεργού ισχύος κλάδου σε kW.

7^η στήλη: Απώλειες άεργου ισχύος κλάδου σε kVA.

Οι τιμές αντιστοιχούν με βάση τον αύξοντα αριθμό σε αντίστοιχο κόμβο ή κλάδο.

Ακολούθως παρατίθεται ο αντίστοιχος κώδικας στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB.

```

clear; % katharismos 'workspace'
clc; % katharismos 'command window'
% ANAGNWSH DEDOMENWN
% morfi diktyou
% kombos 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 kladoi
A_diktyo=[ 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1; % 1
           0 1 1 1 0 1 1 1 1 1; % 2
           0 0 1 1 0 0 0 0 1 1; % 3
           0 0 0 1 0 0 0 0 0 0; % 4
           0 0 0 0 1 0 0 0 0 0; % 5
           0 0 0 0 0 1 1 1 0 0; % 6
           0 0 0 0 0 0 1 0 0 0; % 7
           0 0 0 0 0 0 0 1 0 0; % 8
           0 0 0 0 0 0 0 0 1 1; % 9
           0 0 0 0 0 0 0 0 0 1]; % 10
plithos_kombwn=length(A_diktyo(:,1));
plithos_kladwn=length(A_diktyo(1,:));
% ISXYES se kombous / kVA komboi
Skombwn=[ 0.0+j*0.0; % 1
          0.0+j*0.0; % 2
          0.0+j*0.0; % 3
          400.0+j*300.0; % 4
          1200.0+j*900.0; % 5
          0.0+j*0.0; % 6
          800.0+j*600.0; % 7
          800.0+j*600.0; % 8
          400.0+j*300.0; % 9
          400.0+j*300.0]; % 10
% Onomastiki tasi
Vn= 20.0; % kV
% prosaujisi tasis se kombo "0"
a_prosaujisi= 0.09; % [-]
% akribeia epanalifwn
limit_J=0.001; %A
Tepan_limit=20;
% synthetes zeujeis / kladoi
Zgrammi=[ (0.22+j*0.37)*10.0; % 1
          (0.22+j*0.37)*10.0; % 2
          (0.22+j*0.37)*10.0; % 3

```



```

(0.22+j*0.37)*10.0;    %    4
(1.26+j*0.42)* 5.0;    %    5
(1.26+j*0.42)* 5.0;    %    6
(1.26+j*0.42)* 5.0;    %    7
(1.26+j*0.42)* 5.0;    %    8
(1.26+j*0.42)* 5.0;    %    9
(1.26+j*0.42)* 5.0];    %   10

% arxiko reyma
for i_metritis_kombwn= 1:plithos_kombwn
    J_kombwn(i_metritis_kombwn)=Skombwn(i_metritis_kombwn)/(Vn*(3^0.5));
end;
% kataskeui Zb
for i_metritis_Zb= 1:plithos_kladwn
    for j_metritis_Zb= 1:plithos_kladwn
        if (j_metritis_Zb==i_metritis_Zb)
            Zb(i_metritis_Zb,j_metritis_Zb)=Zgrammi(i_metritis_Zb);
        else
            Zb(i_metritis_Zb,j_metritis_Zb)=0;
        end;
    end;
end;
Tplithos_epanalifewn=1;
flag_check=0;
while (flag_check==0&(Tplithos_epanalifewn<=Tepan_limit))
% ypologismos reymatwn kladwn
    I_kladwn=A_diktyo*J_kombwn';
    ejodos(:,1)=abs(I_kladwn); % 1h stili kataxwrisi gia pinaka ejodou metro
reumatosis
%ypologismos ptwsis tasis epi tw'n kladwn
    DV_kladwn=Zb*I_kladwn;
    ejodos(:,2)=abs(DV_kladwn); % 2h stili kataxwrisi gia pinaka ejodou metro
ptwsi tasis kladwn
%ypologismos ptwsis tasis apo arxi grammis (kombo 0)
    DV_kombwn=A_diktyo'*DV_kladwn;
    ejodos(:,3)=abs(DV_kombwn); % 3h stili kataxwrisi gia pinaka ejodou metro
ptwsi tasis kombwn
% ypologismos ekatostiaia ptwsi tasis
    DV_kombwn_Percentage=DV_kombwn/(1000*Vn/(3^0.5))*100.0; % Vn -> metatropi se
Volt

```

```

    ejodos(:,4)=abs(DV_kombwn_Percentage); % 4h stili kataxwrisi gia pinaka
    ejodou metro ptwsi tasis kombwn
    %ypologismos phasikis tasis se kombous se kV me tasi anaforas se kombo 0
    % reumatos se kombous
    for i_metritis_kombwn= 1:plithos_kombwn
        V_kombwn(i_metritis_kombwn)=(1+a_prosaujisi)*Vn/(3^0.5)-
    DV_kombwn(i_metritis_kombwn)/1000;

    J_kombwn_new(i_metritis_kombwn)=Skombwn(i_metritis_kombwn)/(V_kombwn(i_metritis
    _kombwn)*3);
    end;
    ejodos(:,5)=abs(V_kombwn)*(3^0.5); %5h stili poliki tasi kombou se kV
    % elegxos
    flag_check=1;
    for i_metritis_kombwn= 1:plithos_kombwn
        % se ena panw apo orio epanalifi
        if (abs(J_kombwn(i_metritis_kombwn)-
    J_kombwn_new(i_metritis_kombwn))>limit_J)
            flag_check=0;
        end;
        J_kombwn(i_metritis_kombwn)=J_kombwn_new(i_metritis_kombwn);
    end;
    Tplithos_epanalifewn=Tplithos_epanalifewn+1;
end;
Tplithos_epanalifewn=Tplithos_epanalifewn-1
% ypologismos apwleiwn
I_kladwn=A_diktyo*J_kombwn';
I_kladwn_energws=abs(I_kladwn);
for i_metritis_kladwn= 1:plithos_kladwn

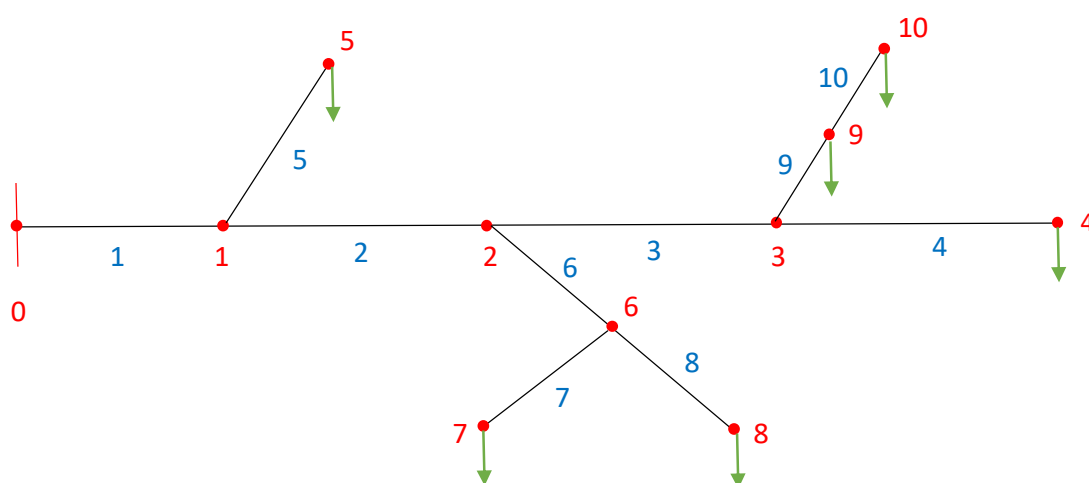
    S_apwleiwn(i_metritis_kladwn)=3*(I_kladwn_energws(i_metritis_kladwn)^2)*Zgrammi
    (i_metritis_kladwn);
end;
ejodos(:,6)=real(S_apwleiwn)/1000; %6h stili apwleies se kW
ejodos(:,7)=imag(S_apwleiwn)/1000; %6h stili apwleies se kVAr

```

Από τα σχετικά αποτελέσματα εύκολα υπολογίζονται οι συνολικές ενεργές και άεργες απώλειες ισχύος για το εκάστοτε επίπεδο φόρτισης, ενώ από την εξέταση διαφόρων επιπέδων φόρτισης και τις κατάλληλες ρυθμίσεις της τάσης τροφοδοσίας μέσω του συντελεστή προσαύξησης, τα όρια τάσης λειτουργίας και τα όρια διακύμανσης τάσης του εκάστοτε κόμβου.

7.2 Δεδομένα εκτέλεσης προγράμματος βασικού σεναρίου

Δίνεται το δίκτυο διανομής μέσης τάσης των 20kV του σχήματος (7.1), που πέραν του κόμβου τροφοδότησης "0" διαθέτει 10 κόμβους, εκ των οποίων στους κόμβους "4", "5", "7", "8", "9" και "10" υπάρχουν φορτία σταθερής ισχύος με επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0,8 ίσα με 500, 1500, 1000, 1000, 500 και 500kVA αντίστοιχα. Μπορεί να είναι μία παραθαλάσσια περιοχή κατά μήκος της ακτής, όπου η γραμμή μέσης τάσης τροφοδοτεί υποσταθμούς μικρών οικισμών-χωριών. Οι λοιποί κόμβοι δεν έχουν φορτία.



Σχήμα 7.1: Δίκτυο διανομής μέσης τάσης, ονομαστικής τάσης 20kV, κόμβοι 0 ως 10, κλάδοι 1 ως 10.

Στο πρόγραμμα οι ισχύες δίνονται σε καρτεσιανή μορφή ως εξής:

$$\hat{S} = |S| \angle \varphi = |S| \cdot \cos \varphi + j \cdot |S| \cdot \sin \varphi = P + j \cdot Q \quad (7.10)$$

όπου \hat{S} μιγαδική φαινόμενη ισχύς, $|S|$ η φαινόμενη ισχύς (δεδομένο), φ η γωνία μιγαδικής φαινόμενης ισχύος προσδιοριζόμενη μέσω συντελεστή ισχύος $\cos \varphi$ ως εξής:

$$\varphi = \cos^{-1}(\cos \varphi) \quad (7.11)$$

με θετική τιμή λόγω επαγωγικής συμπεριφοράς, P η ενεργός και Q η άεργος ισχύς.

Οι γραμμές κορμού/κλάδοι " 1" , " 2" , " 3" , " 4" , είναι από αγωγούς ACSR-95 με ηλεκτρικά χαρακτηριστικά $(0,22 + j \cdot 0,37)$ [Ω/km] και μήκη 10 km έκαστος, ενώ οι γραμμές διακλάδωσης "5", "6" "7", "8", "9" και "10" είναι από αγωγούς ACSR-16 με ηλεκτρικά χαρακτηριστικά $(0,26 + j \cdot 0,42)$ [Ω/km] και μήκη 5 km έκαστος.

Με βάση το σχήμα (7.1) διαμορφώνεται η τοπολογική μήτρα δικτύου $A_diktyou$ ως εξής:

$A_diktyou =$

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
0	0	1	1	0	0	0	0	1	1
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

κόμβοι

κλάδοι

Ως προς το μέγιστο πλήθος επαναλήψεων T_eran_limit τίθεται ίσο με 20 και ως προς το όριο απόκλισης ρεύματος μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων $limit_J$ ίσο με 0,001 A. Υπενθυμίζεται δε η ονομαστική πολική τάση $V_n=20\text{kV}$, ενώ ο συντελεστής προσαύξησης $a_prosauijisis$ της τάσης στον κόμβο αναχώρησης "0" προσδιορίζεται κατόπιν δοκιμών έτσι, ώστε σε κανέναν κόμβο που εξυπηρετεί φορτίο να μη βρίσκεται πέραν του $20\text{kV} \pm 5\%$, δηλαδή μεταξύ 19 και 21kV. Θα ξεκινήσει κανείς από την τιμή 0,01 και με βήματα +0,01 θα βρεθεί η πρώτη τιμή συντελεστή προσαύξησης που θα ικανοποιεί το ανωτέρω κριτήριο λειτουργίας.

7.3 Αποτελέσματα εκτέλεσης προγράμματος βασικού σεναρίου

Από την εκτέλεση του προγράμματος βασικού σεναρίου για συντελεστές προσαύξησης 0,01, 0,02, 0,03, 0,04, 0,05, 0,06, 0,07, 0,08, 0,09 η πρώτη τιμή που ικανοποιεί το όριο λειτουργίας είναι η τιμή 0,09. Τα σχετικά αποτελέσματα ως προς το ρεύμα γραμμής, την πτώση τάσης γραμμής, την πτώση τάσης στον κόμβο ως προς την τάση του κόμβου "0", την αντίστοιχη εκατοστιαία πτώση τάσης, την πολική τάση του κόμβου, τις ενεργές και άεργες απώλειες των αντίστοιχων κλάδων, καθώς και τις συνολικές απώλειες, καταγράφονται στον πίνακα (7.1). Ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει σε 5 επαναλήψεις

Πίνακας 7.1 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου διανομής μέσης τάσης σχήματος (7.1) για πλήρη φόρτιση 100%.

Κόμβος / κλάδος	Ρεύμα γραμμής (A)	Πτώση τάσης γραμμής (V)	Πτώση τάσης κόμβου ως προς "0" (V)	Εκατοστιαία πτώση τάσης (%)	Πολική τάση κόμβου (kV)	Ενεργός Ισχύς Απωλειών (kW) σε κλάδο	Άεργος Ισχύς απωλειών (kVAr) σε κλάδο
1	147,775	636,118	636,118	5,509	20,776	144,129	242,398
2	105,138	452,584	1088,700	9,428	20,052	72,958	122,703
3	44,553	191,786	1280,472	11,089	19,745	13,101	22,034
4	14,696	63,259	1343,722	11,637	19,644	1,425	2,397
5	42,639	283,157	871,598	7,548	20,311	34,362	11,454
6	60,590	402,364	1418,924	12,288	19,388	69,386	23,129
7	30,295	201,182	1596,499	13,826	19,057	17,346	5,782
8	30,295	201,182	1596,499	13,826	19,057	17,346	5,782
9	29,858	198,280	1435,403	12,431	19,419	16,850	5,617
10	14,992	99,560	1517,085	13,138	19,255	4,248	1,416
Ρύθμιση τάσης σε αναχώρηση κόμβου "0"				+9%	ΣΥΝΟΛΟ	391,152	442,711
Πλήθος επαναλήψεων για σύγκλιση				5			

Η αναγκαία τάση τροφοδοσίας του κόμβου αναχώρησης "0" ανέρχεται σε $1,09 \cdot 20\text{kV} = 21,8\text{kV}$, όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι είναι μεταξύ των 20,776 kV (κόμβος "1") ως 19,057 kV (κόμβοι "7" και "8"), αν και η τάση σε κόμβους φορτίων ("4", "5", "7", "8", "9" και "10") περιορίζεται μεταξύ των 20,311 kV ως 19,057 kV. Οι δυσμενέστερες συνθήκες παρουσιάζονται στους κόμβους "7" και "8", όπου η συνολική πτώση τάσης ανέρχεται σε 13,826% σε σχέση με την τάση αναχώρησης του κόμβου "0" με βάση την ονομαστική τάση του δικτύου. Σε αυτό το σημείο αν συγκριθεί με τα αποτελέσματα της εφαρμογής 5.1 του [1], υπάρχει μία σημαντική απόκλιση, διότι η αντίστοιχη υπολογιζόμενη πτώση τάσης είναι 13,22%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η εδώ χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι πιο ακριβής διότι:

(α) δεν έχει αγνοηθεί το φανταστικό μέρος κατά τους υπολογισμούς της πτώσης τάσης, ενώ στο [1] γίνεται χρήση της προσεγγιστικής σχέσης:

$$K_j = \frac{V_N^2}{100 \cdot (R_0 \cdot \cos \varphi + X_0 \cdot \sin \varphi)} \quad (7.12)$$

ώστε να προσδιοριστεί η πτώση τάσης από

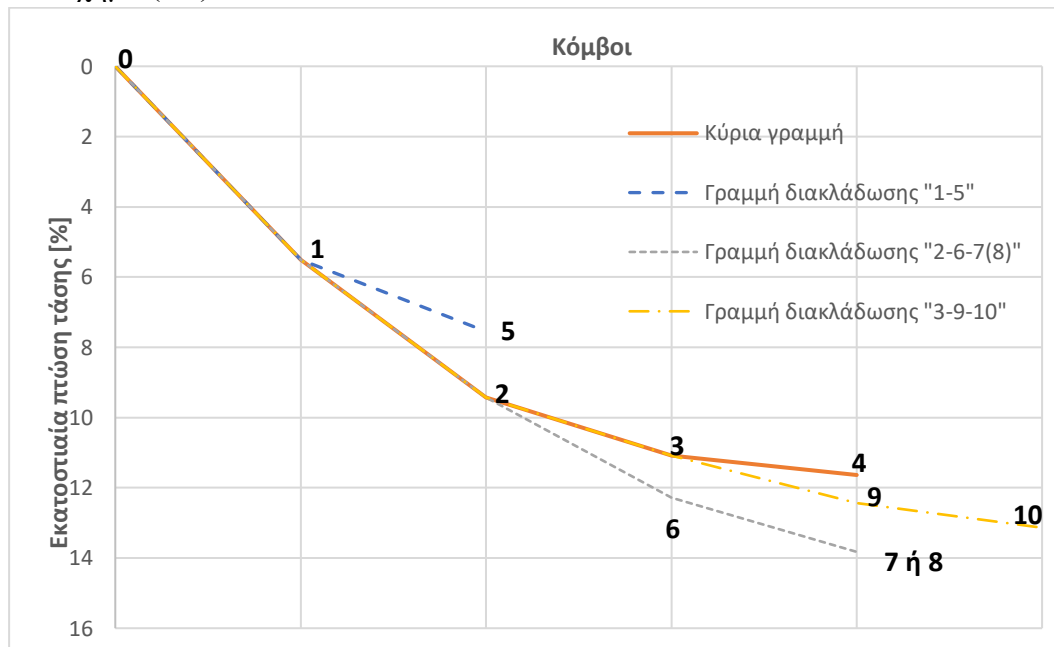
$$E_{K_j} = \frac{1}{K_j} \cdot S_j \cdot L_j \quad (7.13)$$

(β) έχουν θεωρηθεί τα φορτία ως φορτία σταθερής ισχύος και όχι σταθερού ρεύματος, με αποτέλεσμα μετά τις 5 επαναλήψεις τα αρχικά ρεύματα κλάδων να διαφέρουν από τα τελικά υπολογιζόμενα λόγω της μεταβολής των τάσεων κόμβων, όπως φαίνεται στον πίνακα (7.2)

Πίνακας 7.2 Σύγκλιση τιμών ενεργών τιμών ρευμάτων κλάδων/γραμμών μεταξύ αρχικοποίησης και με την ολοκλήρωση σύγκλισης.

Κόμβος / κλάδος	Ζητούμενη φαινόμενη ισχύς κόμβου (kVA) με κοινό επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0.8	Διερχόμενη φαινόμενη ισχύς κλάδου (kVA) με κοινό επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0.8	Ρεύμα γραμμής (A) / Αρχικό	Ρεύμα γραμμής (A) / 5η επανάληψη
1	0	5000	144,338	147,775
2	0	3500	101,036	105,138
3	0	1500	43,301	44,553
4	500	500	14,434	14,696
5	1500	1500	43,301	42,639
6	0	2000	57,735	60,590
7	1000	1000	28,868	30,295
8	1000	1000	28,868	30,295
9	500	1000	28,868	29,858
10	500	500	14,434	14,992

Σε κάθε περίπτωση η εδώ εφαρμοζόμενη μέθοδος είναι πιο ακριβής. Το διάγραμμα πτώσεων τάσεων φαίνεται στο σχήμα (7.2)



Σχήμα 7.2: Διάγραμμα εκατοστιαίας πτώσης τάσης κόμβων ακτινικού δικτύου διανομής μέσης τάσης σεναρίου πλήρους φόρτισης 100%

7.4 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς διαφορετικά επίπεδα φόρτισης

Στη συνέχεια επαναλήφθηκε η εφαρμογή του προγράμματος για διαφορετικά επίπεδα συνολικής φόρτισης. Δηλαδή αντί του αρχικού φορτίου περιοριζόταν αναλογικά η ζήτηση φορτίου στο 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% και 90% έναντι του 100% της αρχικής φόρτισης των

παραγράφων 7.2 και 7.3. Τα άλλα στοιχεία πλην του συντελεστή προσαύξησης τάσης του κόμβου αναχώρησης "0" παραμένουν αμετάβλητα. Ακολούθως καταγράφονται οι αντίστοιχοι πίνακες προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου διανομής.

Πίνακας 7.3 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου διανομής μέσης τάσης σχήματος (7.1) για φόρτιση 90%.

Κόμβος / κλάδος	Ρεύμα γραμμής (A)	Πτώση τάσης γραμμής (V)	Πτώση τάσης κόμβου ως προς "0" (V)	Εκατοστιαία πτώση τάσης (%)	Πολική τάση κόμβου (kV)	Ενεργός Ισχύς Απωλειών (kW) σε κλάδο	Άεργος Ισχύς απωλειών (kVAr) σε κλάδο
1	132,773	571,540	571,540	4,950	20,681	116,350	195,679
2	94,305	405,948	977,487	8,465	20,031	58,697	98,717
3	40,012	172,237	1149,713	9,957	19,755	10,566	17,771
4	13,212	56,874	1206,581	10,449	19,664	1,152	1,938
5	38,470	255,472	783,936	6,789	20,260	27,971	9,324
6	54,296	360,568	1273,267	11,027	19,436	55,719	18,573
7	27,148	180,284	1432,335	12,404	19,140	13,930	4,643
8	27,148	180,284	1432,335	12,404	19,140	13,930	4,643
9	26,800	177,972	1288,863	11,162	19,462	13,575	4,525
10	13,451	89,323	1362,174	11,797	19,315	3,419	1,140
Ρύθμιση τάσης σε αναχώρηση κόμβου "0"				+8%	ΣΥΝΟΛΟ	315,309	356,953
Πλήθος επαναλήψεων για σύγκλιση				5			

Πίνακας 7.4 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου διανομής μέσης τάσης σχήματος (7.1) για φόρτιση 80%.

Κόμβος / κλάδος	Ρεύμα γραμμής (A)	Πτώση τάσης γραμμής (V)	Πτώση τάσης κόμβου ως προς "0" (V)	Εκατοστιαία πτώση τάσης (%)	Πολική τάση κόμβου (kV)	Ενεργός Ισχύς Απωλειών (kW) σε κλάδο	Άεργος Ισχύς απωλειών (kVAr) σε κλάδο
1	117,828	507,208	507,208	4,393	20,585	91,636	154,114
2	83,549	359,649	866,856	7,507	20,009	46,074	77,488
3	35,492	152,779	1019,628	8,830	19,764	8,314	13,983
4	11,732	50,504	1070,127	9,268	19,683	0,909	1,528
5	34,280	227,649	696,420	6,031	20,210	22,211	7,404
6	48,060	319,154	1128,540	9,773	19,483	43,657	14,552
7	24,030	159,577	1269,283	10,992	19,220	10,914	3,638
8	24,030	159,577	1269,283	10,992	19,220	10,914	3,638
9	23,759	157,780	1143,065	9,899	19,505	10,670	3,557
10	11,919	79,154	1208,055	10,462	19,375	2,685	0,895
Ρύθμιση τάσης σε αναχώρηση κόμβου "0"				+7%	ΣΥΝΟΛΟ	247,984	280,797
Πλήθος επαναλήψεων για σύγκλιση				4			

Πίνακας 7.5 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου διανομής μέσης τάσης σχήματος (7.1) για φόρτιση 70%.

Κόμβος / κλάδος	Ρεύμα γραμμής (A)	Πτώση τάσης γραμμής (V)	Πτώση τάσης κόμβου ως προς "0" (V)	Εκατοστιαία πτώση τάσης (%)	Πολική τάση κόμβου (kV)	Ενεργός Ισχύς Απωλειών (kW) σε κλάδο	Άεργος Ισχύς απωλειών (kVA _r) σε κλάδο
1	102,944	443,137	443,137	3,838	20,488	69,945	117,635
2	72,874	313,697	756,834	6,554	19,986	35,051	58,950
3	30,994	133,416	890,245	7,710	19,772	6,340	10,663
4	10,257	44,151	934,393	8,092	19,701	0,694	1,168
5	30,071	199,694	609,065	5,275	20,159	17,091	5,697
6	41,882	278,129	984,774	8,528	19,527	33,154	11,051
7	20,941	139,065	1107,379	9,590	19,299	8,288	2,763
8	20,941	139,065	1107,379	9,590	19,299	8,288	2,763
9	20,737	137,711	998,047	8,643	19,546	8,128	2,709
10	10,399	69,056	1054,766	9,135	19,432	2,044	0,681
Ρύθμιση τάσης σε αναχώρηση κόμβου "0"				+6%	ΣΥΝΟΛΟ	189,025	214,081
Πλήθος επαναλήψεων για σύγκλιση				4			

Πίνακας 7.6 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου διανομής μέσης τάσης σχήματος (7.1) για φόρτιση 60%.

Κόμβος / κλάδος	Ρεύμα γραμμής (A)	Πτώση τάσης γραμμής (V)	Πτώση τάσης κόμβου ως προς "0" (V)	Εκατοστιαία πτώση τάσης (%)	Πολική τάση κόμβου (kV)	Ενεργός Ισχύς Απωλειών (kW) σε κλάδο	Άεργος Ισχύς απωλειών (kVA _r) σε κλάδο
1	87,159	375,190	375,190	3,249	20,597	50,139	84,324
2	61,586	265,106	640,295	5,545	20,173	25,033	42,101
3	26,227	112,898	753,190	6,523	19,992	4,540	7,635
4	8,690	37,406	790,594	6,847	19,932	0,498	0,838
5	25,574	169,831	516,256	4,471	20,318	12,361	4,120
6	35,360	234,817	832,640	7,211	19,786	23,631	7,877
7	17,680	117,409	936,109	8,107	19,593	5,908	1,969
8	17,680	117,409	936,109	8,107	19,593	5,908	1,969
9	17,537	116,462	844,420	7,313	19,801	5,813	1,938
10	8,790	58,372	892,384	7,728	19,705	1,460	0,487
Ρύθμιση τάσης σε αναχώρηση κόμβου "0"				+6%	ΣΥΝΟΛΟ	135,292	153,259
Πλήθος επαναλήψεων για σύγκλιση				4			

Πίνακας 7.7 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου διανομής μέσης τάσης σχήματος (7.1) για φόρτιση 50%.

Κόμβος / κλάδος	Ρεύμα γραμμής (A)	Πτώση τάσης γραμμής (V)	Πτώση τάσης κόμβου ως προς "0" (V)	Εκατοστιαία πτώση τάσης (%)	Πολική τάση κόμβου (kV)	Ενεργός Ισχύς Απωλειών (kW) σε κλάδο	Άεργος Ισχύς απωλειών (kVA _r) σε κλάδο
1	72,542	312,269	312,269	2,704	20,499	34,734	58,416
2	51,176	220,294	532,562	4,612	20,146	17,286	29,073
3	21,818	93,919	626,480	5,425	19,996	3,142	5,284
4	7,236	31,150	657,629	5,695	19,946	0,346	0,581
5	21,367	141,893	430,092	3,725	20,265	8,629	2,876
6	29,358	194,962	692,191	5,995	19,825	16,291	5,430
7	14,679	97,481	778,067	6,738	19,665	4,073	1,358
8	14,679	97,481	778,067	6,738	19,665	4,073	1,358
9	14,582	96,834	702,380	6,083	19,836	4,019	1,340
10	7,306	48,514	742,258	6,428	19,757	1,009	0,336
Ρύθμιση τάσης σε αναχώρηση κόμβου "0"				+5%	ΣΥΝΟΛΟ	93,601	106,052
Πλήθος επαναλήψεων για σύγκλιση				3			

Πίνακας 7.8 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου διανομής μέσης τάσης σχήματος (7.1) για φόρτιση 40%.

Κόμβος / κλάδος	Ρεύμα γραμμής (A)	Πτώση τάσης γραμμής (V)	Πτώση τάσης κόμβου ως προς "0" (V)	Εκατοστιαία πτώση τάσης (%)	Πολική τάση κόμβου (kV)	Ενεργός Ισχύς Απωλειών (kW) σε κλάδο	Άεργος Ισχύς απωλειών (kVA _r) σε κλάδο
1	57,968	249,531	249,531	2,161	20,400	22,178	37,300
2	40,830	175,757	425,288	3,683	20,118	11,003	18,505
3	17,426	75,013	500,300	4,333	19,998	2,004	3,371
4	5,786	24,905	525,204	4,548	19,958	0,221	0,372
5	17,138	113,812	344,008	2,979	20,213	5,551	1,850
6	23,404	155,420	552,485	4,785	19,862	10,353	3,451
7	11,702	77,710	620,920	5,377	19,735	2,588	0,863
8	11,702	77,710	620,920	5,377	19,735	2,588	0,863
9	11,640	77,302	560,926	4,858	19,871	2,561	0,854
10	5,830	38,713	592,759	5,133	19,807	0,642	0,214
Ρύθμιση τάσης σε αναχώρηση κόμβου "0"				+4%	ΣΥΝΟΛΟ	59,691	67,642
Πλήθος επαναλήψεων για σύγκλιση				3			

Πίνακας 7.9 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου διανομής μέσης τάσης σχήματος (7.1) για φόρτιση 30%.

Κόμβος / κλάδος	Ρεύμα γραμμής (A)	Πτώση τάσης γραμμής (V)	Πτώση τάσης κόμβου ως προς "0" (V)	Εκατοστιαία πτώση τάσης (%)	Πολική τάση κόμβου (kV)	Ενεργός Ισχύς Απωλειών (kW) σε κλάδο	Άεργος Ισχύς απωλειών (kVAr) σε κλάδο
1	43,429	186,945	186,945	1,619	20,300	12,448	20,935
2	30,541	131,469	318,414	2,758	20,090	6,156	10,354
3	13,049	56,170	374,584	3,244	20,000	1,124	1,890
4	4,337	18,668	393,252	3,406	19,970	0,124	0,209
5	12,888	85,584	257,967	2,234	20,159	3,139	1,046
6	17,493	116,164	413,443	3,581	19,899	5,783	1,928
7	8,746	58,082	464,574	4,023	19,803	1,446	0,482
8	8,746	58,082	464,574	4,023	19,803	1,446	0,482
9	8,712	57,855	419,986	3,637	19,905	1,435	0,478
10	4,361	28,962	443,810	3,844	19,857	0,359	0,120
Ρύθμιση τάσης σε αναχώρηση κόμβου "0"				+3%	ΣΥΝΟΛΟ	33,460	37,924
Πλήθος επαναλήψεων για σύγκλιση				3			

Πίνακας 7.10 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου διανομής μέσης τάσης σχήματος (7.1) για φόρτιση 20%.

Κόμβος / κλάδος	Ρεύμα γραμμής (A)	Πτώση τάσης γραμμής (V)	Πτώση τάσης κόμβου ως προς "0" (V)	Εκατοστιαία πτώση τάσης (%)	Πολική τάση κόμβου (kV)	Ενεργός Ισχύς Απωλειών (kW) σε κλάδο	Άεργος Ισχύς απωλειών (kVAr) σε κλάδο
1	28,923	124,502	124,502	1,078	20,200	5,521	9,285
2	20,308	87,420	211,921	1,835	20,060	2,722	4,578
3	8,686	37,389	249,311	2,159	20,001	0,498	0,837
4	2,890	12,438	261,749	2,267	19,981	0,055	0,093
5	8,614	57,207	171,959	1,489	20,106	1,403	0,468
6	11,622	77,182	275,033	2,382	19,934	2,553	0,851
7	5,811	38,591	308,994	2,676	19,870	0,638	0,213
8	5,811	38,591	308,994	2,676	19,870	0,638	0,213
9	5,796	38,492	279,534	2,421	19,937	0,635	0,212
10	2,900	19,261	295,384	2,558	19,906	0,159	0,053
Ρύθμιση τάσης σε αναχώρηση κόμβου "0"				+2%	ΣΥΝΟΛΟ	14,822	16,802
Πλήθος επαναλήψεων για σύγκλιση				3			

Πίνακας 7.11 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου διανομής μέσης τάσης σχήματος (7.1) για φόρτιση 10%.

Κόμβος / κλάδος	Ρεύμα γραμμής (A)	Πτώση τάσης γραμμής (V)	Πτώση τάσης κόμβου ως προς "0" (V)	Εκατοστιαία πτώση τάσης (%)	Πολική τάση κόμβου (kV)	Ενεργός Ισχύς Απωλειών (kW) σε κλάδο	Άεργος Ισχύς απωλειών (kVAr) σε κλάδο
1	14,447	62,189	62,189	0,539	20,100	1,378	2,317
2	10,128	43,598	105,787	0,916	20,031	0,677	1,139
3	4,336	18,666	124,453	1,078	20,001	0,124	0,209
4	1,444	6,216	130,669	1,132	19,991	0,014	0,023
5	4,319	28,679	85,972	0,745	20,053	0,352	0,117
6	5,792	38,463	137,225	1,188	19,967	0,634	0,211
7	2,896	19,231	154,143	1,335	19,936	0,159	0,053
8	2,896	19,231	154,143	1,335	19,936	0,159	0,053
9	2,892	19,207	139,543	1,208	19,969	0,158	0,053
10	1,447	9,607	147,452	1,277	19,953	0,040	0,013
Ρύθμιση τάσης σε αναχώρηση κόμβου "0"				+1%	ΣΥΝΟΛΟ	3,694	4,188
Πλήθος επαναλήψεων για σύγκλιση				2			

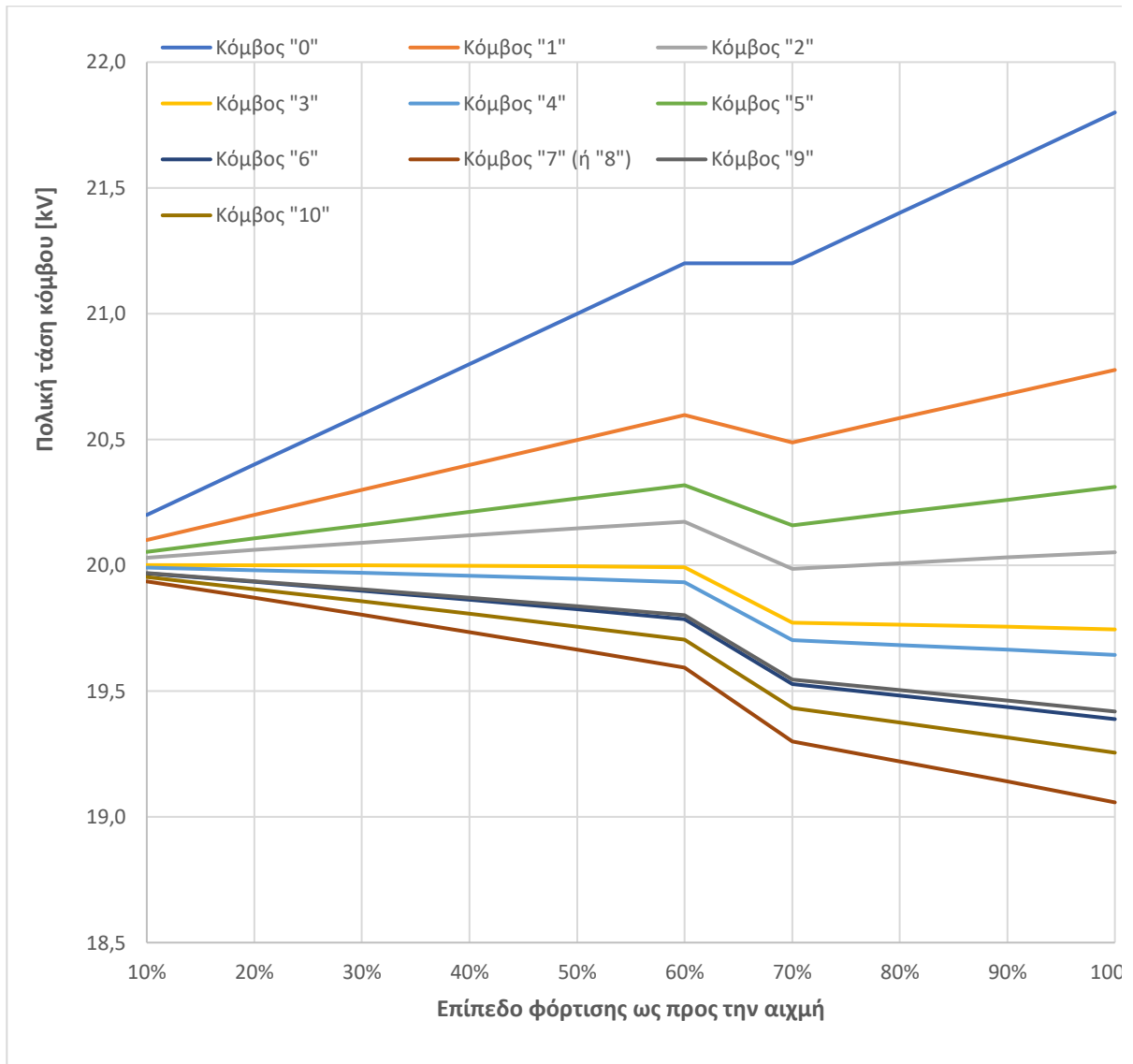
Συνοψίζοντας παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η φόρτιση των κόμβων του δικτύου αυξάνεται, τόσο ο συντελεστής προσαύξησης, όσο και ο αριθμός επαναλήψεων, όπως φαίνεται στον πίνακα (7.12)

Πίνακας 7.12 Ρύθμιση συντελεστή προσαύξησης και αναγκαίο πλήθος επαναλήψεων με βάση το επίπεδο φόρτισης των κόμβων φορτίου.

Επίπεδο φόρτισης	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	αρχικό 100%
Συντελεστής προσαύξησης	1%	2%	3%	4%	5%	6%	6%	7%	8%	9%
Πλήθος επαναλήψεων	2	3	3	3	3	4	4	4	5	5

Από τα σχετικά αποτελέσματα πραγματοποιούνται:

- η γραφική παράσταση της πολικής τάσης των κόμβων "0" ως "10", στο σχήμα 7.3 από το οποίο φαίνεται ότι χρειάζεται να αυξηθεί σημαντικά η τάση του κόμβου αναχώρησης "0", προκειμένου να διατηρηθούν οι απομακρυσμένοι κόμβοι 7,8 και 10 εντός των ορίων τάσης λειτουργίας.



Σχήμα 7.3: Πολική τάση κόμβων "0" ως "10" σε συνάρτηση με το επίπεδο φόρτισης ως προς την αιχμή (βασικό σενάριο)

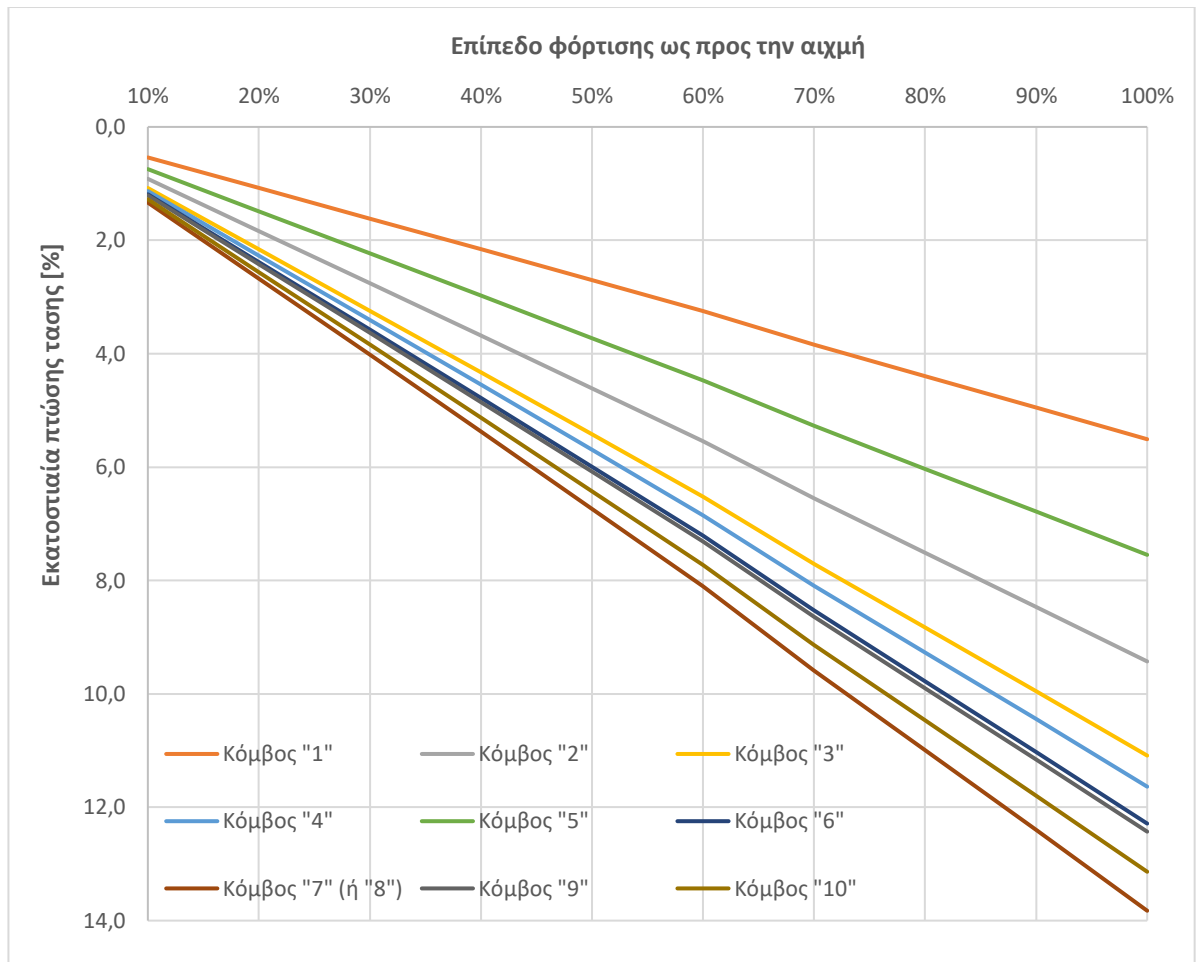
Μαζί με τον κόμβο "0" συμπερασύρονται και οι κοντινοί κόμβοι "1", "2", "5", ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι έχουν μείωση της τάσης με την αύξηση του επιπέδου φόρτισης. Στον πίνακα (7.13) καταγράφονται συνοπτικά τα όρια διακύμανσης των πολικών τάσεων των κόμβων, το αντίστοιχο εύρος και το εκατοστιαίο ποσοστό διακύμανσης ως προς την ονομαστική τάση του δικτύου, από τα οποία φαίνεται ότι είναι περιορισμένο και μικρότερο του 6% (δεν είναι γνωστή η μέση τιμή $\pm 3\%$), εκτός από τον κόμβο αναχώρησης "0", ο οποίος δεν εξυπηρετεί όμως φορτίο. Η δυσμενέστερη διακύμανση για κόμβους φορτίου παρουσιάζεται σε κόμβους "7" και "8" και είναι ίση με 4,39%. Σε κάθε περίπτωση αν δεν υπήρχε η αύξηση του

συντελεστή προσαύξησης όλοι οι κόμβοι πλην του Ψ θα παρουσίαζαν σημαντική μείωση της πολικής τάσης.

Πίνακας 7.13 Όρια διακύμανσης- εύρος διακύμανσης – εκατοστιαίο ποσοστό διακύμανσης και πολικής τάσης ως προς ονομαστική τάση δικτύου κόμβων Ψ ως Ξ για επίπεδα φόρτισης από 10% ως 100% της μέγιστης ισχύος του βασικού σεναρίου.

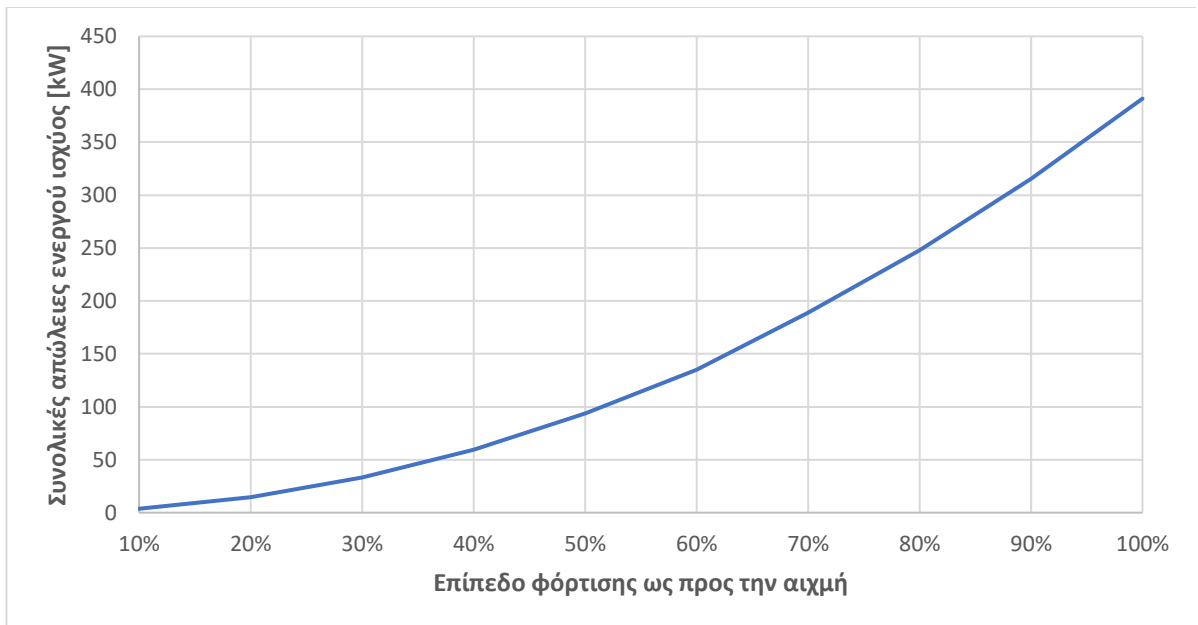
Κόμβος	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ελάχιστη τάση (kV)	20,200	20,100	19,986	19,745	19,644	20,053	19,388	19,057	19,057	19,419	19,255
Μέγιστη τάση (kV)	21,800	20,776	20,173	20,001	19,991	20,318	19,967	19,936	19,936	19,969	19,953
Εύρος διακύμανσης (μέγιστο-ελάχιστο) (kV)	1,600	0,676	0,187	0,256	0,347	0,265	0,579	0,878	0,878	0,550	0,698
Εκατοστιαίο ποσοστό διακύμανσης τάσης (%)	8,00	3,38	0,94	1,28	1,74	1,32	2,89	4,39	4,39	2,75	3,49

- η γραφική παράσταση της εκατοστιαίας πτώσης τάσης των κόμβων σε σχέση με την τάση του κόμβου αναχώρησης Ψ ως προς την ονομαστική τάση του δικτύου (σχήμα 7.4), από το οποίο φαίνεται η σχεδόν γραμμική κατά μέτρο αύξηση της πτώσης τάσης με αύξηση του επιπέδου φόρτισης για το σύνολο των κόμβων, με τα δυσμενέστερα αποτελέσματα να εμφανίζονται στους κόμβους 7 και 8. Όμοια συμπεράσματα θα προέκυπταν και από την αντίστοιχη παράσταση του μέτρου της πτώσης τάσης κόμβου σε σχέση με την τάση του κόμβου αναχώρησης Ψ.

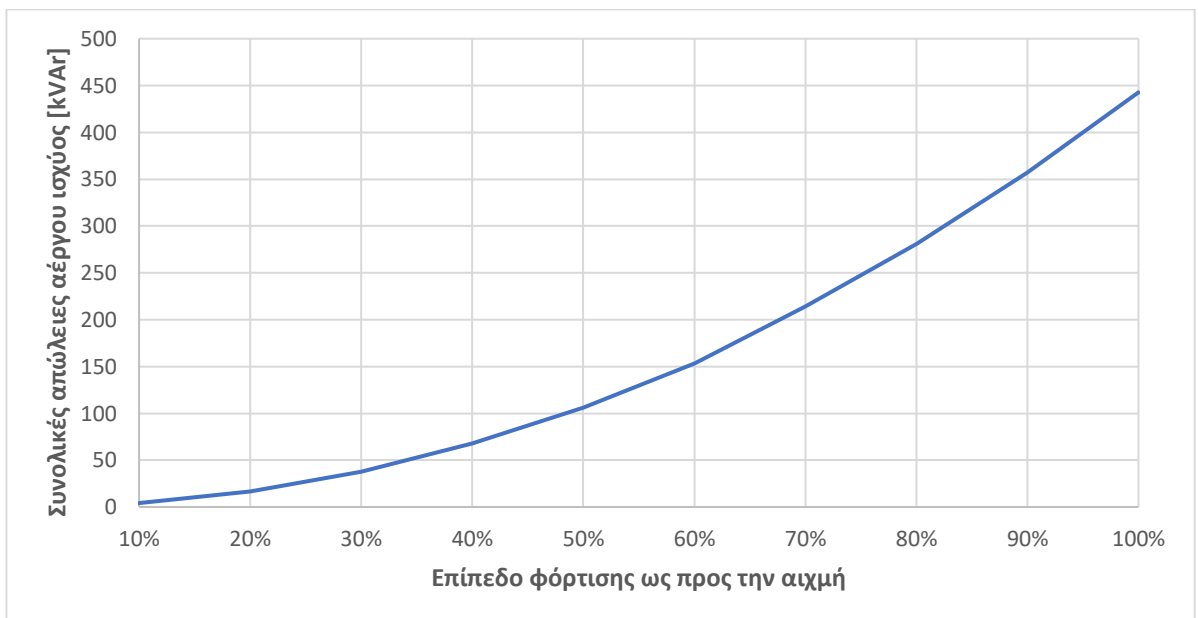


Σχήμα 7.4: Εκατοστιαία πτώση τάσης κόμβων σε σχέση με την τάση κόμβου αναχώρησης U ως προς την ονομαστική τάση δικτύου σε συνάρτηση με το επίπεδο φόρτισης του δικτύου ως προς την αιχμή (βασικό σενάριο)

- οι γραφικές παραστάσεις των συνολικών απωλειών ενεργού και άεργου ισχύος του υπό μελέτη δικτύου διανομής σε συνάρτηση με το συντελεστή φόρτισης ως προς την αιχμή (βασικό σενάριο), όπως φαίνονται στα σχήματα (7.5) και (7.6), από τα οποία διαπιστώνεται ότι οι απώλειες αυξάνονται μη γραμμικά (περισσότερο μοιάζει με παραβολή), το οποίο άλλωστε είναι λογικό με βάση τη σχέση (7.8). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να φτάνουν οι απώλειες ενεργού ισχύος σχεδόν στο 10% της αποδιδόμενης ενεργού ισχύος στα φορτία (391,15kW για αποδιδόμενα 4000kW), ενώ ομοίως για απώλειες άεργου ισχύος σχεδόν στο 15% της αποδιδόμενης άεργου ισχύος στα φορτία (442,711kVAr για αποδιδόμενα 3000kVAr).



Σχήμα 7.5: Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος δικτύου διανομής σχήματος 7.1 σε συνάρτηση με τα επίπεδα φόρτισης ως προς την αιχμή (βασικό σενάριο)



Σχήμα 7.6: Συνολικές απώλειες αέργου ισχύος ακτινικού δικτύου διανομής σχήματος 7.1 σε συνάρτηση με τα επίπεδα φόρτισης ως προς την αιχμή (βασικό σενάριο)

7.5 Συμπεράσματα

Από τη σχετική μελέτη του ακτινικού δικτύου διανομής και μέσω του μοντέλου προσομοίωσης προέκυψε το συμπέρασμα ότι σε περίπτωση ύπαρξης φορτίων σταθερής ισχύος η συμπεριφορά τους μπορεί να μελετηθεί εύκολα, αν και με χρήση επαναληπτικής μεθόδου λόγω διαφοροποίησης της έντασης ρεύματος φορτίου με βάση την τάση του εκάστοτε κόμβου. Επιπλέον απαιτείται η ρύθμιση της τάσης αναχώρησης, προκειμένου να εξασφαλιστούν τα όρια λειτουργίας και τα εύρη διακύμανσης των τάσεων των κόμβων. Επίσης με την αύξηση του βαθμού φόρτισης αυξάνεται η πτώση τάσης και η εκατοστιαία πτώση τάσης του εκάστοτε κόμβου σε σχέση με την τάση του κόμβου αναχώρησης σχεδόν γραμμικά, ενώ οι απώλειες ενεργού και αέργου ισχύος ακολουθούν παραβολική συμπεριφορά ως προς το επίπεδο φόρτισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB

8.1 Ανάπτυξη προγράμματος

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική θεωρία του 5^{ου} κεφαλαίου, καθώς και το αντίστοιχο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 7.1 αναπτύσσεται ο κώδικας σε MATLAB, προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα υπολογισμού της πτώσης πίεσης κατά την ακτινική λειτουργία ενός δικτύου ύδρευσης με γραμμή με πολλές διακλαδώσεις, συγκεντρωμένες παροχές επί των κόμβων (είναι σαν φορτία σταθερής έντασης και όχι σταθερής ισχύος για το ηλεκτρικό δίκτυο). Τα βασικά στάδια της μεθόδου προσομοίωσης περιλαμβάνουν:

- ✓ **1^ο στάδιο:** Δεδομένα εισόδου. Ο χρήστης πρέπει να δώσει πρώτα από όλα τη μορφή του δικτύου υπό τη μορφή της τοπολογικής μήτρας A_diktyo , όπου το στοιχείο $A_diktyo(i, j)$ του i -ιστού κλάδου και του j -ιστού κόμβου είναι "1", αν ο j -ιστός κόμβος τροφοδοτείται με νερό από τον i -ιστό κλάδο, ή "0", αν δεν ισχύει αυτό. Η τοπολογική διαμόρφωση είναι ίδια με την περίπτωση του ηλεκτρικού δικτύου. Ακολούθως υπολογίζονται οι διαστάσεις της μήτρας, οι οποίες πρέπει να ταυτίζονται (τετραγωνική μήτρα) λόγω της ειδικής διαμόρφωσης του δικτύου. Έπειτα δίνεται η παροχή σε κάθε κόμβο σε L/s σχηματίζοντας το διάνυσμα στήλη $Paroxi_kombwn$, η ονομαστική παροχή του δικτύου, η πίεση κόμβου αναχώρησης $Piesi_n$ σε bar, το γεωδαιτικό ύψος κόμβου αναχώρησης $H_geodaitiko_kombou0$ σε m, το γεωδαιτικό ύψος όλων των κόμβων υπό τη μορφή διανύσματος στήλης $H_geodaitiko_kombwn$ σε m. Επιπλέον δίνεται το επιτρεπτό όριο απόκλισης $limit_f$ κατά την επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή τριβής f και το μέγιστο πλήθος επαναλήψεων $Teran$, που θα εξηγηθούν παρακάτω. Από πλευράς διαμόρφωσης δικτύου δίνονται τα μήκη των σωλήνων/κλάδων υπό τη μορφή διανύσματος στήλης L_swlina σε km, οι εσωτερικές διαμέτροι των σωλήνων των κλάδων υπό τη μορφή διανύσματος στήλης D_swlina σε mm και ο συντελεστής προσαύξεσης των γραμμικών απωλειών λόγω ύπαρξης τοπικών απωλειών $a_prosaujisi$.
- ✓ **2^ο στάδιο:** Αρχικοί υπολογισμοί. Αρχικά οι διαστάσεις μηκών, διαμέτρων και τραχύτητας σωλήνων μετατρέπονται σε m, όπως και της παροχής σε m^3/s . Ακολούθως υπολογίζεται η παροχή νερού σε κάθε κλάδο μέσω της:

$$Paroxi_kladwn = A_diktyo \cdot Paroxi_kombwn \quad (8.1)$$

Στη συνέχεια με βάση την εσωτερική διάμετρο και την παροχή του κλάδου/σωλήνα υπολογίζεται η αντίστοιχη ταχύτητα του νερού:

$$V(i) = \frac{4 \cdot Q(i)}{\pi \cdot D(i)^2} \quad (8.2)$$

σχηματίζοντας το αντίστοιχο διάνυσμα ταχυτήτων *Taxytita_kladwn*.

- ✓ **3^ο στάδιο:** Επαναληπτικός υπολογισμός τριβών κλάδου/σωλήνα. Αρχικά τίθεται ότι ο συντελεστής τριβής *f* έχει τιμή 0,01 για το *i*-οστό σωλήνα. Υπολογίζεται ο αντίστοιχος αριθμός Reynolds μέσω της ταχύτητας, της αντίστοιχης εσωτερικής διαμέτρου και του κινηματικού ιξώδους ν του νερού που λαμβάνεται ίσο με $1,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ στους 15°C .

$$Re(i) = \frac{V(i) \cdot D(i)}{\nu} \quad (8.3)$$

Ακολούθως μέσω της σχέσης Colebrook-White προσδιορίζεται η νέα τιμή του συντελεστή τριβής

$$f' = \left(-2 \cdot \log_{10} \cdot \left[\frac{k}{3,7 \cdot D(i)} + \frac{2,51}{Re(i) \cdot \sqrt{f}} \right] \right)^{-2} \quad (8.4)$$

Έπειτα γίνεται ο έλεγχος σύγκλισης της επαναληπτικής διαδικασίας, δηλαδή από τη μία πλευρά συγκρίνεται η νέα τιμή f' (μεταβλητή *f_tribis_new* σε κώδικα) με την παλιά τιμή f και αν η απόλυτη τιμή της διαφοράς είναι μικρότερη του *limit_f* έχει γίνει η σύγκλιση θέτοντας μία σημαία ελέγχου *flag_check* ίση με 1, αλλιώς τίθεται 0. Επιπλέον καταμετρώνται ο αριθμός επαναλήψεων *Trplithos_epanalifewn* που δε θα υπερβεί το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων *Terpan*. Η νέα τιμή του συντελεστή τριβή κάθε σωλήνα f' αποθηκεύεται στη μεταβλητή *f_tribis* που σχηματίζει κατάλληλο διάνυσμα. Μετά την εύρεση του συντελεστή τριβής υπολογίζονται οι γραμμικές υδραυλικές απώλειες του *i*-οστού σωλήνα/κλάδου, οι οποίες δίνονται από τη σχέση:

$$DH_{swlina}(i) = f_{tribis}(i) \cdot \frac{L(i)}{D(i)} \cdot \frac{V(i)^2}{2 \cdot g} \quad (8.5)$$

Όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας ίση με $9,81 \text{ m/s}^2$.

- ✓ **4^ο στάδιο:** Λοιποί υπολογισμοί. Υπολογίζεται η πτώση πίεσης του *j*-οστού κόμβου λόγω υδραυλικών απωλειών σε σχέση με τον κόμβο τροφοδοσίας Ψ ως εξής:

$$DH_{kombwn} = (1 + a_{prosaujisi}) \cdot A^T \cdot DH_{swlina} \quad (8.6)$$

Έχοντας προσανξήσει τις γραμμικές απώλειες λόγω των τοπικών απωλειών μέσω του *a_prosaujisi*. Ακολούθως υπολογίζεται η πίεση του *j*-οστού κόμβου λαμβάνοντας υπόψη και τη μεταβολή γεωδαιτικού ύψους από τον κόμβο τροφοδοσίας Ψ ως εξής:

$$H(j) = H(0) - DH_{kombwn}(j) - (H(j') - H(j)) \quad (8.7)$$

Όπου $H(0)$ η πίεση αναφοράς του κόμβου τροφοδοσίας σε m (ονομαστική πίεση σε bar/0,0981 για να γίνει m).

Τέλος υπολογίζονται οι υδραυλικές απώλειες ισχύος λόγω των απωλειών του ακτινικού δικτύου ύδρευσης και της μεταβολής γεωδαιτικού ύψους για κάθε j-ιοστό κλάδο:

$$P_{apwleiw(n)} = \frac{\rho \cdot g}{1000} \cdot Paroxi_kladwn(j) \cdot (DH_kombwn(j) + H_geodaitiko_kombwn(j) - H_geodaitiko_kombou0) \quad (8.8)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του νερού 1000kg/m^3 , g η επιτάχυνση της βαρύτητας $9,81\text{m/s}^2$ και η διαίρεση με το 1000 γίνεται για να προκύψουν οι απώλειες σε kW, το j' είναι το ένα άκρο (κόμβος) του j-ιοστού σωλήνα/κλάδου και το j είναι το άλλο άκρο (κόμβος)

Τα τελικά αποτελέσματα καταγράφονται στη μήτρα *ejodos*, η οποία περιέχει τα εξής:

1^η στήλη: Παροχή κλάδου σε m^3/s .

2^η στήλη: Γραμμικές υδραυλικές απώλειες κλάδου σε m.

3^η στήλη: Υδραυλικές απώλειες (γραμμικές + τοπικές) κόμβου σε σχέση με τον κόμβο αναφοράς '0' σε m. (Χωρίς την επίδραση της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ των κόμβων)

4^η στήλη: Εκατοστιαία πτώση πίεσης λόγω υδραυλικών απωλειών κόμβου σε σχέση με τον κόμβο αναφοράς '0' ως προς την ονομαστική πίεση του δικτύου:

$$DH_kombwn_Percentage = DH_kombwn \cdot 100 / (Piesi_n / 0,0981) \quad (8.9)$$

5^η στήλη: Μανομετρικό ύψος/ Πιεζομετρική γραμμή κόμβου σε σχέση με τον κόμβο αναφοράς '0' σε m.

6^η στήλη: Ισχύς απωλειών σωλήνα/κλάδου λόγω υδραυλικών απωλειών και υψομετρικής διαφοράς μεταξύ ορίων σωλήνα σε kW.

7^η στήλη: Ταχύτητα νερού κλάδου σε m/s.

8^η στήλη: Συντελεστής τριβής κλάδου

Ακολούθως παρατίθεται ο αντίστοιχος κώδικας στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB

```
clear; % katharismos 'workspace'
clc; % katharismos 'command window'
% ANAGNWSH DEDOMENWN
% morfi diktyou
% kombos 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 kladoi
A_diktyo=[ 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1; % 1
           0 1 1 1 0 1 1 1 1 1; % 2
           0 0 1 1 0 0 0 0 1 1; % 3
           0 0 0 1 0 0 0 0 0 0; % 4
           0 0 0 0 1 0 0 0 0 0; % 5
           0 0 0 0 0 1 1 1 0 0; % 6
           0 0 0 0 0 0 1 0 0 0; % 7
           0 0 0 0 0 0 0 1 0 0; % 8
           0 0 0 0 0 0 0 0 1 1; % 9
```

```

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1]; % 10
plithos_kombwn=length(A_diktyo(:,1));
plithos_kladwn=length(A_diktyo(1,:));
% PAROXH se kombous / L/s      komboi
Paroxi_kombwn=0.1*[0.0;      % 1
0.0;      % 2
0.0;      % 3
4.16667;  % 4
12.5;     % 5
0.0;      % 6
8.33333;  % 7
8.33333;  % 8
4.16667;  % 9
4.16667]; % 10
% Onomastiki piesi diktyou anaxwrisis
Piesi_n= 20.0; % bar
% Gewdaitiko yfos se kombous [m]      komboi
H_geodaitiko_kombou0=100.0; % 0
H_geodaitiko_kombwn=[ 100.0; % 1
100.0; % 2
100.0; % 3
100.0; % 4
140.0; % 5
60.0;  % 6
20.0;  % 7
20.0;  % 8
140.0; % 9
180.0]; % 10
% akribeia epanalifwn
limit_f=10^(-6); % [-]
Tepan_limit=20;
% mikos [km]/      kladoi
L_swlina=[ 10.0; % 1
10.0; % 2
10.0; % 3
10.0; % 4
5.0;  % 5
5.0;  % 6
5.0;  % 7
5.0;  % 8
5.0;  % 9
5.0]; % 10
% Diametros [mm] ejwteriki diametros-2*toixwma
%      kladoi
D_swlina=[ 355-2*65; % 1
355-2*65; % 2
355-2*65; % 3
355-2*65; % 4
200-2*36.7; % 5
200-2*36.7; % 6
200-2*36.7; % 7
200-2*36.7; % 8

```

```

                200-2*36.7;    %    9
                200-2*36.7]; %    10
% traxitita
k_swlna=0.1; % [mm]
% prosaujisi logw topikwn apwleiwn
a_prosaujisi= 0.10; % [-]
% arxikoi ypologismoι
L_swlna=L_swlna*1000;    % metatropi se [m]
D_swlna=D_swlna/1000;    % metatropi se [m]
k_swlna=k_swlna/1000; % metatropi se [m]
% ypologismos Paroxwn kladwn
Paroxi_kladwn=0.001*A_diktyo*Paroxi_kombwn;    % metatropi se m3/s
ejodos(:,1)=Paroxi_kladwn;    % 1h stili kataxwrisi gia pinaka ejodou metro
reumatos
for i_metritis_kladwn= 1:plithos_kladwn

Taxytita_kladwn(i_metritis_kladwn)=4.0*Paroxi_kladwn(i_metritis_kladwn)/(pi()*D
_swlna(i_metritis_kladwn)^2);
end;
ejodos(:,7)=Taxytita_kladwn';
for i_metritis_kladwn= 1:plithos_kladwn
    Tplithos_epanalifewn=1;
    flag_check=0;
    f_tribis(i_metritis_kladwn)=0.01;

Reynolds=Taxytita_kladwn(i_metritis_kladwn)*D_swlna(i_metritis_kladwn)/(1.14*1
0^(-6)); % kinimatiko ijwdes se 15oC
% ypologismos f
    while (flag_check==0&(Tplithos_epanalifewn<=Tepan_limit))
        f_tribis_new=(-
2.0*log10(k_swlna/(3.71*D_swlna(i_metritis_kladwn))+2.51/(Reynolds*(f_tribis(
i_metritis_kladwn)^0.5))))^-2;
        if (abs(f_tribis_new-f_tribis(i_metritis_kladwn))>limit_f)
            flag_check=0;
        else
            flag_check=1;
        end;
        f_tribis(i_metritis_kladwn)=f_tribis_new;
        Tplithos_epanalifewn=Tplithos_epanalifewn+1;
    end;

DH_swlna(i_metritis_kladwn)=f_tribis(i_metritis_kladwn)*L_swlna(i_metritis_kl
adwn)/D_swlna(i_metritis_kladwn)*0.5*(Taxytita_kladwn(i_metritis_kladwn)^2)/9.
81;
end;
ejodos(:,2)=DH_swlna'; % 2h stili kataxwrisi gia pinaka ejodou ptwsi piesis
kladwn
ejodos(:,8)=f_tribis'; % 8h stili kataxwrisi gia pinaka ejodou sintelesti
tribis
%ypologismos ptwsiw piesis apo arxi grammis (kombo 0)
DH_kombwn=(1.0+a_prosaujisi)*A_diktyo'*DH_swlna';

```

```

ejodos(:,3)=DH_kombwn; % 3h stili kataxwrisi gia pinaka ejodou ptwsi piesis
kombwn
% ypologismos ekatostiaia ptwsi piesis
DH_kombwn_Percentage=DH_kombwn/(Piesi_n/0.0981)*100.0; % Piesi_n -> metatropi
se m
ejodos(:,4)=DH_kombwn_Percentage; % 4h stili kataxwrisi gia pinaka ejodou
ekatostiaia ptwsi piesis kombwn
%ypologismos piesis se kombous me piesi anaforas se kombo 0
for i_metritis_kombwn= 1:plithos_kombwn
    H_kombwn(i_metritis_kombwn)=Piesi_n/0.0981-DH_kombwn(i_metritis_kombwn)-
(H_geodaitiko_kombwn(i_metritis_kombwn)-H_geodaitiko_kombou0);
end;
ejodos(:,5)=H_kombwn'; %5h stili ptwsi piesis se m
% ypologismos apwleiwn
% los klados
P_apwleiwn(1)=0.001*1000*9.81*Paroxi_kladwn(1)*(Piesi_n/0.0981+H_geodaitiko_kom
bou0-H_kombwn(1));
for i_metritis_kladwn= 2:plithos_kladwn
    i_metritis_kombwn=i_metritis_kladwn; % to ena akro swlina
% gia to allo akro swlina
    i_metritis_kladwn2=i_metritis_kladwn-1;
    flag_find=0;
    i_metritis_kombwn_akro=0;
    while ((flag_find==0)&(i_metritis_kladwn2>=1))
        if (A_diktyo(i_metritis_kladwn2,i_metritis_kombwn)==1)
            flag_find=1;
            i_metritis_kombwn_akro=i_metritis_kladwn2;
        else
            i_metritis_kladwn2=i_metritis_kladwn2-1;
        end;
    end;
end;
P_apwleiwn(i_metritis_kladwn)=0.001*1000*9.81*Paroxi_kladwn(i_metritis_kladwn)*
(H_kombwn(i_metritis_kombwn_akro)-H_kombwn(i_metritis_kombwn));
end;
ejodos(:,6)=P_apwleiwn'; %6h stili apwleies se kW

```

Από τα σχετικά αποτελέσματα εύκολα υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες ισχύος για το εκάστοτε επίπεδο ζήτησης, ενώ από την εξέταση διαφόρων επιπέδων ζήτησης νερού ελέγχονται τα όρια πίεσης λειτουργίας, ειδικά στους κόμβους ζήτησης φορτίου, π.χ. δεν πρέπει η πίεση να ξεπερνά τα 8bar ή διαφορετικά 81,5m και δεν πρέπει να πέφτει κάτω της τιμής του αθροίσματος του 1bar λειτουργίας και 4,5m για διώροφη οικοδομή, 7,5m για τριώροφη οικοδομή κ.τ.λ. Για λόγους πυρόσβεσης δε θα έπρεπε να πέφτει κάτω από 44,85m (πρακτικά 45m) στήλης ύδατος (για να επιτυγχάνεται 4,4bar πίεση τουλάχιστον), αλλιώς χρειάζεται πρόσθετη δεξαμενή και πυροσβεστικό πιεστικό συγκρότημα.

8.2 Δεδομένα εκτέλεσης προγράμματος βασικού σεναρίου

Δίνεται το δίκτυο ύδρευσης του σχήματος 7.1 (ακολουθεί την ίδια δομή με το αντίστοιχο ηλεκτρικό δίκτυο μέσης τάσης), όπου πέραν του κόμβου αναχώρησης Υ διαθέτει 10 κόμβους, εκ των οποίων στους κόμβους Υ , Σ , Γ , Δ , Θ , Λ υπάρχει κατανάλωση νερού. Συγκεκριμένα λαμβάνοντας υπόψη ότι είναι μία παραθαλάσσια αραιοκατοικημένη περιοχή κατοίκων κατά μήκος μιας ακτής, όπου ενδεικτικά 200 σπίτια με παροχή των 25kVA για τετραμελή οικογένεια απαιτούν 500kVA λόγω συντελεστή ταυτοχρονισμού (συνολικά της τάξης του 10%), ομοίως από το [9] υπολογίζεται ότι κάθε κάτοικος έχει μία μέση κατανάλωση 150 l/ημέρα και με πολλαπλασιαστικό συντελεστή λ_1 ίσο με 1,5 για τη μέγιστη ημερήσια παροχή και πολλαπλασιαστικό συντελεστή λ_2 ίσο με 2,0 για τη μέγιστη ωριαία παροχή προσδιορίζεται ότι η παροχή σχεδιασμού για τα 200 σπίτια ή τους 800 κατοίκους είναι ίση με $800 \cdot 1,5 \cdot 2,0 \cdot 150$ l/ημέρα = 4,1667 l/s. Αντίστοιχα για τις καταναλώσεις ισχύος προσδιορίζεται ότι οι κόμβοι Υ , Θ , Λ έχουν μέγιστη ωριαία ζήτηση νερού/παροχή σχεδιασμού ίση με 4,1667 l/s, οι κόμβοι Γ , Δ 8,3333 l/s και ο κόμβος Σ 12,5 l/s. Η ονομαστική πίεση του δικτύου P_{iesi_n} είναι 20bar (αρκετά υψηλή), προκειμένου να μη γίνει ενδιάμεση χρήση αντλιών. Επιλέγεται σωλήνας πολυαιθυλενίου HDPE 3^{ns} γενιάς PE 100/SDR6 των 32bar, όπου για τους σωλήνες κορμού (κλάδοι Υ , Σ , Γ , Δ) η εξωτερική/ονομαστική διάμετρος είναι $\Phi 355$ με πάχος τοιχώματος 65mm, για τους σωλήνες διακλαδώσεων (κλάδοι Σ , Γ , Δ , Θ και Λ) η εξωτερική/ονομαστική διάμετρος είναι $\Phi 200$ με πάχος τοιχώματος 36,7mm. Οι διάμετροι είναι αρκετά μεγάλοι λόγω της μη χρήσης αντλίας και των δεκάδων χιλιομέτρων και των σωλήνων. Σημειώνεται ότι σε πρακτική εφαρμογή δε θα ήταν η πιο ορθή οικονομικά λύση. Η τραχύτητα των σωλήνων είναι 0,1mm. Τα αντίστοιχα μήκη των σωλήνων/κλάδων Υ , Σ , Γ , Δ είναι 10 km, και των υπολοίπων 5 km, όπως και των γραμμών μέσης τάσης του δικτύου διανομής του σχήματος 7.1. Τα γεωδαιτικά ύψη των κόμβων των σωλήνων είναι 100m για τους κόμβους Υ , Σ , Γ , Δ , 140m για τους κόμβους Σ και Θ , 180m για τον κόμβο Λ , 60m για τον κόμβο Γ , 20m για τους κόμβους Γ και Δ . Με βάση το σχήμα 7.1 διαμορφώνεται η ίδια τοπολογική μήτρα A_{diktou} που είχε σχηματιστεί στην παράγραφο 7.2. Ως προς το μέγιστο πλήθος επαναλήψεων T_{epan_limit} τίθεται ίσο με 200 και ως προς το όριο απόκλισης του συντελεστή τριβής μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων $limit_f$ ίσο με 10^{-6} , ο συντελεστής προσαύξησης $a_{prosauijisis}$ των γραμμικών υδραυλικών απωλειών, ώστε να συμπεριλαμβάνουν και τις τοπικές υδραυλικές, ανέρχεται σε 0,10 (δηλαδή 10%).

8.3 Αποτελέσματα εκτέλεσης προγράμματος βασικού σεναρίου

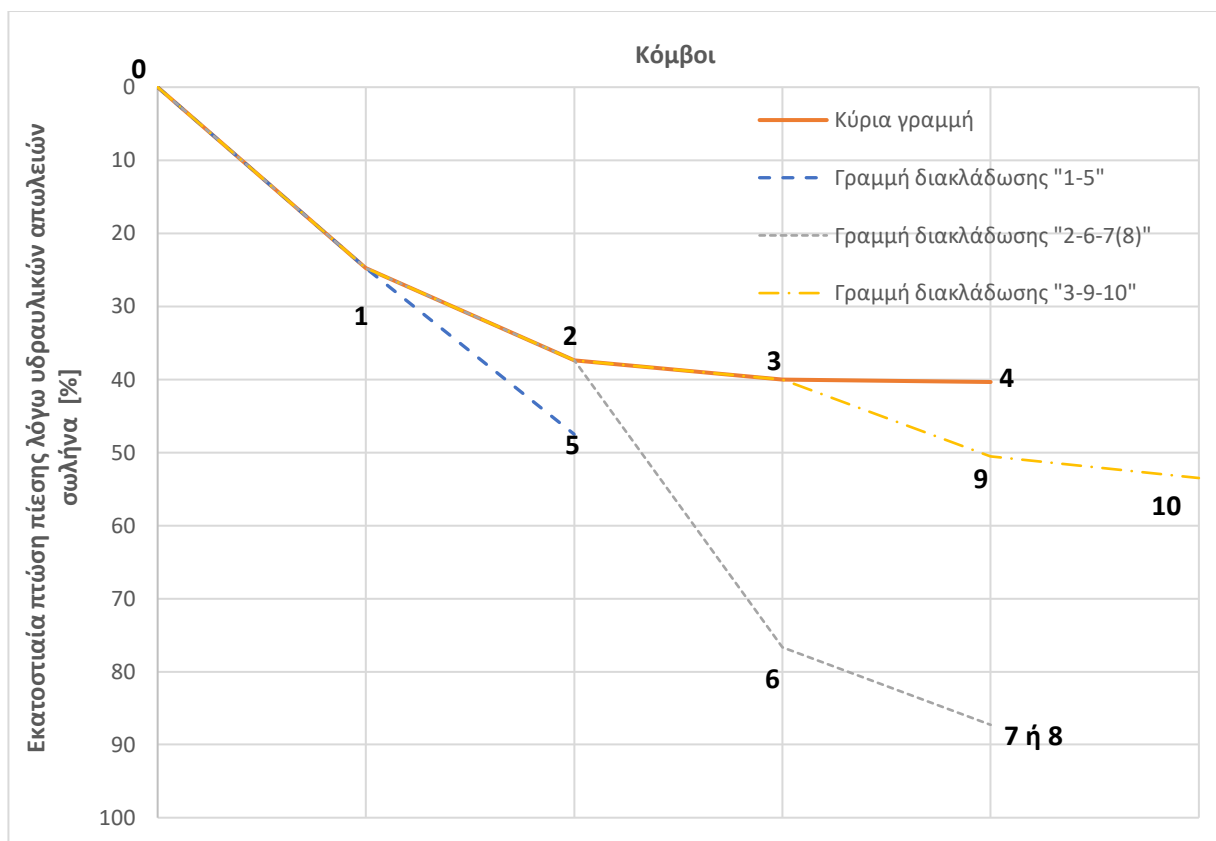
Από την εκτέλεση του προγράμματος βασικού σεναρίου προκύπτουν τα σχετικά αποτελέσματα ως προς την παροχή νερού σωλήνα/κλάδου, την πτώση πίεσης σωλήνα/κλάδου λόγω των γραμμικών υδραυλικών απωλειών, τη συνολική πτώση πίεσης του κάθε κόμβου ως προς τον κόμβο τροφοδοσίας Υ λόγω των συνολικών υδραυλικών απωλειών (γραμμικών και τοπικών), την εκάστοτε ποσοστιαία συνολική πτώση πίεσης του κάθε κόμβου ως προς τον κόμβο τροφοδοσίας Υ λόγω των συνολικών υδραυλικών απωλειών με πίεση αναφοράς την ονομαστική πίεση του δικτύου, την πίεση του κάθε κόμβου συμπεριλαμβάνοντας και την υψομετρική διαφορά αυτού του κόμβου και του κόμβου τροφοδοσίας Υ , την ισχύ απωλειών του εκάστοτε σωλήνα λαμβάνοντας υπόψη τις συνολικές

υδραυλικές απώλειες και την υψομετρική διαφορά στα άκρα του σωλήνα, την ταχύτητα νερού του εκάστοτε σωλήνα και τον αντίστοιχο συντελεστή τριβής του εκάστοτε σωλήνα. Ο τελευταίος υπολογίζεται επαναληπτικά για κάθε σωλήνα απαιτώντας 3-6 επαναλήψεις πρακτικά, προκειμένου να επιτευχθεί η ζητούμενη ακρίβεια του 10^{-6} (πρακτικά ακρίβεια $5^{ου}$ σημαντικού ψηφίου).

Πίνακας 8.1 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου ύδρευσης σχήματος (7.1) για πλήρη ζήτηση νερού 100%.

Κόμβος / κλάδος	Παροχή νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Πτώση πίεσης σωλήνα (m)	Πτώση πίεσης κόμβου ως προς "0" (m)	Εκατοστιαία πτώση πίεσης (%)	Πίεση κόμβου (m)	Ισχύς απωλειών (kW) σε κλάδο	Ταχύτητα νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Συντελεστής τριβής (-) σε κλάδο
1	0,041667	45,932	50,525	24,783	153,348	61,527	1,0479	0,01846421
2	0,029167	23,373	76,235	37,393	127,638	7,356	0,7336	0,01917447
3	0,012500	4,833	81,551	40,001	122,323	0,652	0,3144	0,02158493
4	0,004167	0,663	82,280	40,358	121,594	0,030	0,1048	0,02663318
5	0,012500	42,111	96,847	47,504	67,026	10,585	0,9930	0,02121540
6	0,016667	72,876	156,399	76,714	87,475	6,567	1,3240	0,02065220
7	0,008333	19,598	177,957	87,288	105,916	-1,508	0,6620	0,02221557
8	0,008333	19,598	177,957	87,288	105,916	-1,508	0,6620	0,02221557
9	0,008333	19,598	103,109	50,575	60,764	5,032	0,6620	0,02221557
10	0,004167	5,424	109,076	53,502	14,798	1,879	0,3310	0,02459484
ΣΥΝΟΛΟ						90,613		

Η πίεση τροφοδοσίας του κόμβου τροφοδοσίας Ξ ανέρχεται σε 20bar ή 203,87m, όλοι οι κλάδοι έχουν πίεση από 153,348 m (κόμβος Ξ) ως 14,798 m (κόμβος Ι0), αν και η πίεση σε κόμβους φορτίων (4, 5, 7, 8, 9 και Ι0) περιορίζεται από 121,59m ως 14,798m. Συνεπώς στον κόμβο Ι0 μπορεί να τροφοδοτηθεί ως διώροφη, ενώ ο επόμενος κόμβος με τη χαμηλότερη πίεση φτάνει τα 60,76 m, που υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις πυρόσβεσης και για 5-όροφη οικοδομή. Αντίστοιχα οι κόμβοι 4, 7 και 8 έχουν πίεση μεγαλύτερη από 105,9m οπότε χρειάζεται ρυθμιστής πίεσης, ώστε να περιοριστεί η πίεση κάτω από 8bar (81,55m). Το διάγραμμα εκατοστιαίας πτώσης πίεσης λόγω υδραυλικών απωλειών σωλήνα ως προς τον κόμβο τροφοδοσίας Ξ φαίνεται στο διάγραμμα 8.1



Σχήμα 8.1: Διάγραμμα εκατοστιαίας πτώσης πίεσης λόγω υδραυλικών απωλειών σωλήνα ως προς τον κόμβο τροφοδοσίας Ύ ακτινικού δικτύου ύδρευσης για το σενάριο πλήρους ζήτησης ύδατος.

Από πλευράς υπολογιστικής διαδικασίας η επαναληπτική μέθοδος προσδιορισμού του συντελεστή τριβής συγκλίνει άμεσα και η ακρίβεια των υπολογισμών είναι ικανοποιητική. Σε περίπτωση αναλυτικής γνώσης των τοπικών εξαρτημάτων (διακλαδώσεων, βανών κ.τ.λ.) είναι πολύ εύκολος ο υπολογισμός και η αντικατάσταση του συντελεστή προσαύξησης 10%. Επιπλέον θεωρητικά για την αντίστοιχη υδραυλική ισχύ απαιτούνται 90,6kW (με χρήση στροβίλων), 94kW (αν αφαιρεθούν οι αρνητικές τιμές λόγω μη χρήσης στροβίλων), το οποίο σημαίνει πρακτικά γύρω στα 134kW ηλεκτρικά (για τυπική απόδοση ηλεκτροκινητήρα 70%).

8.4 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τα διαφορετικά επίπεδα ζήτησης νερού

Στη συνέχεια επαναλήφθηκε η εφαρμογή του προγράμματος για διαφορετικά επίπεδα συνολικής ζήτησης νερού, δηλαδή περιορίζεται αναλογικά στο 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% και 90% αντί του 100% της αρχικής ζήτησης νερού των παραγράφων 8.2 και 8.3. Τα άλλα στοιχεία, όπως η πίεση του κόμβου τροφοδοσίας Ύ παραμένει 20 bar (ή 203,87m). Ακολούθως καταγράφονται οι αντίστοιχοι πίνακες προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου ύδρευσης.

Πίνακας 8.2 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου ύδρευσης σχήματος (7.1) για ζήτηση νερού ίση με 90% της ζήτησης αιχμής.

Κόμβος / κλάδος	Παροχή νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Πτώση πίεσης σωλήνα (m)	Πτώση πίεσης κόμβου ως προς "0" (m)	Εκατοστιαία πτώση πίεσης (%)	Πίεση κόμβου (m)	Ισχύς απωλειών (kW) σε κλάδο	Ταχύτητα νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Συντελεστής τριβής (-) σε κλάδο
1	0,037500	37,595	41,354	20,284	162,520	52,001	0,9431	0,01865753
2	0,026250	19,170	62,441	30,627	141,432	5,430	0,6602	0,01941598
3	0,011250	3,984	66,823	32,777	137,050	0,484	0,2829	0,02196612
4	0,003750	0,549	67,427	33,073	136,446	0,022	0,0943	0,02725761
5	0,011250	34,488	79,291	38,892	84,582	8,601	0,8937	0,02145078
6	0,015000	59,582	127,982	62,775	115,892	3,758	1,1916	0,02084554
7	0,007500	16,092	145,683	71,457	138,191	-1,641	0,5958	0,02251948
8	0,007500	16,092	145,683	71,457	138,191	-1,641	0,5958	0,02251948
9	0,007500	16,092	84,524	41,459	79,349	4,245	0,5958	0,02251947
10	0,003750	4,473	89,445	43,873	34,429	1,653	0,2979	0,02504126
ΣΥΝΟΛΟ						72,913		

Πίνακας 8.3 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου ύδρευσης σχήματος (7.1) για ζήτηση νερού ίση με 80% της ζήτησης αιχμής.

Κόμβος / κλάδος	Παροχή νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Πτώση πίεσης σωλήνα (m)	Πτώση πίεσης κόμβου ως προς "0" (m)	Εκατοστιαία πτώση πίεσης (%)	Πίεση κόμβου (m)	Ισχύς απωλειών (kW) σε κλάδο	Ταχύτητα νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Συντελεστής τριβής (-) σε κλάδο
1	0,033333	30,074	33,081	16,226	170,792	43,518	0,8383	0,01888973
2	0,023333	15,372	49,990	24,520	153,883	3,870	0,5868	0,01970427
3	0,010000	3,212	53,523	26,253	150,350	0,347	0,2515	0,02241587
4	0,003333	0,446	54,014	26,494	149,860	0,016	0,0838	0,02798950
5	0,010000	27,609	63,452	31,123	100,422	6,903	0,7944	0,02173379
6	0,013333	47,605	102,356	50,206	141,518	1,617	1,0592	0,02107919
7	0,006667	12,919	116,567	57,176	167,306	-1,687	0,5296	0,02288243
8	0,006667	12,919	116,567	57,176	167,306	-1,687	0,5296	0,02288243
9	0,006667	12,919	67,735	33,224	96,139	3,545	0,5296	0,02288243
10	0,003333	3,609	71,705	35,171	52,169	1,438	0,2648	0,02556951
ΣΥΝΟΛΟ						57,882		

Πίνακας 8.4 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου ύδρευσης σχήματος (7.1) για ζήτηση νερού ίση με 70% της ζήτησης αιχμής.

Κόμβος / κλάδος	Παροχή νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Πτώση πίεσης σωλήνα (m)	Πτώση πίεσης κόμβου ως προς "0" (m)	Εκατοστιαία πτώση πίεσης (%)	Πίεση κόμβου (m)	Ισχύς απωλειών (kW) σε κλάδο	Ταχύτητα νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Συντελεστής τριβής (-) σε κλάδο
1	0,029167	23,373	25,710	12,611	178,164	35,969	0,7336	0,01917447
2	0,020417	11,979	38,886	19,074	164,987	2,639	0,5135	0,02005542
3	0,008750	2,518	41,657	20,433	162,217	0,238	0,2201	0,02295698
4	0,002917	0,352	42,044	20,622	161,830	0,011	0,0734	0,02886408
5	0,008750	21,476	49,334	24,198	114,540	5,461	0,6951	0,02208127
6	0,011667	36,946	79,528	39,008	164,346	0,073	0,9268	0,02136768
7	0,005833	10,083	90,618	44,448	193,255	-1,654	0,4634	0,02332481
8	0,005833	10,083	90,618	44,448	193,255	-1,654	0,4634	0,02332481
9	0,005833	10,083	52,748	25,873	111,126	2,924	0,4634	0,02332480
10	0,002917	2,832	55,863	27,401	68,011	1,234	0,2317	0,02620711
					ΣΥΝΟΛΟ	45,240		

Πίνακας 8.5 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου ύδρευσης σχήματος (7.1) για ζήτηση νερού ίση με 60% της ζήτησης αιχμής.

Κόμβος / κλάδος	Παροχή νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Πτώση πίεσης σωλήνα (m)	Πτώση πίεσης κόμβου ως προς "0" (m)	Εκατοστιαία πτώση πίεσης (%)	Πίεση κόμβου (m)	Ισχύς απωλειών (kW) σε κλάδο	Ταχύτητα νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Συντελεστής τριβής (-) σε κλάδο
1	0,025000	17,493	19,242	9,438	184,632	29,244	0,6288	0,0195330
2	0,017500	8,993	29,135	14,291	174,739	1,698	0,4401	0,0204943
3	0,007500	1,904	31,229	15,318	172,644	0,154	0,1886	0,0236246
4	0,002500	0,268	31,524	15,463	172,350	0,007	0,0629	0,0299364
5	0,007500	16,092	36,943	18,121	126,931	4,245	0,5958	0,0225195
6	0,010000	27,609	59,505	29,187	184,369	-0,945	0,7944	0,0217338
7	0,005000	7,583	67,847	33,279	216,027	-1,553	0,3972	0,0238781
8	0,005000	7,583	67,847	33,279	216,027	-1,553	0,3972	0,0238781
9	0,005000	7,583	39,571	19,410	124,303	2,371	0,3972	0,0238781
10	0,002500	2,143	41,929	20,566	81,945	1,039	0,1986	0,0269966
					ΣΥΝΟΛΟ	34,709		

Πίνακας 8.6 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου ύδρευσης σχήματος (7.1) για ζήτηση νερού ίση με 50% της ζήτησης αιχμής.

Κόμβος / κλάδος	Παροχή νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Πτώση πίεσης σωλήνα (m)	Πτώση πίεσης κόμβου ως προς "0" (m)	Εκατοστιαία πτώση πίεσης (%)	Πίεση κόμβου (m)	Ισχύς απωλειών (kW) σε κλάδο	Ταχύτητα νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Συντελεστής τριβής (-) σε κλάδο
1	0,020833	12,439	13,682	6,711	190,191	23,234	0,5240	0,0200006
2	0,014583	6,418	20,743	10,174	183,131	1,010	0,3668	0,0210620
3	0,006250	1,370	22,250	10,913	181,624	0,092	0,1572	0,0244765
4	0,002083	0,195	22,464	11,018	181,410	0,004	0,0524	0,0312970
5	0,006250	11,459	26,287	12,894	137,586	3,225	0,4965	0,0230921
6	0,008333	19,598	42,301	20,748	201,573	-1,508	0,6620	0,0222156
7	0,004167	5,424	48,267	23,675	235,606	-1,391	0,3310	0,0245948
8	0,004167	5,424	48,267	23,675	235,606	-1,391	0,3310	0,0245948
9	0,004167	5,424	28,216	13,840	135,657	1,879	0,3310	0,0245948
10	0,002083	1,544	29,915	14,673	93,959	0,852	0,1655	0,0280084
					ΣΥΝΟΛΟ	26,007		

Πίνακας 8.7 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου ύδρευσης σχήματος (7.1) για ζήτηση νερού ίση με 40% της ζήτησης αιχμής.

Κόμβος / κλάδος	Παροχή νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Πτώση πίεσης σωλήνα (m)	Πτώση πίεσης κόμβου ως προς "0" (m)	Εκατοστιαία πτώση πίεσης (%)	Πίεση κόμβου (m)	Ισχύς απωλειών (kW) σε κλάδο	Ταχύτητα νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Συντελεστής τριβής (-) σε κλάδο
1	0,016667	8,216	9,037	4,433	194,837	17,828	0,4192	0,0206409
2	0,011667	4,258	13,721	6,730	190,153	0,536	0,2934	0,0218323
3	0,005000	0,918	14,730	7,225	189,143	0,050	0,1258	0,0256166
4	0,001667	0,132	14,875	7,296	188,998	0,002	0,0419	0,0331098
5	0,005000	7,583	17,379	8,524	146,495	2,371	0,3972	0,0238781
6	0,006667	12,919	27,932	13,701	215,941	-1,687	0,5296	0,0228824
7	0,003333	3,609	31,902	15,648	251,971	-1,178	0,2648	0,0255695
8	0,003333	3,609	31,902	15,648	251,971	-1,178	0,2648	0,0255695
9	0,003333	3,609	18,700	9,172	145,173	1,438	0,2648	0,0255695
10	0,001667	1,036	19,840	9,732	104,033	0,673	0,1324	0,0293696
					ΣΥΝΟΛΟ	18,854		

Πίνακας 8.8 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου ύδρευσης σχήματος (7.1) για ζήτηση νερού ίση με 30% της ζήτησης αιχμής.

Κόμβος / κλάδος	Παροχή νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Πτώση πίεσης σωλήνα (m)	Πτώση πίεσης κόμβου ως προς "0" (m)	Εκατοστιαία πτώση πίεσης (%)	Πίεση κόμβου (m)	Ισχύς απωλειών (kW) σε κλάδο	Ταχύτητα νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Συντελεστής τριβής (-) σε κλάδο
1	0,012500	4,833	5,316	2,607	198,558	12,914	0,3144	0,0215849
2	0,008750	2,518	8,086	3,966	195,787	0,238	0,2201	0,0229570
3	0,003750	0,549	8,690	4,263	195,183	0,022	0,0943	0,0272576
4	0,001250	0,080	8,778	4,306	195,095	0,001	0,0314	0,0357125
5	0,003750	4,473	10,237	5,021	153,637	1,653	0,2979	0,0250413
6	0,005000	7,583	16,428	8,058	227,446	-1,553	0,3972	0,0238781
7	0,002500	2,143	18,786	9,214	265,088	-0,923	0,1986	0,0269967
8	0,002500	2,143	18,786	9,214	265,088	-0,923	0,1986	0,0269967
9	0,002500	2,143	11,048	5,419	152,825	1,039	0,1986	0,0269966
10	0,001250	0,622	11,732	5,755	112,141	0,499	0,0993	0,0313411
					ΣΥΝΟΛΟ	12,967		

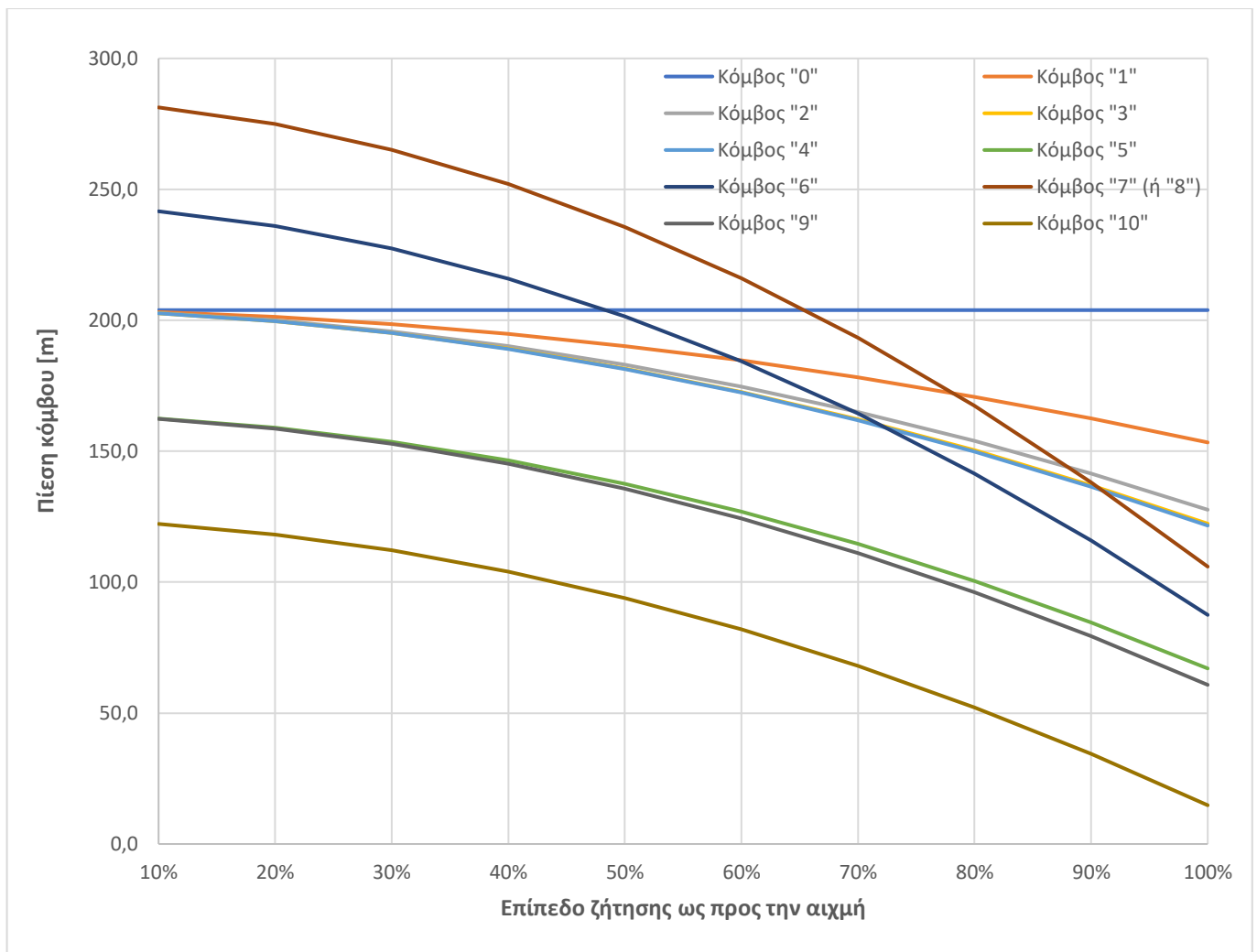
Πίνακας 8.9 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου ύδρευσης σχήματος (7.1) για ζήτηση νερού ίση με 20% της ζήτησης αιχμής.

Κόμβος / κλάδος	Παροχή νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Πτώση πίεσης σωλήνα (m)	Πτώση πίεσης κόμβου ως προς "0" (m)	Εκατοστιαία πτώση πίεσης (%)	Πίεση κόμβου (m)	Ισχύς απωλειών (kW) σε κλάδο	Ταχύτητα νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Συντελεστής τριβής (-) σε κλάδο
1	0,008333	2,305	2,535	1,244	201,338	8,382	0,209587	0,0231632
2	0,005833	1,210	3,866	1,896	200,007	0,076	0,146711	0,0248172
3	0,002500	0,268	4,161	2,041	199,712	0,007	0,062876	0,0299364
4	0,000833	0,040	4,205	2,063	199,669	0,000	0,020959	0,0399676
5	0,002500	2,143	4,893	2,400	158,980	1,039	0,198602	0,0269967
6	0,003333	3,609	7,836	3,844	236,037	-1,178	0,264802	0,0255695
7	0,001667	1,036	8,976	4,403	274,897	-0,635	0,132401	0,0293696
8	0,001667	1,036	8,976	4,403	274,897	-0,635	0,132401	0,0293696
9	0,001667	1,036	5,301	2,600	158,572	0,673	0,132401	0,0293696
10	0,000833	0,305	5,637	2,765	118,237	0,330	0,066201	0,0345871
					ΣΥΝΟΛΟ	8,058		

Πίνακας 8.10 Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοίωσης προγράμματος ακτινικού δικτύου ύδρευσης σχήματος (7.1) για ζήτηση νερού ίση με 10% της ζήτησης αιχμής.

Κόμβος / κλάδος	Παροχή νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Πτώση πίεσης σωλήνα (m)	Πτώση πίεσης κόμβου ως προς "0" (m)	Εκατοστιαία πτώση πίεσης (%)	Πίεση κόμβου (m)	Ισχύς απωλειών (kW) σε κλάδο	Ταχύτητα νερού (m ³ /s) σε κλάδο	Συντελεστής τριβής (-) σε κλάδο
1	0,004167	0,663	0,729	0,357	203,145	4,117	0,1048	0,0266332
2	0,002917	0,352	1,116	0,547	202,758	0,011	0,0734	0,0288641
3	0,001250	0,080	1,204	0,590	202,670	0,001	0,0314	0,0357125
4	0,000417	0,012	1,217	0,597	202,656	0,000	0,0105	0,0492609
5	0,001250	0,622	1,413	0,693	162,461	0,499	0,0993	0,0313411
6	0,001667	1,036	2,256	1,106	241,618	-0,635	0,1324	0,0293696
7	0,000833	0,305	2,591	1,271	281,282	-0,324	0,0662	0,0345871
8	0,000833	0,305	2,591	1,271	281,282	-0,324	0,0662	0,0345871
9	0,000833	0,305	1,539	0,755	162,334	0,330	0,0662	0,0345871
10	0,000417	0,092	1,641	0,805	122,233	0,164	0,0331	0,0416872
ΣΥΝΟΛΟ						3,838		

Από τα σχετικά αποτελέσματα πραγματοποιούνται η γραφική παράσταση της τελικής πίεσης κόμβου Ύ ως ΐΘ ως προς το επίπεδο ζήτησης νερού επί της αιχμής ζήτησης στο σχήμα (8.2). Από το σχήμα αυτό παρατηρείται η σημαντική μη γραμμική μείωση της πίεσης νερού στον εκάστοτε κόμβο όσο αυξάνεται η ζήτηση του νερού. Επίσης οι κόμβοι Ξ, Ψ, Θ, παρουσιάζουν ως ένα επίπεδο ζήτησης 30%, 65%, 65% αντίστοιχα μεγαλύτερη πίεση από τον κόμβο τροφοδοσίας Ύ, επειδή βρίσκονται σε χαμηλότερα υψόμετρα από τον κόμβο Ύ. Αντίθετα οι κόμβοι Σ, Υ, ΐΘ (και ειδικά ο ΐΘ) παρουσιάζουν μειωμένη πίεση λόγω του γεγονότος ότι βρίσκονται υψηλότερα από τον κόμβο Ύ.



Σχήμα 8.2: Πίεση κόμβων Ψ, Υ ως και Ξ σε συνάρτηση με το επίπεδο ζήτησης νερού ως προς την αιχμή (βασικό σενάριο).

Στον Πίνακα (8.11) καταγράφονται συνοπτικά τα όρια διακύμανσης των πιέσεων των κόμβων, το αντίστοιχο εύρος και το εκατοστιαίο ποσοστό διακύμανσης της πίεσης ως προς την ονομαστική πίεση από τα οποία φαίνεται μία σημαντική διακύμανση της πίεσης. Αυτό συμβαίνει, διότι οι υδραυλικές απώλειες επί των σωλήνων για τις αντίστοιχες χιλιομετρικές αποστάσεις είναι σημαντικά μεγάλες (παρά τη μεγάλη διατομή σωλήνων που έχει χρησιμοποιηθεί), καθώς η πίεση του κόμβου τροφοδοσίας Ψ είναι σταθερή (ακόμη και προσαύξηση της τάξεως του 10% δε θα μειώσει σημαντικά τη διακύμανση που σε ορισμένους κόμβους φτάνει στο 86% (κόμβοι 7 και 8)).

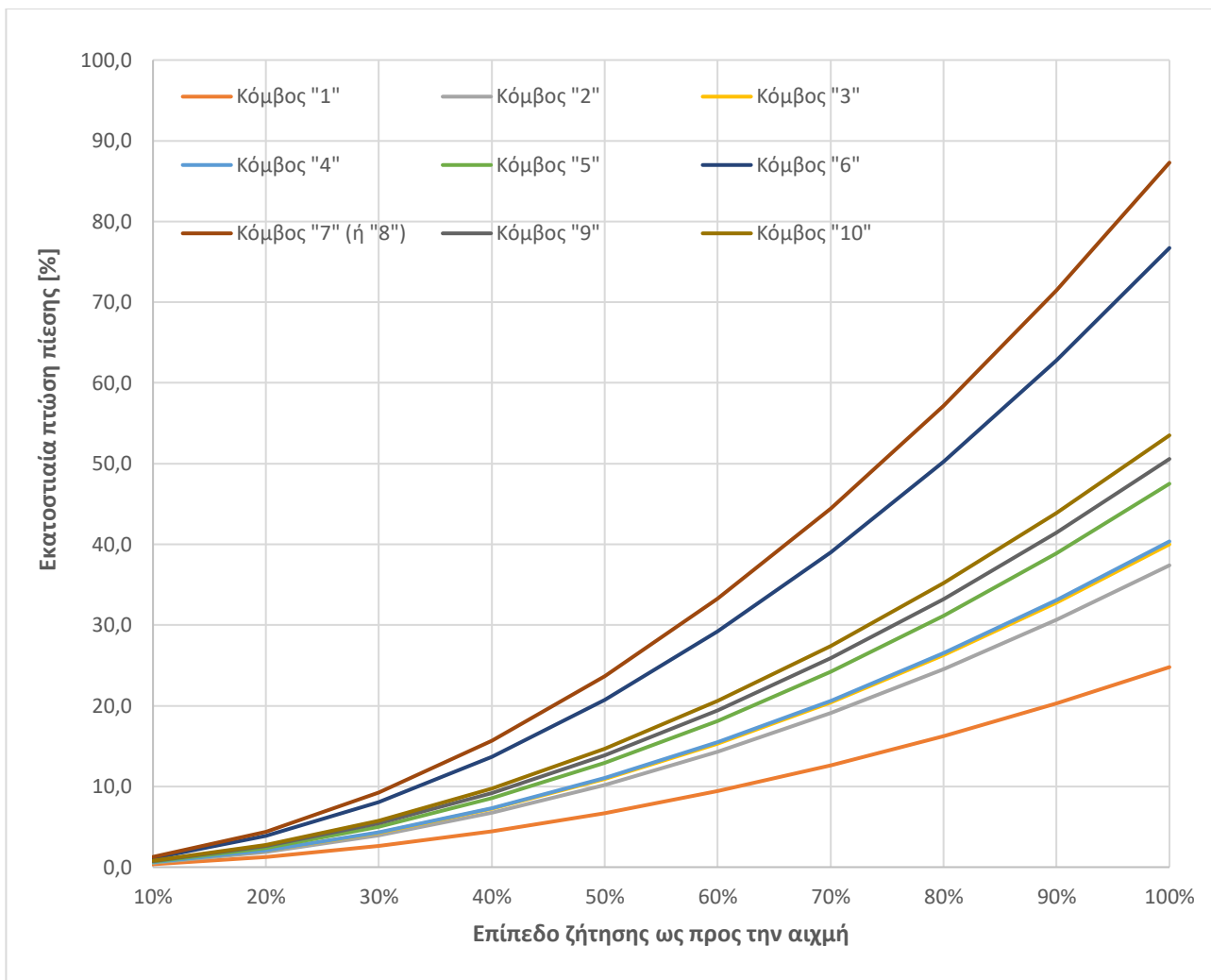
Πίνακας 8.11 Όρια διακύμανσης- εύρος διακύμανσης- εκατοστιαίο ποσοστό διακύμανσης πίεσης κόμβων Ύ ως Ξ ως προς την ονομαστική πίεση του δικτύου για επίπεδα ζήτησης νερού από 10% ως 100% της μέγιστης ζήτησης νερού.

Κόμβος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Αρχική πίεση (m)	153,348	127,638	122,323	121,594	67,026	87,475	105,916	105,916	60,764	14,798
Μέγιστη πίεση (m)	203,145	202,758	202,670	202,656	162,461	241,618	281,282	281,282	162,334	122,233
Εύρος διακύμανσης (μέγιστο-ελάχιστο)	49,797	75,119	80,347	81,063	95,434	154,143	175,366	175,366	101,570	107,435
Εκατοστιαίο ποσοστό διακύμανσης πίεσης (%)	24,43	36,85	39,41	39,76	46,81	75,61	86,02	86,02	49,82	52,70
Μέγιστο στατικό ύψος για μηδενική παροχή	203,874	203,874	203,874	203,874	163,874	243,874	283,874	283,874	163,874	123,874

Για να περιοριστεί το έντονο φαινόμενο της διακύμανσης είναι αναγκαία η χρήση ρυθμιστή πίεσης σε κόμβους ζήτησης νερού, που ξεπερνά η πίεση τα 8bar (81,55m) το οποίο συμβαίνει για ένα σύνολο κόμβων για το μέρος ή το σύνολο της ημέρας, π.χ. στον κόμβο Ξ συμβαίνει για ζήτηση ύδατος μικρότερο από το 60% της παροχής αιχμής ζήτησης, ενώ για τους κόμβους 7 και 8 καθ' όλο το εύρος ζήτησης. Εξαιτίας αυτού, σε όλους τους κόμβους ζήτησης νερού είναι αναγκαία η εγκατάσταση διάταξης ρύθμισης πίεσης. Εναλλακτικά θα έπρεπε να γίνει διαφορετική σχεδίαση του δικτύου, η οποία περιλαμβάνει π.χ. τη χρήση επιμέρους αντλιών (με μικρότερα μανομετρικά ύψη) σε κόμβους (κυρίως διακύμανσης/ μεταβολής γεωδαιτικού ύψους) περιορίζοντας τόσο την ισχύ απωλειών, όσο και την αναπτυσσόμενη πίεση σε σωλήνες, καθώς θα αντιμετωπίζονται οι παροχές των επιμέρους ζητήσεων παροχής νερού. Βέβαια το αντίτιμο είναι πιο περίπλοκη σχεδίαση και λειτουργία του δικτύου ύδρευσης.

Από ενεργειακής σκοπιάς θα μπορούσε στη θέση του ρυθμιστή πίεσης για την απομείωση της πίεσης να χρησιμοποιηθεί για μη μηδενικές παροχές σε κόμβους όπως 7 και 8, με υψηλή πίεση, μικροστρόβιλος για την παραγωγή ισχύος.

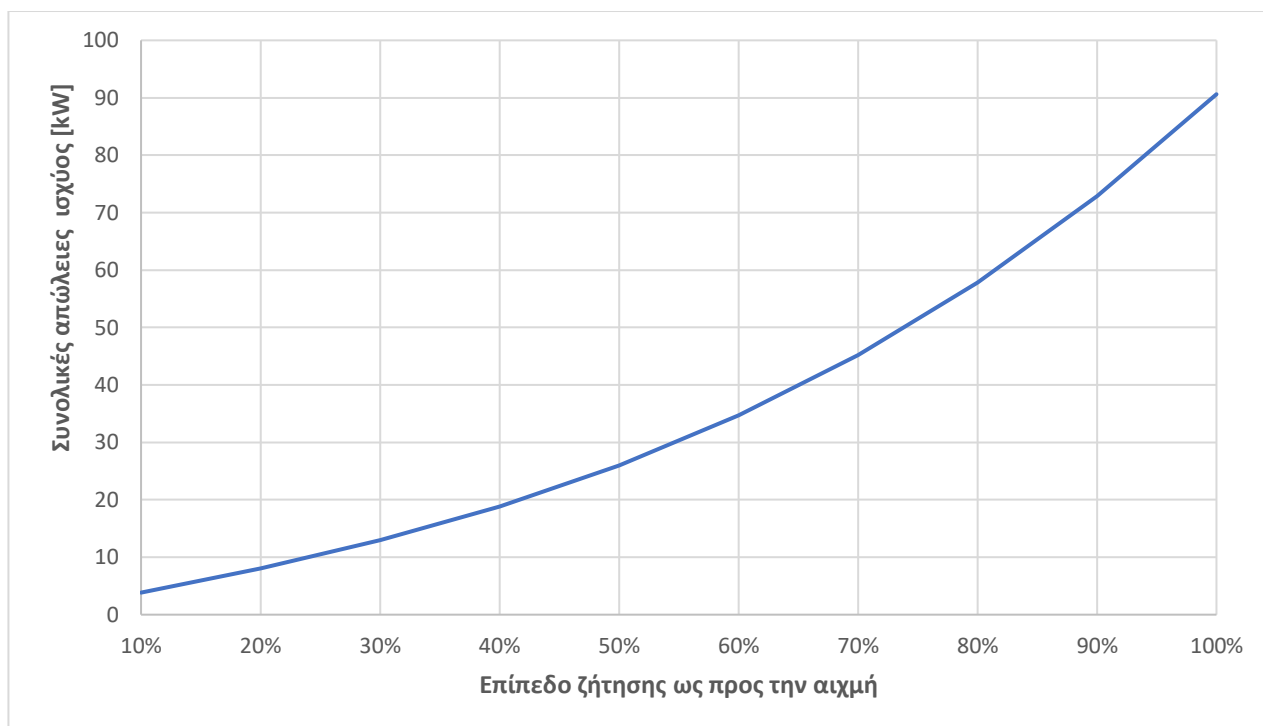
Στο σχήμα (8.3) γίνεται η γραφική παράσταση της εκατοστιαίας πτώσης πίεσης των κόμβων λόγω υδραυλικών απωλειών σωλήνα σε σχέση με τον κόμβο τροφοδοσίας Ύ ως προς την ονομαστική πίεση του δικτύου, από το οποίο φαίνεται η μη γραμμική αύξηση της πτώσης πίεσης με την αύξηση του επιπέδου ζήτησης νερού για το σύνολο των κόμβων, με τα δυσμενέστερα αποτελέσματα να εμφανίζονται για τους κόμβους 7 και 8.



Σχήμα 8.3: Εκατοστιαία πτώση πίεσης κόμβων λόγω υδραυλικών απωλειών σωλήνα σε σχέση με τον κόμβο τροφοδοσίας Ύ ως προς την ονομαστική πίεση του δικτύου σε συνάρτηση με το επίπεδο ζήτησης νερού ως προς τη μέγιστη ζήτηση νερού/ την αιχμή (βασικό σενάριο).

Όμοια αποτελέσματα θα προέκυπταν από την αντίστοιχη παράσταση της πτώσης πίεσης κόμβων λόγω υδραυλικών απωλειών σε σχέση με τον κόμβο τροφοδοσίας Ύ.

Ακολουθεί η γραφική παράσταση των συνολικών απωλειών ισχύος του ακτινικού υδραυλικού δικτύου (που περιλαμβάνει και την εκμετάλλευση αρνητικών ιδανικών απωλειών μέσω στροβίλων) σε συνάρτηση με το συντελεστή ζήτησης νερού ως προς την αιχμή (βασικό σενάριο), όπως φαίνεται στο σχήμα (8.4), από την οποία διαπιστώνεται ότι οι απώλειες αυξάνονται μη γραμμικά (περισσότερο προσεγγίζει παραβολή), το οποίο είναι λογικό με βάση τις σχέσεις (8.5) και (8.8), όπου οι μεν απώλειες πίεσης/ύψους αυξάνονται με το τετράγωνο της ταχύτητας του νερού, δηλαδή της παροχής, αν θεωρηθεί σταθερός ο συντελεστής τριβής (το οποίο δεν ισχύει, διότι μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα), οι δε απώλειες ισχύος εξαρτώνται ανάλογα της παροχής και των απωλειών πίεσης ΔH .



Σχήμα 8.4: Συνολικές απώλειες ισχύος ακτινικού δικτύου ύδρευσης σχήματος 7.1 σε συνάρτηση με τα επίπεδα ζήτησης νερού ως προς την αιχμή (βασικό σενάριο)

8.5 Συμπεράσματα

Από τη σχετική μελέτη του ακτινικού δικτύου ύδρευσης και μέσω του μοντέλου προσομοίωσης προέκυψε το συμπέρασμα ότι το δίκτυο μπορεί να μελετηθεί εύκολα, αν και είναι αναγκαία η χρήση επαναληπτικής μεθόδου για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής του εκάστοτε σωλήνα. Ωστόσο η σύγκλιση είναι πολύ γρήγορη και η επίλυση του προβλήματος σχετικά εύκολη. Διαπιστώνεται ότι η ακτινική τροφοδότηση με κλειστό αγωγό διεσπαρμένων οικισμών σε αποστάσεις δεκάδων χιλιομέτρων και με μικρές υψομετρικές διαφορές (μερικών δεκάδων m) οδηγεί στην απαίτηση μεγάλης πίεσης στον κόμβο τροφοδότησης, με συνέπεια πολύ μεγάλες διακυμάνσεις πίεσης στους κόμβους ζήτησης νερού ανάλογα με το επίπεδο ζήτησης νερού κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου, όπως και στην ανάπτυξη μεγάλων πιέσεων σε ορισμένους κόμβους και μικρών πιέσεων σε άλλους. Οι λύσεις σ' αυτές τις περιπτώσεις είναι είτε η χρήση ρυθμιστών πίεσεως και φρεατίων πιεζοθραύσης σε συγκεκριμένα σημεία, αν χρησιμοποιείται ένα κεντρικό αντλιοστάσιο σε συγκεκριμένο κόμβο τροφοδοσίας, είτε η κατάλληλη σχεδίαση με αρκετά επιμέρους αντλιοστάσια/ ενδιάμεσες δεξαμενές, ώστε να περιορίζεται το προστιθέμενο μανομετρικό ύψος μόνο σε ανερχόμενους σωλήνες και αντίστοιχα να περιορίζεται η καταναλισκόμενη ενέργεια. Με τον τελευταίο τρόπο περιορίζεται η καταστροφόμενη υδραυλική ενέργεια σε ρυθμιστές πίεσης/ φρεάτια πιεζοθραύσεως/ κ.τ.λ. Η χρήση διαδοχικών υδροστροβίλων σε κατερχόμενους σωλήνες προς κόμβους σε χαμηλότερα γεωδαιτικά ύψη μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ενέργειας και περιορισμούς μεταβολής πίεσης, ωστόσο οι τεχνικοί περιορισμοί υδροστροβίλων (συγκεκριμένα όρια λειτουργίας πίεσης – παροχής) τα απαιτούμενα σχετικά τεχνικά έργα και το κόστος εγκατάστασης-λειτουργίας τους περιορίζουν τις πρακτικές εφαρμογές τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

9.1 Γενικά Συμπεράσματα

Βασικός στόχος σύνταξης αυτής της διπλωματικής ήταν ο παραλληλισμός των ηλεκτρικών δικτύων με τα δίκτυα ύδρευσης και η σύγκρισή τους για εντοπισμό ομοιοτήτων και διαφορών μεταξύ τους. Για την ομαλή εισαγωγή στο αντικείμενο αυτό συντάχθηκε το Κεφάλαιο 1, στο οποίο πραγματοποιήθηκε μία εισαγωγή στα δίκτυα κοινής ωφέλειας, παραθέτοντας συνοπτικά την περιγραφή των δύο αυτών δικτύων και επισημαίνοντας τη σημασία που έχουν για τη ζωή του ανθρώπου, αλλά και για το περιβάλλον.

Ωστόσο, η κατανόηση και η ανάπτυξη εννοιών που αφορούν τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και τα δίκτυα ύδρευσης, προϋποθέτει την πρωτύτη ανάλυση βασικών μεγεθών και θεμελιωδών αρχών και σχεσιακών εξαρτήσεων των νόμων που διέπουν τα δίκτυα αυτά. Έτσι το Κεφάλαιο 2 καλύπτει το παραπάνω γνωστικό αντικείμενο για τα ηλεκτρικά δίκτυα αναλύοντας τη θεωρία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, ενώ το Κεφάλαιο 3 πραγματοποιεί το αντίστοιχο για τα υδραυλικά δίκτυα παραθέτοντας σχέσεις της μηχανικής των ρευστών.

Καλύπτοντας το θεωρητικό υπόβαθρο, γίνεται στη συνέχεια εκτεταμένη και σε βάθος ανάλυση της κατασκευαστικής διαμόρφωσης των δικτύων, των υπολογισμών που λαμβάνουν χώρα σε αυτά καθώς και της βέλτιστης ανάπτυξης και λειτουργίας αυτών. Η ανάλυση συμβαίνει στο Κεφάλαιο 4 της εργασίας αυτής για τα ηλεκτρικά δίκτυα και στο Κεφάλαιο 5 για τα δίκτυα ύδρευσης.

Κατόπιν ακολουθεί το Κεφάλαιο 6 όπου και επιτυγχάνεται τελικά η σύγκριση των δύο βασικών δικτύων της εργασίας. Με παραλληλισμό των νόμων και των στοιχείων που ικανοποιούν τους νόμους αυτούς για τα δύο δίκτυα διαπιστώνονται αρκετές ομοιότητες αλλά και διαφορές, καθώς παρατίθενται και διατάξεις που συντελούν στην προστασία των δύο αυτών δικτύων.

Στη συνέχεια, διαμέσου των Κεφαλαίων 7 και 8 πραγματοποιείται η πλαισίωση της σύγκρισης των ηλεκτρικών δικτύων και των δικτύων ύδρευσης, με σκοπό την ανάπτυξη και σύνταξη εμπράκτων αποτελεσμάτων, καθώς πραγματοποιείται η μοντελοποίηση ενός τυπικού ακτινικού ηλεκτρικού δικτύου διανομής και δικτύου ύδρευσης αντίστοιχα μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος MATLAB, όπου παρέχει τη δυνατότητα αλλαγής των μεγεθών και κατασκευής διαφορετικών σεναρίων που αφορούν τις συνθήκες λειτουργίας.

Εν κατακλείδι μετά την αναλυτική σύγκριση των δύο δικτύων, όπως εμφανίζεται στην επόμενη παράγραφο, συμπεραίνεται, πως το ζήτημα κατασκευής ηλεκτρικών δικτύων διανομής και δικτύων ύδρευσης, παρουσιάζει μεγάλη πολυπλοκότητα και ανοίγει ορίζοντες για περαιτέρω μελέτη και εξέλιξη αυτών. Επίσης συμπεραίνεται πως μέσα από τη διαδικασία σύγκρισης και αντιστοίχισης των δύο δικτύων επιτυγχάνεται η διευκόλυνση της μελέτης και της κατανόησης του ενός δικτύου, αν υπάρχουν γνώσεις σε βάθος στο έτερο δίκτυο. Ακόμη αναφέρεται ενδεχόμενη προσέγγιση σύγκρισης

των ηλεκτρικών και υδραυλικών δικτύων με διαφορετικά πεδία όπως αυτό της αποχέτευσης ή των δικτύων φυσικού αερίου.

9.2 Σύγκριση Ηλεκτρικού Δικτύου και Δικτύου Ύδρευσης

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο έπειτα από μελέτη των δύο δικτύων εντοπίστηκαν τόσο ομοιότητες, όσο και διαφορές μεταξύ τους. Ένας συμπερασματικός παραλληλισμός ομοιοτήτων και διαφορών των μεγεθών, των στοιχείων, των νόμων και των διατάξεων, που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά και υδραυλικά δίκτυα, πραγματοποιείται στους Πίνακες (9.1) και (9.2) αντίστοιχα.

Πίνακας 9.1 Παραλληλισμός ομοιοτήτων Ηλεκτρικών Δικτύων και Δικτύων Ύδρευσης

ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	ΔΙΚΤΥΑ ΎΔΡΕΥΣΗΣ
Σθένος: Ηλεκτρική τάση V	Σθένος: Πίεση P
Ροή: Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος I	Ροή: Παροχή Q
Πτώση τάσης ΔV	Πτώση πίεσης ΔP
Κατανάλωση: Φορτίο	Κατανάλωση: Κατανάλωση ύδατος
1^{ος} Νόμος του Kirchhoff: Αρχή διατήρησης φορτίου Νόμος των ρευμάτων $I_1 + I_2 + I_3 = 0$	Αρχή διατήρησης μάζας/ Σχέση συνέχειας: Νόμος των παροχών $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$
2^{ος} Νόμος του Kirchhoff: Αρχή διατήρησης ενέργειας Νόμος των τάσεων $V_1 + V_2 + V_3 = 0$	Αρχή διατήρησης ενέργειας: Νόμος των πιέσεων $\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 0$
Νόμος του Ohm: $\Delta V = I \cdot R$	Νόμος του Ohm: $\Delta P = Q^2 \cdot R$
Πηγή: Γεννήτρια	Πηγή: Αντλία
Μέσο μεταφοράς: Καλώδια και Αγωγοί	Μέσο μεταφοράς: Σωλήνες
Γεννήτρια	Αντλία
Κινητήρας	Στρόβιλος
Ρυθμιστής Τάσης	Ρυθμιστής Πίεσης, Φρεάτιο Πιεζοθραύσεως Δοχείο διαστολής
Διακόπτης φορτίου/ισχύος	Δικλείδα
Μετασχηματιστής	Αντλία/Στρόβιλος (με διαφορετικό τρόπο θεώρησης)

Πίνακας 9.2 Παραλληλισμός διαφορών Ηλεκτρικών Δικτύων και Δικτύων Ύδρευσης

ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	ΔΙΚΤΥΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ
Δίκτυα υψηλής τάσης: βροχωτά	Εξωτερικό υδραγωγείο: ακτινωτό
Δίκτυα μέσης τάσης: βροχωτά ή ακτινωτά	Εξωτερικό υδραγωγείο: ακτινωτό
Δίκτυα χαμηλής τάσης: βροχωτά: ως προς την κατασκευή ακτινωτά: ως προς τη λειτουργία	Εσωτερικό υδραγωγείο: βροχωτό με ακτινικές επεκτάσεις
R ανεξάρτητη της έντασης του ρεύματος I	R εξαρτώμενη της παροχής Q
Προστασία από υπερένταση και υπερφόρτιση	Προστασία μέσω υπερχειλίσης
Προστασία από υπέρταση/ υπόταση	Προστασία από υποπίεση ή υπερπίεση
Προστασία ασυμμετρίας των φάσεων, διακοπής φάσεων ή ουδετέρου, διαφοροποίησης της συχνότητας του δικτύου	Ρύθμιση της κατεύθυνσης της ροής
Ροή φορτίου	Υδραυλική Ροή
Μιγαδικά μεγέθη	Αλγεβρικά μεγέθη
Ζητούμενο: Μέτρο και φάση τάσεων, ισχύες	Ζητούμενο: Πιέσεις και παροχές (ταχύτητες)

Από την αριθμητική προσομοίωση ενός ηλεκτρικού δικτύου και ενός δικτύου ύδρευσης ακτινικής μορφής (σχήμα 7.1) με καταναλώσεις σε ίδιους κόμβους και με ανάλογες ισχύες ζήτησης (για το ηλεκτρικό δίκτυο) και παροχές ζήτησης νερού (για το υδραυλικό δίκτυο) διαπιστώθηκαν οι εξής ομοιότητες/διαφορές:

- Και στις δύο περιπτώσεις η τοπολογική μήτρα του δικτύου είναι ίδια και οι σχέσεις ροής-σθένους, δηλαδή έντασης ρεύματος – τάσης σε ηλεκτρικό δίκτυο και παροχής – πτώσης πίεσης σε δίκτυο ύδρευσης, είναι όμοιες.
- Υπάρχει απαίτηση χρήσης μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης και στα δύο δίκτυα, αν και σε διαφορετικά σημεία, καθώς στο ηλεκτρικό δίκτυο απαιτείται επαναληπτική μέθοδος για την προσέγγιση των φορτίων σταθερής ισχύος ως φορτίων σταθερής έντασης ρεύματος (για το υδραυλικό τα «φορτία» είναι εξαρχής σταθερής παροχής), ενώ για το υδραυλικό δίκτυο απαιτείται για την εκτίμηση του συντελεστή τριβής των γραμμικών απωλειών σε σωλήνες (για το ηλεκτρικό δίκτυο οι απώλειες αγωγών μορφής σύνθετης αντίστασης παραμένουν

αμετάβλητες). Βέβαια παρουσιάζεται μία διαφορά, καθώς η μαθηματική προσομοίωση του ηλεκτρικού δικτύου απαιτεί χρήση στροφών, δηλαδή μιγαδικών αριθμών, ενώ του υδραυλικού όχι.

- Υπάρχει μείωση του σθένους κατά τη ροή μεταξύ δύο κόμβων. Ωστόσο στο ηλεκτρικό δίκτυο η πτώση τάσης μεταξύ δύο κόμβων είναι σχεδόν γραμμική όσο αυξάνεται το επίπεδο φόρτισης του δικτύου, ενώ στο υδραυλικό δίκτυο η μείωση πίεσης είναι μη γραμμική (πρακτικά παραβολικής μορφής), το οποίο δικαιολογείται μαθηματικά και από τις σχέσεις (6.6) και (6.7). Επιπλέον η εκατοστιαία πτώση πίεσης είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη πτώση τάσης (παρά το γεγονός ότι τοποθετήθηκαν αγωγοί αρκετά μεγαλύτερης διατομής από τη συνηθισμένη π.χ. Φ200 αντί για Φ90. Αυτό άλλωστε επιβεβαιώνεται και από τις πρακτικές εφαρμογές, καθώς η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να γίνει και σε περιοχές που απέχουν εκατοντάδες ή και χιλιάδες χιλιόμετρα, ενώ η μεταφορά νερού μέσω αγωγών περιορίζεται συνήθως σε μερικές δεκάδες χιλιόμετρα (π.χ. δίκτυο ΕΥΔΑΠ με εξαίρεση την τροφοδοσία από το Μόρνο και τον Εύηνο).
- Οι απώλειες ισχύος ακολουθούν μη γραμμική συμπεριφορά (περισσότερο παραβολικής μορφής) σε σχέση με το επίπεδο ζήτησης φορτίου για το ηλεκτρικό δίκτυο και με το επίπεδο ζήτησης νερού για το υδραυλικό. Όμως υπάρχει και μία σημαντική διαφορά. Στα δίκτυα ύδρευσης δεν υπάρχει η έννοια της αέργου ισχύος που υπάρχει στα ηλεκτρικά δίκτυα καθώς και των αντίστοιχων απωλειών αέργου ισχύος (αέργος ισχύς υπάρχει μόνο σε υδρομηχανές στην περίπτωση διατήρησης συστροφής)
- Οι δυνατότητες ρύθμισης σθένους είναι πιο πολλές για το ηλεκτρικό δίκτυο (μέσω των μετασχηματιστών και των ρυθμιστών τάσης) σε σχέση με το υδραυλικό δίκτυο (όπου η χρήση ρυθμιστών πίεσης, φρεατίων πιεζοθραύσεως, οδηγούν σε σημαντικές απώλειες ενέργειας). Ωστόσο η χρήση εννοιών σθένους-ροής βοηθά στην κατανόηση των όρων ηλεκτρικών δικτύων και δικτύων ύδρευσης, ειδικά στην περίπτωση που κάποιος/α γνωρίζει καλά το ένα μέρος και προσπαθεί γρήγορα να κατανοήσει το άλλο μέρος μέσω της αντιστοίχισης.

9.3 Περιοχές για περαιτέρω έρευνα

Μετά την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας μπορεί να σημειωθεί πως δίνεται η δυνατότητα για περαιτέρω μελέτη και έρευνα. Πιο συγκεκριμένα προτείνεται:

- Η επέκταση της σύγκρισης των ηλεκτρικών δικτύων διανομής εκτός από τα δίκτυα ύδρευσης, με τα δίκτυα αποχέτευσης ή ακόμη και με τα δίκτυα διανομής φυσικού αερίου.
- Η εκβάθυνση της μελέτης της συμπεριφοράς των δικτύων, καθώς οι μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας ενός δικτύου, δηλαδή όλες οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται από τη μόνιμη κατάσταση αυτού, αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την ορθή ανάπτυξη και εξέλιξη των δικτύων
- Δημιουργία προσομοίωσης προγραμμάτων σε προγραμματιστικό περιβάλλον, με πραγματικά τοπογραφικά στοιχεία και την επίλυση υπαρκτών προβλημάτων ηλεκτροδότησης ή υδροδότησης συγκεκριμένων οικισμών.

- Ανάπτυξη αλγορίθμων προσομοίωσης βροχωτών δικτύων (πέραν των ακτινικών) που στηρίζονται σε μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης, όπως η Newton-Raphson, η Gauss-Seidel κ.τ.λ.

(ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ-ΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- [1] Μιχ. Παπαδόπουλος: «Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας – Τόμος Ι», Αθήνα 1994, σελ. 365.
- [2] Μ. Αφτιάς: «Υδρεύσεις», Αθήνα 1992.
- [3] Δ. Κουτσογιάννης: «Σχεδιασμός αστικών δικτύων αποχέτευσης», Έκδοση 3.1, Αθήνα 1999, σελ. 201.
- [4] Γ. Τσεκούρας: «Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας – Μέρος Α – Εισαγωγή στα Σ.Η.Ε.», σελ. 23
- [5] Γ. Νουτσόπουλος, Γ. Χριστοδούλου: «Μαθήματα μηχανικής των ρευστών», Αθήνα 1996, σελ. 285.
- [6] Π.Ν. Παπανικολάου: «Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση & αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια», Διδακτικές σημειώσεις, έκδοση 2η, 2012, σελ. 264.
- [7] Γ.Ι. Τσεκούρας: «Εισαγωγή στις Έννοιες της Ηλεκτροτεχνίας», Αύγουστος 2016, σελ. 444.
- [8] ABB, “Switchgear Manual”, 10th edition
- [9] Λ. Βαμβακερίδου-Λυρουδία: «Σχεδιασμός και μαθηματική προσομοίωση δικτύων ύδρευσης», Αθήνα 2001, σελ.96.
- [10] Γ. Τσακίρης, Μ. Σπηλιώτης: «Υδρεύσεις οικισμών», 2008, σελ. 72.
- [11] Δ. Κουτσογιάννης, Α. Ευστρατιάδης: «Υδροδοτικά έργα», σημειώσεις στο μάθημα «Αστικά υδραυλικά έργα», ΕΜΠ, σελ. 83.
- [12] Β. Κανακούσης, Σ. Τσιτσιφλή: «Ολοκληρωμένη διαχείριση αστικών δικτύων ύδρευσης», Κάλλιπος, ΣΕΑΒ 2015, σελ. 324.
- [13] Μ. Σαμαράκου: «Βελτιστοποίηση ενεργειακών συστημάτων», Αθήνα 2004, σελ. 182.
- [14] Στ. Κουρτέση: «Αναλογία Δικτύου Φυσικού Αερίου και Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας», Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, 2004, σελ. 231.
- [15] Δ. Παναγούλια, Γ. Δήμου: «Εισαγωγή στα εγγειοβελτιωτικά έργα», Αθήνα 2000, σελ.122.
- [16] Π. Μιχαλόπουλος, Γεώργιος Τσεκούρας: «Εισαγωγή στη MATLAB», Σ.Ν.Δ., Νοέμβριος 2014, σελ. 49, για το μάθημα Εισαγωγή στην Επιστήμη των Υπολογιστών του 1ου έτους στη Σ.Ν.Δ.
- [17] Γεώργιος Τσεκούρας: «Μελέτη ανάπτυξης και επέκτασης στοιχειώδους δικτύου μέσης τάσης», Μεταπτυχιακή εργασία, 2000, σελ. 61, για το μάθημα «Ανάπτυξη συστήματος παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας»
- [18] Στ. Α. Αυλωνίτης, Δημ. Α. Αυλωνίτης: «Μηχανική των ρευστών», Εκδόσεις Ίων, 2006, σελ. 444.
- [19] Α. Λιακόπουλος: «Υδραυλική», Εκδόσεις Τζιόλα, 2014, σελ.341.
- [20] Τ. Γ. Κουσιουρή: «Θεωρία ανάλυσης συστημάτων και κυκλωμάτων», Εκδόσεις ΕΜΠ, 1996, σελ. 351
- [21] Γ. Ι. Τσεκούρας: «Ηλεκτρικά στοιχεία και Ηλεκτρικά Δίκτυα», ΣΝΔ, σελ.19
- [22] Γ. Ι. Τσεκούρας: «Ηλεκτρικά Δίκτυα», ΣΝΔ, σελ.14

- [23] Γ. Ι. Τσεκούρας: «Μεταβατική κατάσταση στο πεδίο του χρόνου», ΣΝΔ, σελ.32
- [24] Γ. Ι. Τσεκούρας: «Κυκλώματα συνεχούς σταθερής τάσης/έντασης μόνιμης κατάστασης», ΣΝΔ, σελ.42
- [25] Γ. Ι. Τσεκούρας: «Μονοφασικά εναλλασσόμενα κυκλώματα ημιτονοειδούς μόνιμης κατάστασης», ΣΝΔ, σελ.84
- [26] Κατάλογος ABB: «Ηλεκτρολογικό υλικό 2018»
- [27] Γ. Ι. Τσεκούρας: «Ηλεκτρική Οικονομία», σελ.7
- [28] https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/2016/11/blog-post_6.html
- [29] https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/2016/12/blog-post_33.html
- [30] <https://electricalnews.gr/nea-epikairotita/ilektrologika-nea/item/815-ilektropliksies>
- [31] https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589255/mod_resource/content/1/IEEE-519-1992.pdf
- [32] https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2021/1/08_chapter_8.pdf
- [33] <https://www.slideshare.net/domenicodefalco/introduzione-ai-bond-graph>
- [34] Π.Σ. Γεωργιλάκης: «Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας». Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράματα και Βοηθήματα– Κάλλιπος, Αθήνα, 2015, σελ. 312
- [35] Ν.Ι. Κρικέλης: « Μοντελοποίηση και βέλτιστος έλεγχος συστημάτων», έκδοση 3η, 2003, σελ. 432.
- [36] Ι.Κ. Χατζηλάου, Γ.Ι. Τσεκούρας: «Θεωρία και πράξη ηλεκτρικών μηχανών – Κεφάλαιο 2: Μετασηματιστές», Σημειώσεις για μάθημα ηλεκτρικών μηχανών, Σ.Ν.Δ., 2010, σελ. 142
- [37] https://blogs.sch.gr/mlagoudakos/files/2013/01/P021_074.pdf
- [38] S.J. Charpman, «Ηλεκτρικές Μηχανές», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2014, σελ.900
- [39] <https://kounelis.com.gr/hyundai-gennhtria-epaggelmatikh-34-4kva-380v-1500rpm-diesel-dhy34kse.html>
- [40] <http://eclass.teipir.gr/openeclass/modules/document/file.php/ELEC106/I.%20CE%94%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%AC%CE%BD%CE%B5%CE%B9%CE%B5%CF%82%20%CE%98%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%AF%CE%B1%CF%82/II.%20CE%91%CF%83%CF%8D%CE%B3%CF%87%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%BF%CF%82%20%CE%A4%CF%81%CE%B9%CF%86%CE%B1%CF%83%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82%20%CE%9A%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82%20.pdf>
- [41] <https://www.chryssafidis.com/list.512>
- [42] Χ. Τσιχλής, «Αγωγοί και καλώδια για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας», Πτυχιακή εργασία, ΤΕΙ Καβάλας, 2012, σελ.76
- [43] <https://www.dimohellas.gr/product-categories/solines-ydreyshs/>
- [44] <https://slideplayer.gr/slide/11182028/>
- [45] <https://noratex.gr/product/fuses-medium-voltage-afleies-meshs-tashs/?lang=en>
- [46] https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/2015/10/blog-post_11.html
- [47] <https://press-crew.gr/papadhmhtriou/>

- [48] Β. Κανακούδης, Σ. Τσιφτιλή, «Ολοκληρωμένη Διαχείριση Αστικών Δικτύων Ύδρευσης», Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράματα και Βοηθήματα–Κάλλιπος, Αθήνα, 2015, σελ. 324
- [49] <https://www.avkvalves.gr/el-gr/%CE%B5%CF%8D%CF%81%CE%B5%CF%83%CE%B7-%CF%80%CF%81%CE%BF%CF%8A%CF%8C%CE%BD%CF%84%CE%BF%CF%82/%CE%B1%CE%B5%CF%81%CE%BF%CE%B5%CE%BE%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%BF%CE%AF/%CE%B1%CE%B5%CF%81%CE%BF%CE%B5%CE%BE%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%BF%CE%AF/701-30-020>
- [50] <http://evangelosakylas.weebly.com/uploads/8/7/3/4/8734654/7.pdf>
- [51] J. Smet, C. Van Wijk, «Small Community Water Supplies: Technology, People and Partnership», Delft, The Netherlands, IRC International Water and Sanitation Centre, 2002, σελ. 588
- [52] Μ. Σπανοθυμνίου, μεταπτυχιακή εργασία. «Προσομοίωση Συστημάτων Διανομής Νερού Ύδρευσης με το Λογισμικό mike urban w.d.- Διερεύνηση των Ισχυρικών Τεχνικών Προδιαγραφών Εκπόνησης Μελετών Ύδρευσης στην Ελλάδα», ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2010, σελ. 262
- [53] Α. Δαμασκηνίδου-Γεωργιάδου, Ε. Σιδηρόπουλος, «Σημειώσεις Υδραυλικής Ανοικτών Αγωγών,» Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 1996.
- [54] M. Kay, "Practical Hydraulics and Water Resources Engineering" 3rd Ed., Boca Raton, US: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
- [55] Δ. Παπαμιχαήλ, Γ. Τσακίρης, «Υδραυλικά Έργα: Σχεδιασμός και Διαχείριση - Τόμος II: Εγγειοβελτιωτικά Έργα », Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2006, σελ. 776
- [56] <https://www.agem.gr/water-pumps/SUBMERSIBLE-PUMPS/shakti/QF12-21>

