



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ &
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Θεωρητική Διερεύνηση Φαινομένων κατά τη Φόρτιση Πυλώνων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Π. Κυριακόπουλος

Επιβλέπων : Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2006



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ &
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Θεωρητική Διερεύνηση Φαινομένων κατά τη Φόρτιση Πυλώνων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Π. Κυριακόπουλος

Επιβλέπων : Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Νοεμβρίου 2006

.....
Περικλής Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος
Καραγιαννόπουλος
Αναπλ. Καθηγητής

.....
Νικόλαος Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2006

.....
Δημήτριος Π. Κυριακόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Δημήτριος Π. Κυριακόπουλος
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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 τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Πρόσφατα στη χώρα μας και συγκεκριμένα στην Κεφαλονιά, εμφανίστηκαν προβλήματα ευστάθειας στους πυλώνες υψηλής τάσης, κάποιοι από τους οποίους, λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων, οδηγήθηκαν και σε κατάρρευση. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε την αφορμή για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, η οποία σκοπό έχει να παρουσιάσει αναλυτικά τη μέθοδο υπολογισμού των δυνάμεων που αναπτύσσονται στους αγωγούς υπό μέγιστες συνθήκες φόρτισης, τον έλεγχο αν αυτές δύναται να τις αντέξουν συγκεκριμένοι τύποι πυλώνων και γενικά τη θεωρητική διερεύνηση των απορρεόντων φαινομένων υπό τις αυτές συνθήκες, καθώς επίσης και να προσομοιώσει γραφικά, με τη δημιουργία ενός animation, την κατάρρευση των πυλώνων υπό την επίδραση ακραίων φορτίων αέρα και πάγου, έτσι ώστε να διευκολυνθεί η οπτική αντίληψη ενός τέτοιου γεγονότος.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους αξιότιμους καθηγητές μου κ.κ. Περικλή Μπούρκα και Κώστα Καραγιαννόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση τους, καθώς επίσης και για το άριστο κλίμα συνεργασίας κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τη κα. Αικατερίνη Πολυκράτη, μέλος του ειδικού και διδακτικού προσωπικού του εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μετρήσεων, για το ενδιαφέρον και την υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της εργασίας. Επίσης, θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω το φίλο μου και 3D Animator Λεωνίδα Σκούφαλη για την ουσιαστική βοήθεια που μου παρείχε με τις γνώσεις και την εμπειρία του όσον αφορά την υλοποίηση του animation. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αμέριστη συμπαράσταση τους, καθώς και όσους με στήριξαν κατά τη διάρκεια του εγχειρήματος αυτού.

Αθήνα, Νοέμβριος 2006
Δημήτριος Π. Κυριακόπουλος

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	11
ABSTRACT	12
Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1 <u>Εξέλιξη και επιλογή των επιπέδων τάσης</u>	13
1.1.1 Εξέλιξη των τάσεων μεταφοράς	13
1.1.2 Εισαγωγή στις τάσεις μεταφοράς	15
1.2 <u>Επιλογή των αγωγών</u>	17
1.3 <u>Επιλογή της διαμόρφωσης της γραμμής</u>	19
1.4 <u>Επενδύσεις</u>	23
Κεφάλαιο 2 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΕ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ	25
2.1 <u>Μηχανική σχεδίαση εναέριας γραμμής</u>	25
2.1.1 Μέρη και στοιχεία μιας εναέριας γραμμής	25
2.1.2 Αξιοπιστία	25
2.2 <u>Φορτία αέρα</u>	26
2.2.1 Μετρήσεις αέρα	26
2.2.2 Καθορισμός ταχυτήτων αέρα μετεωρολογικής αναφοράς	28
2.2.2.1 Εκτίμηση των μετρήσεων αέρα	28
2.2.2.2 Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους	28
2.2.2.3 Μεταβολή της ταχύτητας του αέρα με το ύψος	28
2.2.3 Δράση του αέρα στα μέρη και τα στοιχεία της γραμμής	29
2.3 <u>Φορτία πάγου</u>	30
2.3.1 Ατμοσφαιρικό πάγωμα	30
2.3.2 Παρατηρήσεις πάγου και μετρήσεις	31
2.3.3 Καθορισμός φορτίων πάγου αναφοράς	33
2.3.3.1 Βασικές σχέσεις	33
2.3.3.2 Εκτίμηση των πληροφοριών για το φορτίο του πάγου	33
2.3.3.3 Φόρτιση του στηρίγματος και περιπτώσεις φόρτισης	34

2.4	<u>Συνδυασμένα φορτία αέρα και πάγου</u>	35
2.4.1	Πιθανότητα εμφάνισης και συνδυασμός παραμέτρων	35
2.4.2	Δράση του αέρα στον καλυμμένο με πάγο αγωγό	35
2.5	<u>Αντοχές των μερών και των στοιχείων της γραμμής</u>	37
2.5.1	Όρια αντοχής	37
2.5.2	Διαβάθμιση των μεμονωμένων μερών και στοιχείων	38
Κεφάλαιο 3	<i>ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙ ΜΕΡΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ</i>	
	<i>ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ</i>	39
3.1	<u>Αγωγοί</u>	39
3.1.1	Γενικά στοιχεία αγωγών	40
3.1.1.1	Πρόοδος στην τεχνική ανάπτυξη	40
3.1.1.2	Υλικά αγωγών	42
3.1.1.3	Αγωγοί εναέριων γραμμών μεταφοράς (ελληνικού συστήματος)	43
3.1.1.4	Φαινόμενο Corona	45
3.1.1.5	Αγωγοί γης	47
3.1.2	Μορφή αγωγών	49
3.1.3	Αγωγοί από χαλκό	51
3.1.4	Αγωγοί από αλουμίνιο	51
3.1.5	Αγωγοί από αλουμίνιο - χάλυβα (ACSR).....	52
3.1.6	Οικονομική διατομή των αγωγών - Νόμος Kelvin	52
3.2	<u>Μονωτήρες</u>	55
3.2.1	Γενικά στοιχεία μονωτήρων	55
3.2.2	Μονωτήρες εναέριων γραμμών μεταφοράς (ελληνικού συστήματος)	56
3.2.3	Υλικά εξοπλισμού, σύνδεσμοι και αποσβεστήρες ταλάντωσης	64
3.3	<u>Θεμελιώσεις</u>	68
3.3.1	Γενικά	68
3.3.2	Τύποι εδάφους	69
3.3.3	Τύποι θεμελίωσης.....	69
3.3.4	Υπολογισμοί θεμελίωσης	70
3.3.5	Θεμελιώσεις εναέριων γραμμών μεταφοράς (ελληνικού συστήματος)	72

3.4 Στηρίγματα	73
3.4.1 Γενικά	73
3.4.2 Τύποι στηριγμάτων και οι εφαρμογές τους	79
3.4.2.1 Ορισμοί	79
3.4.2.2 Λειτουργίες των στηριγμάτων σε μια εναέρια γραμμή	80
3.4.2.3 Σχεδίαση στηρίγματος και εφαρμογή	83
3.4.3 Γεωμετρία του άνω τμήματος του κορμού του πυλώνα	90
3.4.3.1 Απαιτήσεις	90
3.4.3.2 Επιβαλλόμενες από ηλεκτρικής απόψεως αποστάσεις σύμφωνα με τα σχετικά πρότυπα	91
3.4.4 Βασικές απαιτήσεις σχεδίασης	92
3.4.4.1 Εισαγωγή	92
3.4.4.2 Στατικό σχέδιο	94
3.4.4.3 Τιμές σχεδίασης και μέθοδοι ελέγχου	95
3.4.5 Περιπτώσεις φόρτισης	96
3.4.5.1 Συνδυασμοί φορτίων	96
3.4.5.2 Ακραίο φορτίο αέρα.....	97
3.4.5.3 Φορτίο αέρα στην ελάχιστη θερμοκρασία	99
3.4.5.4 Ομοιόμορφα και ασύμμετρα φορτία πάγου χωρίς αέρα.....	99
3.4.5.5 Συνδυασμένο φορτίο αέρα και πάγου.....	101
3.4.5.6 Φορτία κατασκευής και συντήρησης	101
3.4.5.7 Φορτία προστασίας	103
3.4.6 Τρόπος εγκατάστασης πυλώνων	104
Κεφάλαιο 4 ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΡΑΜΜΩΝ	107
4.1 Γενικά	107
4.2 Επιφόρτιση των αγωγών	109
4.3 Επιφόρτιση φορέων	109
4.4 Μηχανικά χαρακτηριστικά εναέριων γραμμών.....	110
4.4.1 Υπολογισμός καμπύλης και βέλους αγωγών	110
4.4.2 Επίδραση ανέμου και πάγου	114
4.4.3 Ανάρτηση αγωγών σε κεκλιμένο έδαφος	115

Κεφάλαιο 5	ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΕΠΙ ΤΩΝ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΠΟ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΠΑΓΟ ΠΟΥ ΟΔΗΓΗΣΑΝ ΣΕ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΠΥΛΩΝΩΝ	117
5.1	<u>Δεδομένα</u>	117
5.2	<u>Υπολογισμοί στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας</u>	118
5.3	<u>Το μήκος του αγωγού πριν αναρτηθεί και τανυστεί</u>	120
5.4	<u>Υπολογισμοί μετά την επικάλυψη των αγωγών με πάγο και ισχυρό άνεμο</u>	122
5.5	<u>Υπολογισμός των δυνάμεων επί του αγωγού</u>	127
5.6	<u>Συμπεράσματα</u>	127
Κεφάλαιο 6	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΕΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΓΙΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΠΑΓΟΥ	135
6.1	<u>Διερεύνηση για μήκος ανοίγματος 350 m</u>	135
6.2	<u>Διερεύνηση για μήκος ανοίγματος 250 m</u>	161
6.3	<u>Γενικά συμπεράσματα</u>	166
Κεφάλαιο 7	ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ - ANIMATION ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΠΥΛΩΝΑ	169
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΑΝ	181
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		193

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη διπλωματική αυτή εργασία, με αφορμή την κατάρρευση των πυλώνων κατά την πρόσφατη θεομηνία στην Κεφαλονιά τον Ιανουάριο του 2006, αναλύονται θεωρητικά τα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη φόρτιση των πυλώνων υψηλής τάσης και προσομοιώνεται με τη βοήθεια κινουμένου σχεδίου (animation) η περίπτωση κατάρρευσης πυλώνων λόγω ακραίων καιρικών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η επίδραση στους πυλώνες των φορτίων του αέρα και του πάγου σε συνδυασμό με τις δυνάμεις τάνυσης των αγωγών και διερευνώνται οι τιμές των φορτίων αυτών σε σχέση με τα όρια μηχανικής αντοχής των αγωγών και των πυλώνων.

Αρχικά, γίνεται γενική αναφορά στις εναέριες γραμμές μεταφοράς και λεπτομερέστερη εξέταση των φορτίων αέρα και πάγου και ακολούθως αναλύονται τα επί μέρους στοιχεία των γραμμών αυτών, δηλαδή οι αγωγοί, οι μονωτήρες, οι θεμελιώσεις και οι πυλώνες. Εν συνεχεία, περιγράφονται ενδελεχώς τα μηχανικά χαρακτηριστικά των γραμμών και παρουσιάζεται η πορεία των υπολογισμών με τη βοήθεια προγράμματος, για συγκεκριμένο πυλώνα που κατέρρευσε και με δεδομένα φορτία αέρα και πάγου, με σκοπό τον έλεγχο της υπέρβασης της μηχανικής αντοχής του. Ακολουθεί η γενίκευση της ανωτέρω μελέτης και η εφαρμογή της για διάφορες τιμές φορτίων αέρα και πάγου, καθώς και για διαφορετικό μήκος ανοίγματος των πυλώνων, έτσι ώστε η διερεύνηση των φαινομένων να είναι πληρέστερη. Τέλος, παρουσιάζονται ενδεικτικά ένα σύνολο εικόνων από το animation που ήδη αναφέρθηκε και το οποίο επισυνάπτεται, μαζί με την υπόλοιπη εργασία, σε ψηφιακή μορφή.

Σημειώνεται ότι η δημιουργία του animation πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος Maya®, της εταιρίας Alias Systems Corp. ενώ η υπολογιστική μελέτη για τη διερεύνηση των φαινομένων φόρτισης έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica®, της εταιρίας Wolfram Research, Inc.

Λέξεις κλειδιά : εναέρια γραμμή μεταφοράς, αγωγός, πυλώνας, μηχανική αντοχή, φόρτιση, αέρας, πάγος, animation κατάρρευσης πυλώνα

ABSTRACT

Throughout this diploma thesis, on the occasion of the towers cascading at the recent calamity in Kefalonia in January 2006, we have theoretically examined the phenomena that occur during the loading of high voltage towers and via animation we have simulated the case of towers cascading due to extreme weather conditions. In particular, we examine the effect that the wind and ice loads have on the towers combined with the conductor tensile forces. In addition to that we look into the values of the certain loads concerning with the towers and conductors mechanical strength limits.

At first, there is a general description of the overhead transmission lines as well as a more thorough examination of the wind and ice loads. Then, the individual components of these lines such as the conductors, the insulators, the foundations and the towers are being examined. Next, we describe in detail the mechanical characteristics of the lines and the evaluation progress is presented with the help of a program, about a specific tower that collapsed and with given wind and ice loads, in order to verify the excess of its mechanical strength. Following, there is a generalization of the above project and its application on different wind and ice load values, as well as on different span length, so that the examination of the phenomena be more complete. Finally, an amount of pictures from the animation mentioned previously and attached to the rest project in video-form, are being typically presented.

It is noted that, the animation was created with the help of the Maya® program of Alias System Corp. whereas the evaluation study for the examination of the loading phenomena was done with the help of the Mathematica® program, of Wolfram Research, Inc.

Key words : overhead transmission line, conductor, tower, mechanical strength, loading, wind, ice, cascading tower animation



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εναέρια μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας ήταν κατά τη διάρκεια των ετών και θα συνεχίσει να είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία των σημερινών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεταφορά ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στις βιομηχανικές περιοχές και στους υποσταθμούς είναι το θεμελιώδες αντικείμενο των συστημάτων μεταφοράς. Αυτή η λειτουργία πραγματοποιείται από τις εναέρια γραμμές μεταφοράς που συνδέουν τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας με το δίκτυο μεταφοράς, διασυνδέουν διάφορα τμήματα των δικτύων μεταφοράς, διασυνδέουν μια ηλεκτρική μονάδα με μια άλλη ή διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια από τα διάφορα τμήματα του δικτύου μεταφοράς στα συστήματα διανομής, τροφοδοτώντας τους οικιακούς και εμπορικούς καταναλωτές.

Οι μελέτες προγραμματισμού έχουν ηγετικό ρόλο στον καθορισμό ενός ηλεκτρικού συστήματος ή στην επέκτασή του. Λόγω των διαφόρων μεταβλητών που περιλαμβάνονται στη διαδικασία, οι δραστηριότητες προγραμματισμού πρέπει να αρχίσουν αρκετά έτη προτού μια νέα εγκατάσταση ή η επέκταση μιας υπάρχουσας προγραμματίζεται να υλοποιηθεί.

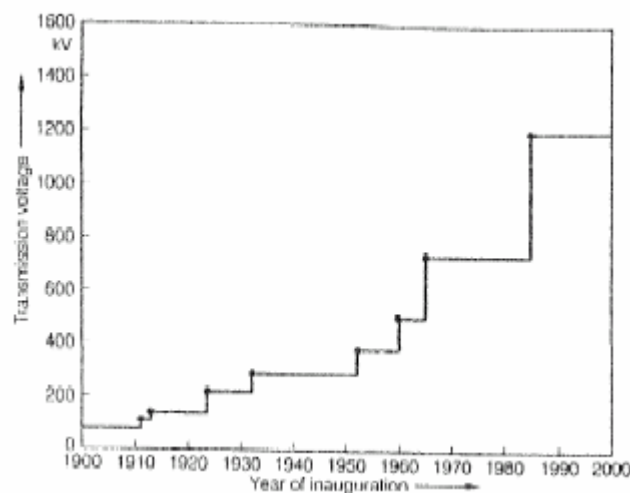
1.1 Εξέλιξη και επιλογή των επιπέδων τάσης

1.1.1 Εξέλιξη των τάσεων μεταφοράς

Το 1891 ο Oskar von Miller έχτισε την πρώτη τριφασική γραμμή μεταφοράς μεταξύ Lauffen και Φρανκφούρτης στη Γερμανία επ' ευκαιρία της εγκαινίασης μιας ηλεκτροτεχνικής έκθεσης. Μια ισχύς περίπου 200 kW μεταφερόταν από μια γραμμή 15 kV μήκους 175 km στα 40 Hz.

Το σχήμα 1.1 παρουσιάζει την εξέλιξη των επιπέδων τάσης. Μερικά σημαντικά σημεία “σταθμοί” μπορούν να αναφερθούν:

- 1891: πρώτη τριφασική μεταφορά μεταξύ Lauffen και Φρανκφούρτης, στη Γερμανία
- 1911: γραμμή μεταφοράς 110 kV μεταξύ Lauchhammer και Riesa, στη Γερμανία
- 1929: μεταφορά στα 220 kV μεταξύ Brauweiler και Hoheneck, στη Γερμανία
- 1932: μεταφορά στα 287 kV μεταξύ Boulder darn και Λος Αντζελες, στις ΗΠΑ
- 1952: μεταφορά στα 380 kV μεταξύ Harspranget και Halsberg, στη Σουηδία
- 1965: μεταφορά στα 725 kV μεταξύ Manicouagan και Μόντρεαλ, στον Καναδά
- 1985: μεταφορά στα 1200 kV μεταξύ Ekibastuz και Kokchetav, στην πρώην Σοβιετική Ένωση.



Σχήμα 1.1 : Εξέλιξη τάσεων μεταφοράς τριφασικών δικτύων εναλλασσομένου ρεύματος

Σύμφωνα με το πρότυπο EN (European) 60071 και τη γενική χρήση, λαμβάνεται η ακόλουθη διαβάθμιση της τάσης:

- Κάτω από 1 kV : Χαμηλή τάση (LV),
- Μεταξύ 1 kV και 45 kV : Μέση τάση (MV),
- Μεταξύ 45 kV και 300 kV : Υψηλή τάση (HV),
- Μεταξύ 300 kV και 750 kV : Υπερυψηλή (Extra-High) τάση (EHV),
- Πάνω από 800 kV : Υπερυψηλή (Ultra-High) τάση (UHV).

Ενώ στην κεντρική και δυτική Ευρώπη η υψηλότερη τάση μεταφοράς είναι 400 kV, όπως παρουσιάζεται ανωτέρω, 500 kV και 800 kV έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε άλλες χώρες του κόσμου, όπως στον Καναδά, την Κίνα, τις ΗΠΑ, τη Βραζιλία, τη Ρωσία, τη Νότια Αφρική και την Ινδία. Η τάση μεταφοράς 1200 kV έχει χρησιμοποιηθεί στην πρώην Σοβιετική Ένωση και σήμερα στο Καζακστάν, ενώ στην Ιαπωνία γραμμές μεταφοράς με τέτοια τάση είναι υπό κατασκευή. Δεν υπάρχει προς το παρόν κανένα σχέδιο για μεταφορά εναλλασσόμενου ρεύματος με τάσεις πάνω από 1200 kV.

1.1.2 Εισαγωγή στις τάσεις μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς αποτελούν τους συνδετικούς κρίκους μεταξύ του σταθμού παραγωγής και των συστημάτων διανομής, καθώς επίσης και τις συνδέσεις μεταξύ των συστημάτων μεταφοράς. Τα συστήματα διανομής τροφοδοτούν μεμονωμένους καταναλωτές ή τοποθεσίες. Τα επίπεδα τάσης των γραμμών μεταφοράς, είτε εναέριων είτε υπογείων καλωδίων, επιλέγονται με βάση την ισχύ που μεταφέρεται σε μια ορισμένη περιοχή ή παρέχεται σε έναν καταναλωτή.

Το πλεονέκτημα των υψηλότερων επιπέδων τάσης της γραμμής μεταφοράς εμφανίζεται ξεκάθαρα όταν δίνεται σημασία στη ικανότητα μεταφοράς μιας γραμμής, η οποία αυξάνεται με το τετράγωνο της τάσης. Επί πλέον, οι μειωμένες απώλειες, τις οποίες συνεπάγεται η μεταφορά με υψηλότερα επίπεδα τάσης, καθιστούν οικονομικότερη τη λειτουργία με τις τάσεις αυτές.

Nominal voltage (kV)	Highest system voltage (kV)
3	3,6
6	7,2
10	12
15	17,5
20	24
30	36
45	52
50	72,5
60	72,5
63	72,5
66	72,5
70	82,5
90	100
110	123
132	145
150	170
220	245
225	245
275	300
380	420
400	420
480	525
700	765

Πίνακας 1.1 : Ονομαστικές τάσεις και αντίστοιχες μέγιστες τάσεις συστήματος σύμφωνα με το πρότυπο IEC

Ο πίνακας 1.1 παρουσιάζει επίπεδα τάσης. Οι τάσεις στην περιοχή από 2 έως 30 kV χρησιμοποιούνται κυρίως για την τροφοδότηση των φορτίων διανομής μέχρι περίπου 10 MVA για ένα κύκλωμα. Η περιοχή μεταξύ 60 και 145 kV είναι ιδιαιτέρως κατάλληλη για την περιφερειακή μεταφορά ή για την τροφοδότηση μεγάλων μεμονωμένων καταναλωτών, καθώς επίσης και για τη μεταφορά ενέργειας από μεσαίου μεγέθους εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Η μεγαλύτερη δυνατή μεταφερόμενη ισχύς τέτοιων επιπέδων τάσης είναι περίπου 100 με 150 MVA ανά κύκλωμα.

Τα επίπεδα τάσης από 145 έως 300 kV θεωρούνται ως ενδιάμεσοι σύνδεσμοι μεταφοράς και χρησιμοποιούνται εκτενώς για τη διασύνδεση περιφερειακών συστημάτων σε περιοχές με συγκέντρωση υψηλού φορτίου. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά μεσαίου μεγέθους ισχύων (εύρος διακύμανσης από 150 μέχρι περίπου 400 MVA) για σχετικά μεγάλες αποστάσεις, ειδικά σε χώρες μεγάλες, όπως στις ΗΠΑ, τον Καναδά, τη Ρωσία και τις μεγάλες χώρες στη Νότια Αμερική και την Ασία. Οι τάσεις των 380, 500 και 765 kV ανήκουν στην υπερυψηλή τάση (EHV) με μια ήδη εκτενή χρήση για τη μεταφορά υψηλών ποσοτήτων ισχύος, που κυμαίνονται από 500 μέχρι 4000 MVA ανά κύκλωμα, καθώς επίσης και για τη

διασύνδεση δικτύων. Εκτός από τις τάσεις που τυποποιούνται από την IEC (International Electrotechnical Commission), η ονομαστική τάση των 500 kV, που έχει υψηλότερη τάση συστήματος 550 kV, έχει διαδεδομένη χρήση σε διάφορες χώρες.

Όπως βλέπουμε στον πίνακα 1.1, τα πρότυπα IEC 60038 και IEC 60071-1 καθιερώνουν δύο πεδία τυποποιημένων τάσεων, δηλαδή

- Πεδίο I : υψηλότερη τάση λειτουργίας μεταξύ 1 και 245 kV
- Πεδίο II : υψηλότερες τάσεις λειτουργίας μεταξύ 300 και 765 kV

Οι Υπερψηλές (Ultra-High) τάσεις (UHV) είναι στη περιοχή από 800 έως 1500 kV. Για την τροφοδότηση της μεγάλης μητρόπολης του Τόκιο στην Ιαπωνία κατασκευάστηκε ένα δίκτυο 1000 kV, ενώ στη Ρωσία μια εναέρια γραμμή 1200 kV μήκους 2500 km είναι ήδη σε λειτουργία για τη μεταφορά μιας μεγάλης ποσότητας ισχύος από το Βόρειο Καζακστάν στο Ural.

Κατά την επιλογή της τάσης για μια γραμμή, ειδικά στο επίπεδο της υπερψηλής τάσης (EHV), προσοχή πρέπει να δοθεί στις παραμέτρους που είναι σχετικές με τη διασύνδεση των συστημάτων, την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα. Η διασύνδεση αυξάνει το ποσό του ρεύματος που ρέει όταν συμβαίνει βραχυκύκλωμα και απαιτεί ακριβή και επιλεκτική σχεδίαση των ηλεκτρονόμων, των διακοπών, καθώς και έλεγχο, για να αποφευχθούν μεγαλύτερες διαταραχές.

Επιπλέον, η χρήση ειδικών διατάξεων, όπως οι πυκνωτές σειράς, η σταθερή αντιστάθμιση, τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος (FACTS), καθώς επίσης και οι γραμμές φορτίου υψηλής χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης, μπορεί να διαδραματίσει κάποιο ρόλο στην επιλογή της καταλληλότερης τάσης για μια γραμμή.

1.2 Επιλογή των αγωγών

Η επιλογή των αγωγών, η διατομή και οι διατάξεις τους αποτελούν σημείο κλειδί για μια γραμμή μεταφοράς, επειδή οι αγωγοί αντιπροσωπεύουν ένα ποσοστό μεταξύ 30% και 35% των συνολικών επενδύσεων της γραμμής. Η επιλογή του βέλτιστου αγωγού είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ των μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων του, καθώς επίσης και της επένδυσης και του κόστους των απωλειών κατά τη διάρκεια ζωής της γραμμής.

Οι αγωγοί χαλκού ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποιήθηκαν στις εναέρια γραμμές, αλλά σύντομα αποδείχθηκε τεχνικά δύσκολο να χρησιμοποιηθούν ανοίγματα μεγάλου μήκους λόγω της υψηλής αναλογίας τους βάρους προς την αντοχή. Εκτός αυτού, οι δαπάνες των αγωγών χαλκού ήταν υψηλές. Οι αγωγοί αλουμινίου που έχουν μικρότερη αγωγιμότητα από τους αγωγούς χαλκού (περίπου 62 %) εισήχθησαν περίπου το 1900 για λόγους χαμηλότερου κόστους. Εντούτοις, ήταν επίσης ακατάλληλοι για τη χρησιμοποίηση σε ανοίγματα μεγάλου μήκους λόγω χαμηλής αντοχής. Η εισαγωγή των αγωγών αλουμινίου με ενίσχυση χάλυβα (ACSR) συνδύασε τις σχετικά καλές ηλεκτρικές ιδιότητες του αλουμινίου με την υψηλή αντοχή του χάλυβα, σε λογικές επενδύσεις.

Άλλοι τύποι αγωγών έχουν αναπτυχθεί με την πάροδο των ετών, όπως οι αγωγοί κραμάτων αλουμινίου που έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τους αγωγούς ACSR και δεν έχουν προβλήματα διάβρωσης, όπως συμβαίνει μερικές φορές με τον πυρήνα των αγωγών ACSR όταν εγκαθίστανται σε δραστικά περιβάλλοντα.

Το φαινόμενο Corona είναι ένα άλλο σημείο που πρέπει να εξεταστεί για την επιλογή των αγωγών για τις εναέρια γραμμές. Είναι συνάρτηση του επιπέδου της τάσης και εξαρτάται επίσης από τη διαμόρφωση της γραμμής και των αγωγών.

Οι αγωγοί πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε να μειώνουν τις επιδράσεις ηλεκτρικής προέλευσης στο περιβάλλον. Τέτοιες επιδράσεις όπως τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, οι ραδιοφωνικές παρεμβολές και ο ακουστικός θόρυβος είναι αυξανόμενου ενδιαφέροντος κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών. Πρέπει, επομένως, να δοθεί προσοχή στη μείωση τέτοιων επιδράσεων σε ανεκτά όρια.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλες τις επιδράσεις και τις μεταβλητές που περιγράφονται ανωτέρω καθώς επίσης και την απαιτούμενη διάρκεια ζωής της γραμμής, μπορεί να πραγματοποιηθεί μια μελέτη βελτιστοποίησης για την επιλογή του καλύτερου τεχνικού και οικονομικού αγωγού.

Μια τέτοια μελέτη λαμβάνει υπ' όψιν τις αρχικές επενδύσεις και επίσης το κόστος των απωλειών κατά τη διάρκεια ζωής της γραμμής, ανάγοντας τέτοια κόστη στην παρούσα αξία, προκειμένου να υπάρξει η ίδια βάση για τη σύγκριση αριθμών για τις διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις.

Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι άλλες μεταβλητές υποκειμενικής φύσης είναι μερικές φορές εξίσου σημαντικές όπως η τυποποίηση, δυσκολίες απόκτησης ζώνης διέλευσης για νέες γραμμές στο μέλλον, πολιτικοί λόγοι κλπ.

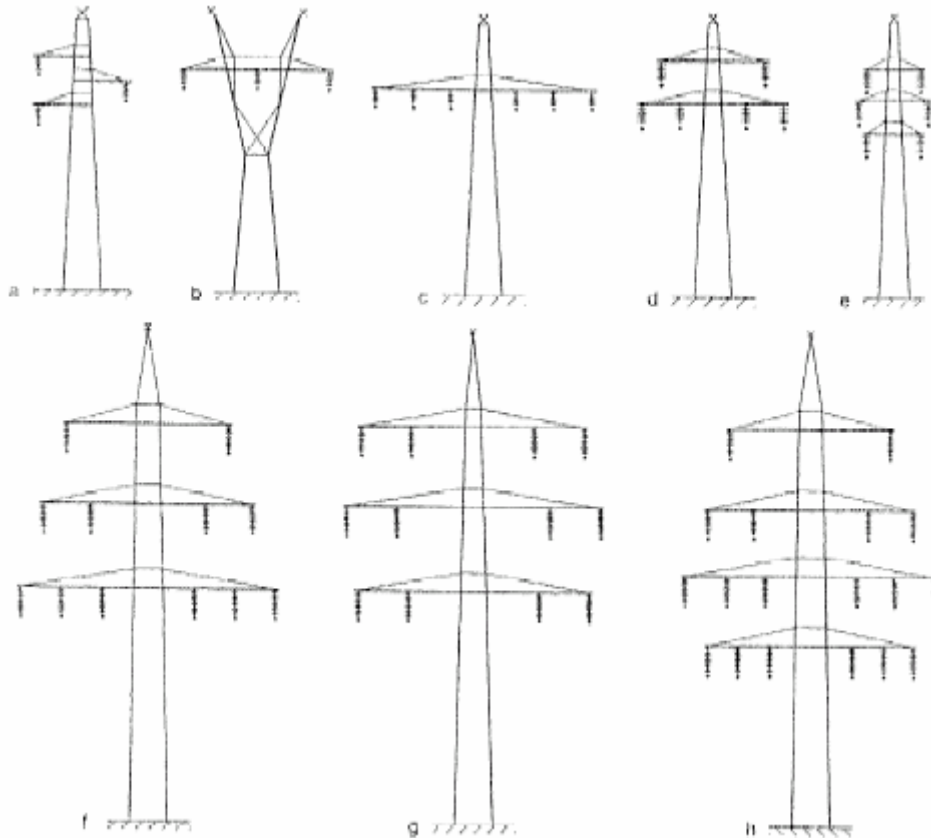
1.3 Επιλογή της διαμόρφωσης της γραμμής

Η επιλογή της βασικής διαμόρφωσης του πυλώνα για μια εναέρια γραμμή εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους αρχίζοντας από την τάση, τον αριθμό των κυκλωμάτων ανά πυλώνα, συμπεριλαμβανομένου του τύπου των απλών ή πολλαπλών αγωγών που χρησιμοποιούνται. Αν είναι απαραίτητο, η χρήση και η τοποθέτηση αγωγών για να προστατεύσουν τους αγωγούς φάσης ενάντια στα άμεσα κεραυνικά πλήγματα θα αυξήσει την αξιοπιστία της γραμμής. Για την επιλογή της διαμόρφωσης του πυλώνα για γραμμές υψηλής τάσης με μειωμένα περιβαλλοντικά κριτήρια, προσοχή πρέπει να δοθεί στα μέγιστα αποδεκτά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, τις ραδιοφωνικές παρεμβολές και τον ακουστικό θόρυβο, καθώς επίσης και στην αισθητική και οπτική αντίληψη της γραμμής και την εισαγωγή της στο τοπίο. Η ανάγκη σύμπτυξης για την απόκτηση φορτίου υψηλής χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης και τη μείωση του πλάτους της ζώνης διέλευσης είναι επίσης ένας καθοριστικός παράγοντας.

Κατά την εξέταση των γραμμών στις πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπως οι αστικές και προαστιακές περιοχές, όπου τα υπόγεια καλώδια δεν είναι αναγκαία, έχουν γενικά υιοθετηθεί συμπαγείς δομές, κατά κανόνα με κάθετη διαμόρφωση αγωγών διπλού κυκλώματος. Οι πολυγωνικοί χαλύβδινοι στύλοι ή οι στύλοι από μπετόν είναι γενικά μια καλή επιλογή σε τέτοιες περιπτώσεις.

Για τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, μια ευρεία ποικιλία διαμορφώσεων γραμμής χρησιμοποιείται παγκοσμίως. Ανάλογα με τις απαιτήσεις διαθεσιμότητας και αναγκαιότητας ως προς τη ζώνη διέλευσης, κατασκευάζονται γραμμές απλού, διπλού κυκλώματος ή γραμμές πολλαπλών κυκλωμάτων. Στις πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπως η κεντρική Ευρώπη και η Ιαπωνία, απαιτείται η σύμπτυξη των κυκλωμάτων, με συνέπεια οι γραμμές να περιλαμβάνουν τέσσερα και περισσότερα κυκλώματα, με διαφορετικές τάσεις και διαφορετικούς ιδιοκτήτες, αν και οι γραμμές πολλαπλών κυκλωμάτων συντελούν σε σημαντικά λειτουργικά και οικονομικά μειονεκτήματα. Οι γραμμές πολλαπλών κυκλωμάτων είναι πιο ευρείας κλίμακας και μεγάλες επενδύσεις πρέπει να γίνουν για την ικανοποίηση παρουσών και μελλοντικών απαιτήσεων του συστήματος.

Μερικές διαμορφώσεις γραμμής που χρησιμοποιούνται στην κεντρική Ευρώπη παρουσιάζονται στο σχήμα 1.2. Οι περισσότερες από αυτές που παρουσιάζονται έχουν χρησιμοποιηθεί, επίσης, σε άλλες περιοχές με δύο θωρακισμένους αγωγούς για να βελτιώσουν την προστασία ενάντια στα άμεσα κεραυνικά πλήγματα.

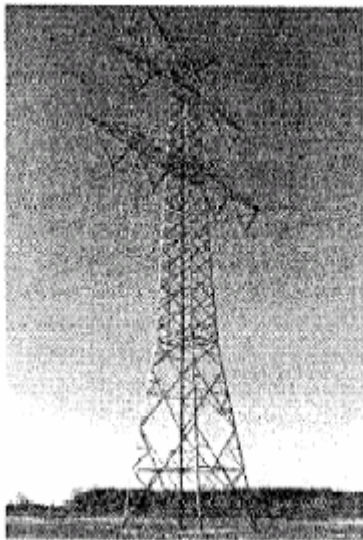


Σχήμα 1.2 : Πυλώνες υψηλής και υπερυψηλής τάσης

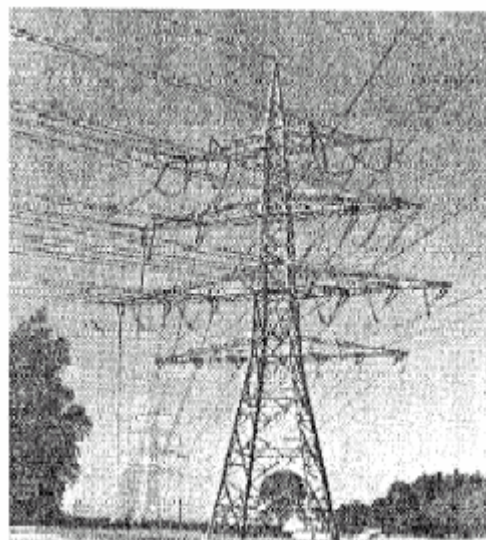
Όταν κατασκευάζονται γραμμές απλού κυκλώματος, η διαμόρφωση 1.2 a προτιμάται λόγω των περιορισμένων απαιτήσεων ως προς τη ζώνη διέλευσης, ενώ η διαμόρφωση 1.2 b πολύ συχνά υιοθετείται σε άλλες περιοχές. Αυτή η διάταξη συντελεί σε σχετικά χαμηλά φορτία θεμελίωσης. Για τις γραμμές διπλού κυκλώματος 110, 220 και 380 kV στην Ευρώπη ο τύπος Danube (1.2 b) ή κάθετες διαμορφώσεις (1.2 e) προτιμώνται σήμερα. Η εικόνα 1.1 παρουσιάζει έναν πυλώνα ευθυγραμμίας μιας γραμμής 380 kV διπλού κυκλώματος. Η διαμόρφωση Danube παρέχει έναν συμβιβασμό μεταξύ του πλάτους της ζώνης διέλευσης, του ύψους του πυλώνα και των επενδύσεων, με αποτελεσματική προστασία ενάντια στα άμεσα κεραυνικά πλήγματα. Η κάθετη διαμόρφωση σύμφωνα με το σχήμα 1.2 e συντελεί σε μια στενή ζώνη διέλευσης αλλά αυξάνει το ύψος του πυλώνα και την ορατότητα της γραμμής. Η επίδραση της διαμόρφωσης του πυλώνα στις επενδύσεις εξαρτάται από τις ιδιαίτερες συνθήκες της διαδρομής της γραμμής.

Για τις γραμμές πολλαπλών κυκλωμάτων χρησιμοποιείται μια ποικιλία διαμορφώσεων. Σε συνδυασμό με τα κυκλώματα των 220 ή 380 kV τα κυκλώματα των 110 kV διατάσσονται οριζόντια κάτω από τα κυκλώματα των υψηλότερων τάσεων (1.2 f). Αυτή η διάταξη είναι συμφέρουσα λαμβάνοντας υπ' όψιν τη μείωση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων κάτω από τη γραμμή. Τέσσερα κυκλώματα που έχουν το ίδιο επίπεδο τάσης μπορούν να διαταχθούν όπως στο σχήμα 1.2 g. Τρεις φάσεις που τοποθετούνται κάθετα ή δύο φάσεις του ανώτερου και μια φάση του ενδιάμεσου εγκάρσιου βραχίονα διαμορφώνουν ένα κύκλωμα. Έξι κυκλώματα διατάσσονται όπως στον σχήμα 1.2 h, όπου είναι δύο κυκλώματα των 380 kV, δύο των 220 kV και δύο των 110 kV.

Μια γραμμή έξι κυκλωμάτων 380/220/110 kV, που κατασκευάστηκε στη Γερμανία λόγω έλλειψης ξεχωριστών ζωνών διέλευσης παρουσιάζεται στην εικόνα 1.2.

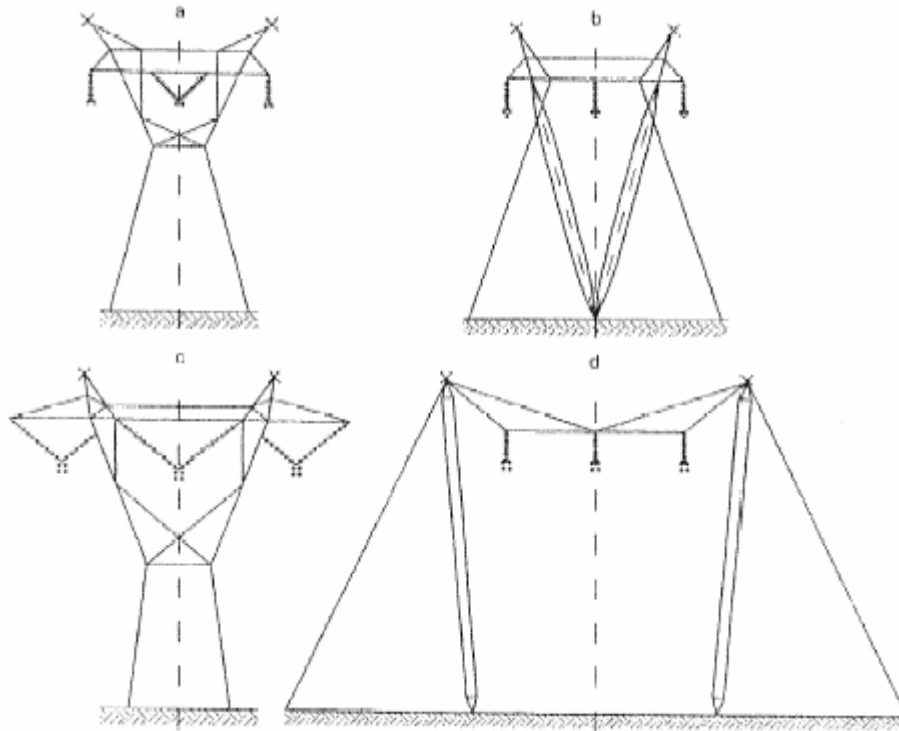


Εικόνα 1.1 : Πυλώνας ευθυγραμμίας γραμμής 380 kV διπλού κυκλώματος στη Γερμανία



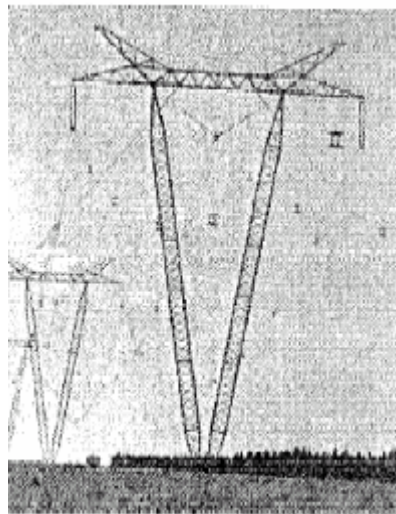
Εικόνα 1.2 : Πυλώνας τομής γραμμής 380/220/110 kV έξι κυκλωμάτων στη Γερμανία

Για την περιοχή από 500 kV και πάνω, και ειδικά για τις γραμμές μεγάλου μήκους, η χρήση δομών με καλώδια στήριξης (guyed) έχει γίνει όλο και περισσότερο διαδεδομένη. Είτε τύποι με καλώδια στήριξης σε σχήμα V, Y είτε τύποι σε σχήμα Π έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς.



Σχήμα 1.3 : Διαμορφώσεις πυλώνων για γραμμές 500 kV (a και b) και 500 kV (c και d)

Πρέπει να αναφερθεί ότι η χρήση πυλώνων χωρίς εγκάρσιους βραχίονες με διαφορετικές γεωμετρίες του άνω τμήματος του κορμού του πυλώνα έχει εξεταστεί επίσης σε διάφορες χώρες. Τέτοιοι πυλώνες παρουσιάζουν καλή απόδοση τεχνικά και οικονομικά, ειδικά εάν δεν υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί σχετικά με την απόκτηση ζωνών διέλευσης. Ένας πυλώνας με καλώδια στήριξης μιας γραμμής 500 kV στη Βραζιλία παρουσιάζεται στην εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.2 : Πυλώνας ευθυγραμμίας γραμμής 500 kV στη Βραζιλία

1.4 Επενδύσεις

Η επένδυση για να κατασκευαστεί μια εναέρια γραμμή μεταφοράς εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Η τάση της γραμμής, ο αριθμός των κυκλωμάτων και η διατομή του αγωγού είναι τα σημαντικότερα στοιχεία. Εντούτοις, άλλοι παράγοντες συμβάλλουν σημαντικά στην αύξηση ή μείωση των απαιτούμενων επενδύσεων, όπως τα ύψη των πυλώνων, χαρακτηριστικά της διαδρομής της γραμμής και η προκύπτουσα σχέση μεταξύ των πυλώνων ευθυγραμμίας στους πυλώνες τομής, καθώς και τα εξωτερικά φορτία, για παράδειγμα τα φορτία του αέρα και του πάγου. Ο βαθμός αξιοπιστίας και ασφάλειας που απαιτούνται μπορεί να διαδραματίσει έναν σημαντικό ρόλο στις συνολικές επενδύσεις. Επιπλέον, οι αποζημιώσεις που πληρώνονται στους κατόχους της γης έχουν αυξηθεί αισθητά κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, φτάνοντας σε μερικές περιπτώσεις σχεδόν το ποσό των επενδύσεων για την ίδια τη γραμμή.

Οι εξισώσεις για την πρόχειρη εκτίμηση των επενδύσεων για τις γραμμές μεταφοράς είχαν ως παραμέτρους την ονομαστική τάση, τις διατομές του αλουμινίου και τον αριθμό των συρματιδίων των αγωγών ανά φάση. Με βάση αυτές τις εξισώσεις, οι συντελεστές αναβαθμίστηκαν για να προσαρμόσουν τις σχέσεις στο επίπεδο επένδυσης στην κεντρική Ευρώπη σήμερα. Για τις γραμμές διπλού κυκλώματος μια εκτίμηση για την επένδυση χωρίς αποζημιώσεις μπορεί να προκύψει από την ακόλουθη σχέση

$$K_{2C} \approx 60 + 0,4U_N + 0,4\sqrt[4]{n_2} \cdot A_{A_1} \text{ (kEUR/km)}, \quad (1.1)$$

όπου U_N είναι η ονομαστική τάση σε kV, n_2 ο αριθμός των συρματιδίων των αγωγών και A_{A_1} η συνολική διάμετρος του αλουμινίου ή του κράματος αλουμινίου σε mm^2 . Η απαιτούμενη επένδυση για τις γραμμές απλού κυκλώματος μπορεί να προκύψει από την ακόλουθη σχέση

$$K_{1C} \approx 0,45 \text{ με } 0,5K_{2C} . \quad (1.2)$$

Η επένδυση για μια γραμμή απλού κυκλώματος είναι λιγότερο από τη μισή σε σχέση με τις γραμμές διπλού κυκλώματος, όπως έχει αποδειχθεί στην πράξη. Επομένως, οι γραμμές απλού κυκλώματος είναι η πλεονεκτικότερη λύση σε πολλές χώρες.

Οι επενδύσεις για μια γραμμή διπλού κυκλώματος με το ένα κύκλωμα εγκατεστημένο αρχικά υπολογίζονται ως ακολούθως

$$K_{2D(1)} \approx 0,75 \text{ με } 0,8K_{2C} \quad (1.3)$$

και για τις αντίστοιχες για μια γραμμή που περιλαμβάνει τέσσερα κυκλώματα έχουμε

$$K_{4C} \approx 2,1 \text{ με } 2,2K_{2C} . \quad (1.4)$$



ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΕ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ

2.1 Μηχανική σχεδίαση εναέριας γραμμής

2.1.1 Μέρη και στοιχεία μιας εναέρια γραμμής

Οι πρόσφατες μέθοδοι σχεδίασης εναέριων γραμμών θεωρούν μια εναέρια γραμμή ως σύστημα που αποτελείται από μεμονωμένα μέρη. Το σχέδιο του συστήματος επιτρέπει να συντονιστεί η μηχανική αντοχή αυτών των μερών, λαμβάνοντας υπ' όψιν το γεγονός ότι η βλάβη οποιουδήποτε μέρους μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια της πλήρους ικανότητας μεταφοράς. Το σύστημα εναέριων γραμμών διαιρείται σε τέσσερα μέρη: στηρίγματα, θεμέλια, αγωγούς και συνδέσεις. Τα στηρίγματα μπορούν να είναι πυλώνες ευθυγραμμίας, γωνίας, τομής ή τέρματος.

Κάθε μέρος διαιρείται σε στοιχεία. Στην περίπτωση των στηριγμάτων, αυτά τα στοιχεία είναι χαλύβδινα, ξύλινα ή σκυρόδετα τμήματα, κοχλίες καθώς επίσης και καλώδια στήριξης και τα εξαρτήματα αυτών. Τα θεμέλια αποτελούνται από σκυρόδετους κορμούς, πασσάλους, χαλύβδινη σχάρα θεμελίωσης ή δομές φτιαγμένες από σκυρόδετους και χαλύβδινους πασσάλους. Οι αγωγοί δεν υποδιαιρούνται σε στοιχεία. Τα στοιχεία των συνδέσεων είναι μονωτήρες και λοιπός εξοπλισμός.

2.1.2 Αξιοπιστία

Η αξιοπιστία ενός συστήματος εκφράζει την πιθανότητα ότι το σύστημα αυτό θα αντέξει μια δεδομένη περίοδο, π. χ. ένα έτος, χωρίς να προκύψει κάποια βλάβη.

Για την εκτίμηση της αξιοπιστίας μιας γραμμής μεταφοράς χρειάζεται να εξεταστεί αφενός μεν η αντοχή του συστήματος μεταφοράς, η οποία αντιπροσωπεύεται από την αντοχή του πιο αδύναμου μέρους και αφετέρου δε η επίδραση των φορτίων που προκύπτουν από τις κλιματολογικές συνθήκες.

Για το λόγο αυτό ακολουθεί ανάλυση των φορτίων αυτών.

2.2 Φορτία αέρα

2.2.1 Μετρήσεις αέρα

Οι μετρήσεις αέρα πραγματοποιούνται και αξιολογούνται παγκοσμίως από μετεωρολογικούς σταθμούς παρατήρησης. Έτσι, χρησιμοποιούνται οι οδηγίες της παγκόσμιας μετεωρολογικής οργάνωσης (WMO), ειδικά προκειμένου να συγκριθούν τα συλλεχθέντα στοιχεία με τις μακροχρόνιες σειρές τυποποιημένων μετρήσεων. Οι σταθμοί παρατήρησης πρέπει να τοποθετούνται σε μια ανοικτή έκταση, όπου ο αέρας δεν θα επηρεάζεται από εμπόδια ή κτήρια. Το ύψος επάνω από το έδαφος είναι τυποποιημένο στα 10 m. Κατά τη χρησιμοποίηση άλλων υψών μέτρησης τα αποτελέσματα πρέπει να διορθωθούν αναλόγως. Για την αξιολόγηση χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές δεκαλέπτου ή μιας ώρας. Επίσης, καταγράφονται οι ριπές ανέμου διάρκειας τριών έως πέντε δευτερολέπτων και η κατεύθυνση του αέρα. Σε περίπτωση συνεχών μετρήσεων είναι συνηθισμένο να πραγματοποιείται μια εκτίμηση δεκαλέπτου κάθε ώρα. Για την εφαρμογή των στοιχείων του αέρα για τη σχεδίαση των εναέριων γραμμών, δεχόμαστε ότι οι μέγιστες ετήσιες τιμές των ταχυτήτων του αέρα είναι διαθέσιμες για τουλάχιστον είκοσι έτη και έχουν υπολογιστεί στατιστικά.

Στη μετεωρολογία και στο ευρύ κοινό η διαβάθμιση της δύναμης του αέρα σύμφωνα με την κλίμακα Beaufort υιοθετείται συχνά, όπου τα αποτελέσματα του αέρα συνδέονται με τις αντίστοιχες ταχύτητες αέρα. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η κλίμακα Beaufort.

Beaufort Force Number	Term	Indications		Wind velocity in m/s
		on land	on sea	
0	calm	smoke rise vertically	sea like mirror	0 to 0,2
1	light air	smoke drifts slowly down-wind	ripples with appearance of scales: no foam crests	0,3 to 1,5
2	light breeze	leaves rustle	small wavelets; crests of glassy appearance, not breaking	1,6 to 3,3
3	gentle breeze	leaves are in motion	large wavelets; crests begin to break; scattered white-caps	3,4 to 5,4
4	moderate breeze	small branches on trees move	small waves, becoming longer; numerous whitecaps	5,5 to 7,9
5	fresh breeze	small trees sway	moderate waves, taking longer form; many white-caps; some spray	8,0 to 10,7
6	strong breeze	large branches sway	larger waves forming; white-caps everywhere; more spray	10,8 to 13,8
7	near gale	whole trees in motion	sea heaps up; white foam from breaking waves begins to be blown in streaks	13,9 to 17,1
8	gale	twigs and small branches break off trees	moderately high waves of greater length; edges of crests begin to break into spindrift; foam is blown in well-marked streaks	17,2 to 20,7
9	strong gale	large branches break off trees; slight structural damage	high waves; sea begins to roll; dense streaks of foam; spray may reduce visibility	20,8 to 24,4
10	storm	trees broken; minor structural damage	very high waves with overhanging crests; sea takes white appearance as foam is blown in very dense streaks; rolling is heavy and visibility is reduced	24,5 to 28,4
11	violent storm	widespread damage	exceptionally high waves; sea covered with white foam patches; visibility further reduced	28,5 to 32,6
12	hurricane	violent movement of trees and much destruction	air filled with foam; sea completely white with driving spray; visibility greatly reduced	32,7 to 36,9
13	hurricane	---	---	36,9 to 41,1
14	hurricane	---	---	41,2 to 45,8
15	hurricane	---	---	45,9 to 50,8
16	hurricane	---	---	50,9 to 55,6
17	hurricane	---	---	above 55,6

Πίνακας 2.1 : Κλίμακα Beaufort της ταχύτητας του αέρα

2.2.2 Καθορισμός ταχυτήτων αέρα μετεωρολογικής αναφοράς

2.2.2.1 Εκτίμηση των μετρήσεων αέρα

Το φορτίο του αέρα Q_w είναι ανάλογο προς το τετράγωνο της ταχύτητας του αέρα V

$$Q_w = kV^2 . \quad (2.1)$$

Ο παράγοντας k εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως η διάμετρος των αγωγών, ο συντελεστής οπισθέλκουσας, οι συντελεστές απόκρισης ριπής ανέμου κλπ. Από τη στατιστική κατανομή των ταχυτήτων του αέρα η παραπάνω εξίσωση αποδίδει μια κατανομή των φορτίων του αέρα, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με την κατανομή των αντοχών του στηρίγματος για την εκτίμηση της αξιοπιστίας, σε περίπτωση φορτίου αέρα.

2.2.2.2 Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους

Η τραχύτητα του εδάφους έχει επίδραση στις ταχύτητες του αέρα για τη σχεδίαση και στους συντελεστές απόκρισης ριπής ανέμου. Όσο μεγαλύτερη η τραχύτητα, τόσο πιο άστατη και πιο αργή θα είναι η ροή του αέρα.

2.2.2.3 Μεταβολή της ταχύτητας του αέρα με το ύψος

Για άλλα ύψη z , πλην των 10 m, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο νόμος δύναμης

$$V_{xz} = V_{xR} \cdot (z/10)^\alpha \quad (2.2)$$

ή ο λογαριθμικός νόμος

$$V_{xz} = k_T V_B \ln(z/z_0) \quad (2.3)$$

σύμφωνα με το πρότυπο EN 50341-1, όπου οι παράμετροι α , k_T and z_0 προκύπτουν από πίνακες, ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους.

2.2.3 Δράση του αέρα στα μέρη και τα στοιχεία της γραμμής

Η τιμή της δύναμης Q_w λόγω του αέρα που φυσά οριζόντια και κάθετα σε οποιοδήποτε στοιχείο μιας γραμμής δίνεται από τη σχέση

$$Q_{wx} = q_z \cdot G_q \cdot G_x \cdot C_x \cdot A, \quad (2.4)$$

όπου q_z είναι η δυναμική πίεση του αέρα στο ύψος z , G_q ο συντελεστής απόκρισης ριπής του ανέμου και G_x ο συντελεστής δομικού συντονισμού για το δομικό στοιχείο που εξετάζεται, C_x ο συντελεστής οπισθέλκουσας ανάλογα με τη μορφή του υπό εξέταση στοιχείου και A η περιοχή του στοιχείου που προβάλλεται σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση του αέρα. Εντούτοις, οι παράμετροι της ανωτέρω εξίσωσης καθορίζονται διαφορετικά στα σχετικά πρότυπα.

Η δυναμική πίεση του αέρα q_z στο ύψος z επάνω από το έδαφος καθορίζεται από τη σχέση

$$q_z = 1/2 \rho V_z^2, \quad (2.5)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα και V_z η ταχύτητα αναφοράς του αέρα σε m/s. Η πυκνότητα του αέρα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το ύψος της γραμμής πάνω από το επίπεδο της θάλασσας και μπορεί να ληφθεί από τη σχέση

$$\rho = \rho_0 (288/T) \exp(-0,00012 \cdot H), \quad (2.6)$$

όπου ρ_0 είναι η πυκνότητα στους $+15^\circ\text{C}$ στη στάθμη της θάλασσας, θεωρώντας την τιμή $1,225 \text{ kg/m}^3$ ως αναφορά, T η απόλυτη θερμοκρασία και H το υψόμετρο επάνω από το επίπεδο της θάλασσας σε m. Για ύψος 1000 m και $+5^\circ\text{C}$ ($T = 278 \text{ K}$), προκύπτει μια πυκνότητα $1,126 \text{ kg/m}^3$. Μια τιμή που χρησιμοποιείται συχνά στα πρότυπα είναι $1,25 \text{ kg/m}^3$.

Ο συντελεστής απόκρισης ριπής του ανέμου λαμβάνεται από τη σχέση

$$G_q = k_g^2 = (1 + 2,28 / \ln(z/z_0))^2, \quad (2.7)$$

όπου το z είναι το ύψος επάνω από το έδαφος.

Η έκφραση $q_z \cdot G_q \cdot G_x$ αντιστοιχεί σε μια συνολική δυναμική πίεση αέρα q_z , η οποία αυξάνεται γραμμικά με το ύψος:

$$q_z = q_0 + 30 \cdot (z/10), \quad (2.8)$$

όπου q_0 είναι η βασική πίεση του αέρα ανάλογα με τη ζώνη αέρα, όπου είναι να κατασκευαστεί η γραμμή.

Η δυναμική πίεση του αέρα υπολογίζεται με βάση την ταχύτητα του αέρα $V_{R,10m}$ σε ένα ύψος 10 m επάνω από το έδαφος χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.5). Η μεταβολή με το ύψος, ο συντελεστής απόκρισης ριπής του ανέμου και ο συντελεστής δομικού συντονισμού εξετάζονται από τους συνδυασμένους συντελεστές αέρα G_C (αγωγοί) και G_T (στηρίγματα). Οι συνδυασμένοι συντελεστές αέρα G_C και G_T είναι διαφορετικοί, ενώ αυτό δεν ισχύει για τον συντελεστή απόκρισης ριπής του ανέμου.

Σε περίπτωση φορτίων αέρα στους αγωγούς, ο συντελεστής συντονισμού G_x εξαρτάται από το μήκος του ανοίγματος και καλείται συντελεστής ανοίγματος G_L .

Τα φορτία του αέρα στους μονωτήρες ομοίως υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.4), στην οποία χρησιμοποιούνται οι ίδιοι συντελεστές απόκρισης ριπής ανέμου όπως και στην περίπτωση των στηριγμάτων. Ο συντελεστής οπισθέλκουσας C_x μπορεί να υποθεθεί ότι είναι 1,2 για την περίπτωση αυτή.

2.3 Φορτία πάγου

2.3.1 Ατμοσφαιρικό πάγωμα

Το ατμοσφαιρικό πάγωμα είναι ένας γενικός όρος για διάφορες διαδικασίες, όπου το νερό σε διάφορες κρυσταλλικές μορφές παγώνει στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται στα αντικείμενα που εκτίθενται στον αέρα. Στην περίπτωση των εναέριων γραμμών υπάρχουν δύο τύποι παγώματος, οι οποίοι ονομάζονται σύμφωνα με τις κύριες διαδικασίες ως πάγωμα λόγω χιονόπτωσης ή βροχόπτωσης (“ατμοσφαιρικής κατακρήμνισης”) και πάγωμα λόγω δημιουργίας περιβλήματος όπως στα σύννεφα (incloud).

Μια τρίτη διαδικασία, όπου ο υδρατμός μετασχηματίζεται άμεσα σε πάγο και σχηματίζει παγετό, δεν οδηγεί σε σημαντικές φορτίσεις και δεν εξετάζεται περαιτέρω. Ο σχηματισμός πάγου λόγω χιονόπτωσης ή βροχόπτωσης μπορεί να εμφανιστεί σε διάφορες μορφές, δηλαδή διάφανη επίστρωση λόγω παγωμένης βροχής, επικάλυψη υγρού χιονιού και επικάλυψη ξηρού χιονιού.

Η περιφερειακή και τοπική τοπογραφία έχει επιπτώσεις στο σχηματισμό πάγου. Τα παράκτια βουνά κατά μήκος της προσήνεμης πλευράς των ηπείρων εξωθούν τον υγρό αέρα προς τα πάνω, οδηγώντας στην ψύξη του αέρα με τη συμπύκνωση του υδρατμού και την αύξηση των σταγονιδίων, με συνέπεια το πάγωμα λόγω δημιουργίας περιβλήματος όπως στα σύννεφα. Το πιο σφοδρό πάγωμα τέτοιου τύπου εμφανίζεται πάνω από το επίπεδο συμπύκνωσης και το επίπεδο παγώματος στα ανοιχτά εκτεθειμένα ύψη, όπου οι κοιλάδες των βουνών εξαναγκάζουν τον υγρό αέρα να διέλθει μέσω των περασμάτων και έτσι και ανυψώνουν τον αέρα και ενισχύουν τον άνεμο. Στη υπήνεμη πλευρά των βουνών, εντούτοις, η κάθοδος της μάζας του αέρα οδηγεί στην εσωτερική θέρμανση αυτού και την εξάτμιση των σταγονιδίων, προστατεύοντας έτσι τις εναέριες γραμμές ενέργειας που είναι τοποθετημένες εκεί για να αποφύγουν τον έντονο σχηματισμό πάγου.

Το πάγωμα λόγω χιονόπτωσης ή βροχόπτωσης μπορεί να εμφανιστεί σε οποιοδήποτε υψόμετρο. Εντούτοις, η πιθανότητα παγώματος λόγω χιονόπτωσης ή βροχόπτωσης είναι μεγαλύτερη γενικά στο κατώτατο σημείο παρά στη μέση των πλευρών μιας κοιλάδας, λόγω της εντονότερης εμφάνισης κρύου αέρα. Δεδομένου ότι η ροή του αέρα έχει σημαντική επίδραση, ο σχηματισμός πάγου στις εναέριες γραμμές, που είναι τοποθετημένες εγκάρσια σε μια κοιλάδα, είναι συχνά μεγαλύτερος σε σχέση με άλλες γραμμές που βρίσκονται κατά μήκος της κοιλάδας. Στην περίπτωση των πρώτων υπάρχει ένας πρόσθετος κίνδυνος, λόγω του ότι είναι μεγαλύτερη η πιθανότητα η δράση του αέρα να συμβεί ταυτόχρονα με την επικάλυψη των αγωγών με πάγο.

2.3.2 Παρατηρήσεις πάγου και μετρήσεις

Δεδομένου ότι τα φορτία του πάγου δεν μετριοούνται γενικά από τους μετεωρολογικούς σταθμούς, οι πληροφορίες για το σχηματισμό πάγου πρέπει να καταγραφούν άμεσα από τους εναέριους αγωγούς των γραμμών ή από τις αντίστοιχα σχεδιασμένες συσκευές παρατήρησης. Εάν τα στοιχεία που απαιτούνται για τη σχεδίαση της γραμμής δεν είναι διαθέσιμα, συνίσταται να εκτελείται ένα πρόγραμμα για τη συλλογή των στοιχείων. Τα στοιχεία του πάγου μπορούν να ληφθούν μέσω των ακόλουθων δραστηριοτήτων:

- Άμεσες μετρήσεις του στρώματος του πάγου ή του βάρους των δειγμάτων πάγου, που λαμβάνονται από τις εγκαταστάσεις παρατήρησης ή τους αγωγούς των γραμμών. Τα δείγματα πάγου που έχουν πέσει στο έδαφος από τους αγωγούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν, εάν θεωρηθεί ότι έχουν μορφή όμοια με την αρχική επικάλυψη των αγωγών.

- Μετρήσεις από τις συσκευές που προσομοιώνουν το σχηματισμό πάγου στους αγωγούς. Μερικές συσκευές που χρησιμοποιούνται αυτήν την περίοδο σε μερικές χώρες αποτελούνται από συνελεύσεις απλών σωλήνων ή καλωδίων που εγκαθίστανται κοντά στο επίγειο επίπεδο για την ευκολία των παρατηρήσεων.

- Εκτίμηση του πάγου χρησιμοποιώντας την τάνυση του αγωγού ή την κάθετη συνιστώσα του βάρους στο σημείο σύνδεσης του μονωτήρα

- Εκτίμηση του πάγου βασισμένη στις μετρήσεις της τάνυσης των αγωγών και του βέλους κάμψης.

Τα στοιχεία του φορτίου του πάγου είναι σημαντικά όχι μόνο για να καθορίσουν τα κριτήρια φόρτισης για τη σχεδίαση των στηριγμάτων, αλλά μπορούν επίσης να είναι χρήσιμα στα στάδια προγραμματισμού των δικτύων μεταφοράς και στην επιλογή της διαδρομής μιας συγκεκριμένης γραμμής. Σε περίπτωση που άλλες πληροφορίες για το φορτίο του πάγου δεν είναι διαθέσιμες, μετρήσεις με πεδίο παρατήρησης τουλάχιστον δέκα ετών είναι απαραίτητες για να συστήσουν μια αξιόπιστη βάση δεδομένων. Η παρατήρηση ακραίων φορτίων πάγου στις υπάρχουσες εναέριες γραμμές παρέχει σημαντικές πληροφορίες.

Τα μετεωρολογικά πρότυπα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για να ληφθούν βασικές πληροφορίες για τα φορτία πάγου που αναμένονται. Οι βάσεις για τέτοια μετεωρολογικά πρότυπα διαμορφώνονται από τη θερμοκρασία, την υγρασία, το ρυθμό χιονόπτωσης ή βροχόπτωσης και την κατεύθυνση του αέρα που αναμένονται. Σε μερικές χώρες της Κεντρικής Ευρώπης είχαν εγκατασταθεί σταθμοί παρατήρησης πάγου. Εντούτοις, λόγω της αραιής συχνότητας αξιοσημείωτων φορτίων πάγου, δεν είχαν επιτευχθεί πάντα χρήσιμα αποτελέσματα.

2.3.3 Καθορισμός φορτίων πάγου αναφοράς

2.3.3.1 Βασικές σχέσεις

Το φορτίο του πάγου είναι μια τυχαία μεταβλητή, που εκφράζεται συνήθως είτε ως φορτίο g_I ανά μονάδα μήκους του αγωγού, σε N/m, είτε ως ομοιόμορφο ακτινωτό πάχος t_{RI} , σε mm, γύρω από τους αγωγούς φάσης και τους αγωγούς γης. Η εξίσωση

$$g_I = 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot \delta_I \cdot \pi t_{RI} (d + t_{RI} / 1000) \quad (2.9)$$

εκφράζει τη σχέση μεταξύ του βάρους του πάγου ανά μονάδα μήκους g_I και του ακτινωτού πάχους του πάγου t_{RI} , όπου g_I είναι το βάρος του πάγου ανά μονάδα μήκους σε N/m, δ_I η πυκνότητα του πάγου σε kg/m^3 , t_{RI} το ακτινωτό πάχος πάγου σε mm και d η διάμετρος αγωγών σε m. Με την υπόθεση ότι $\delta_I = 900 \text{ kg/m}^3$ και t_{RI} και d σε mm, αυτό λαμβάνεται

$$g_I = 0,0277 t_{RI} (d + t_{RI}) \quad (\text{N/m}). \quad (2.10)$$

Τα φορτία του πάγου πρέπει ιδανικά να εξαχθούν από μετρήσεις που λαμβάνονται στους αγωγούς και σε αντιπροσωπευτικές θέσεις της διαδρομής της γραμμής.

2.3.3.2 Εκτίμηση των πληροφοριών για το φορτίο του πάγου

Η εκτίμηση των πληροφοριών για το φορτίο του πάγου βασίζεται στους διαθέσιμους τύπους των στοιχείων και στις παρατηρήσεις ετών :

- Εάν τα αρχεία των ετήσιων μέγιστων φορτίων πάγου κατά τη διάρκεια μιας περιόδου τουλάχιστον δέκα ετών είναι διαθέσιμα, η μέση τιμή $\overline{g_I}$ προσδιορίζεται από τα αρχεία του ετήσιου μέγιστου φορτίου πάγου. Η αντίστοιχη σταθερή απόκλιση σ_I υπολογίζεται ή εκτιμάται συναρτήσει της μέσης τιμής $\overline{g_I}$ των ετήσιων ακραίων φορτίων πάγου g_{Ii} .

- Εάν μόνο η μέγιστη τιμή $g_{I_{max}}$ των φορτίων πάγου που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ορισμένων ετών είναι διαθέσιμη και κανένα στατιστικό στοιχείο δεν μπορεί να εκτιμηθεί, το $\overline{g_I}$ μπορεί να θεωρηθεί ως $0,45 \cdot g_{I_{max}}$ και η σταθερή απόκλιση είναι $0,5 \overline{g_I}$.

- Ένα μετεωρολογικό μοντέλο ανάλυσης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τιμών για τα ετήσια μέγιστα φορτία πάγου κατά τη διάρκεια ορισμένων ετών. Αξιόπιστα στοιχεία θα ληφθούν εάν μελετηθεί μια περίοδος 20 ετών ή περισσότερων. Όσο είναι δυνατό, θα πρέπει να γίνεται αναφορά στις παρατηρήσεις στις γραμμές.

- Συμπεράσματα σχετικά με τα φορτία πάγου μπορούν να συναχθούν από παρατηρήσεις στο έδαφος και τη ζημιά στα δέντρα και τη βλάστηση σε περιοχές όπου αναμένονται υψηλά φορτία πάγου.

Ως αποτέλεσμα του υπολογισμού λαμβάνονται, η μέση τιμή \bar{g}_1 των ετήσιων μέγιστων παρατηρήσεων πάγου και η αντίστοιχη σταθερή απόκλιση σ_1 .

2.3.3.3 Φόρτιση του στηρίγματος και περιπτώσεις φόρτισης

Τα φορτία που αντέχουν τα στηρίγματα είναι ίσα με τα φορτία που μεταβιβάζονται στα στηρίγματα από τους αγωγούς. Αποτελούνται από τα κατακόρυφα φορτία και τις δυνάμεις τάνυσης των αγωγών, που αυξάνονται από την επίδραση της επικάλυψης τους με πάγο. Γενικά, τρεις καταστάσεις μπορούν να διακριθούν, που καλύπτουν τις περισσότερες από τις πιθανές περιπτώσεις φόρτισης :

- Ομοιόμορφη επικάλυψη πάγου σε όλους τους αγωγούς, συνθήκη μέγιστου βάρους
- Ανομοιόμορφη επικάλυψη πάγου, που συντελεί, όσον αφορά το στήριγμα, σε κατάσταση διαμήκους και εγκάρσιας κάμψης
- Ανομοιόμορφη επικάλυψη πάγου, με συνέπεια δημιουργία φορτίου στρέψης, επειδή οι μεμονωμένοι αγωγοί στα γειτονικά ανοίγματα φορτίζονται διαφορετικά

Μπορεί να υποθεθεί ότι οι ανομοιόμορφες επικαθίσεις πάγου εμφανίζονται λιγότερο συχνά από τις ομοιόμορφες. Για να ληφθεί η επαρκής προσοχή για τις αναμενόμενες επικαθίσεις πάγου, τα πρότυπα παρέχουν τις προϋποθέσεις φόρτισης που συντελούν σε στηρίγματα αρκετά ισχυρά για να αντέξουν τα φορτία που δημιουργούνται λόγω της επικάλυψης των αγωγών με πάγο.

2.4 Συνδυασμένα φορτία αέρα και πάγου

2.4.1 Πιθανότητα εμφάνισης και συνδυασμός παραμέτρων

Η δράση του αέρα στους καλυμμένους με πάγο αγωγούς περιλαμβάνει τουλάχιστον τρεις μεταβλητές :

- Την ταχύτητα του αέρα που εμφανίζεται παρουσία πάγου
- Το βάρος του πάγου και
- Τη μορφή του σχηματισμένου πάγου με τον αντίστοιχο συντελεστή οπισθέλκουσας.

Αυτά τα συνδυασμένα αποτελέσματα συντελούν άμεσα σε εγκάρσια και κατακόρυφα φορτία και έμμεσα στην αύξηση των διαμηκών φορτίων. Δεδομένου ότι τα λεπτομερή στατιστικά στοιχεία και οι παρατηρήσεις για το βάρος του πάγου, τη μορφή του πάγου και την ταυτόχρονη δράση του αέρα δεν είναι συνήθως διαθέσιμα, προτείνεται να συνδυαστούν αυτές οι μεταβλητές με τέτοιο τρόπο, έτσι που ο προκύπτων συνδυασμός φορτίων να έχει τις ίδιες περιόδους επαναφοράς με εκείνους που υιοθετούνται για κάθε επίπεδο αξιοπιστίας. Σαν απλουστευμένη προσέγγιση, μια τιμή χαμηλής πιθανότητας, που υποδεικνύεται από το δείκτη L, μιας μεταβλητής συνδυάζεται με τις τιμές υψηλής πιθανότητας, που υποδεικνύονται από το δείκτη H, για τις άλλες δύο μεταβλητές. Από πρακτικής απόψεως, η μέγιστη τιμή μιας μεταβλητής θα συνδυαστεί με τις μέσες τιμές των ετήσιων μέγιστων παρατηρήσεων των άλλων μεταβλητών για να καθορίσει μία κατάσταση φόρτισης. Μια χαμηλή πυκνότητα πάγου, επομένως, συνδυάζεται με μια χαμηλή τιμή του συντελεστή οπισθέλκουσας, ο οποίος έχει μεγάλη πιθανότητα να εμφανιστεί.

Σημειώνεται ότι όσον αφορά τα φορτία του αέρα, πρέπει να εξεταστούν μόνο εκείνα τα στοιχεία που αναμένονται κατά τη διάρκεια των περιόδων πάγου και όχι αυτά που αντιστοιχούν στις ετήσιες μέγιστες ταχύτητες αέρα. Για κάθε συνδυασμό καθορίζεται μια κατάσταση φόρτισης.

2.4.2 Δράση του αέρα στον καλυμμένο με πάγο αγωγό

Το φορτίο του αέρα σε έναν αγωγό καλυμμένο με πάγο, ενεργώντας κάθετα στο άνοιγμα και στα στηρίγματα και στις δύο άκρες του ανοίγματος, που έχει μήκος α_w , λαμβάνεται από την εξίσωση

$$Q_{wI} = 1/4\rho \cdot V_I^2 \cdot C_I \cdot G_q \cdot G_L \cdot D_I \cdot \alpha_w \cdot \cos^2 \theta , \quad (2.11)$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα, V_I η ταχύτητα του αέρα κατά τη διάρκεια της επικάλυψης με πάγο, C_I ο σχετικός συντελεστής ενεργής οπισθέλκουσας, που αντιστοιχεί στον εξεταζόμενη κατάσταση, G_q ο συντελεστής απόκρισης ριπής του ανέμου, G_L ο συντελεστής ανοίγματος, D_I η διάμετρος του ισοδύναμου κυλινδρικού σχηματισμού του πάγου, α_w το μήκος του ανοίγματος και θ η γωνία του προσπίπτοντος στον αγωγό ανέμου ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Η ισοδύναμη διάμετρος του καλυμμένου με πάγο αγωγού υπολογίζεται από τη σχέση

$$D_I = \sqrt{d^2 + 4g_I / (9,81 \cdot \pi \delta_I)}, \quad (2.12)$$

όπου d είναι η διάμετρος του αγωγού χωρίς να είναι καλυμμένος με πάγο, g_I το βάρος του πάγου ανά μονάδα μήκους και δ_I η πυκνότητα του πάγου.

Η δράση του αέρα στους καλυμμένους με πάγο αγωγούς αυξάνει την δύναμη τάνυσης τους και οδηγεί στη μέγιστη φόρτιση. Εάν ένα τανυσμένο τμήμα αποτελείται από διάφορα ανοίγματα που στηρίζονται στους μονωτήρες ανάρτησης, το ισοδύναμο μήκος ανοίγματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των δυνάμεων τάνυσης των αγωγών. Εάν το τανυσμένο τμήμα της γραμμής είναι μακρύ, το μέγιστο φορτίο του αέρα δε θα ενεργήσει ταυτόχρονα στο συνολικό τανυσμένο τμήμα. Έτσι, το φορτίο του αέρα που χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν οι δυνάμεις τάνυσης των αγωγών μπορεί να μειωθεί πολλαπλασιάζοντας με τον παράγοντα 0.6. Εντούτοις, μια τέτοια μείωση του φορτίου του αέρα για τη σχεδίαση των στηριγμάτων πρέπει να εξεταστεί με προσοχή, δεδομένου ότι τα στηρίγματα τομής μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν μόνο στις πραγματικές γραμμές για την τάνυση τμημάτων με λίγα ανοίγματα.

Σημειώνεται, για μία ακόμα φορά, ότι οι παράμετροι των ανωτέρω εξισώσεων καθορίζονται διαφορετικά στα σχετικά πρότυπα

2.5 Αντοχές των μερών και των στοιχείων της γραμμής

2.5.1 Όρια αντοχής

Τα μέρη και τα στοιχεία των εναέριων γραμμών αποδίδουν διαφορετικά σχετικά με τα όρια αντοχής τους. Σε περίπτωση εύθραυστων μερών και γεγονότων κάμψης η αποτυχία ή η απώλεια της αντοχής είναι ξαφνική και αντιστοιχεί συνήθως σε αστάθεια, ρήξη ή πλήρη διαχωρισμό. Σε άλλα μέρη η απώλεια της αντοχής είναι ένας προοδευτικός μηχανισμός. Παραδείγματος χάριν, μια σχάρα θεμελίωσης που υποβάλλεται σε ανύψωση δεν αποτυγχάνει ξαφνικά: Η ανύψωση αυξάνει σταθερά μέχρι η θεμελίωση να είναι πλήρως υψωμένη τελικά.

Δύο όρια έχουν καθοριστεί για να περιγράψουν τη συμπεριφορά της αντοχής των μερών και των στοιχείων: το όριο ζημιάς και το όριο αποτυχίας. Το όριο ζημιάς ενός μέρους αντιστοιχεί στο ελαστικό όριό του, ενώ το όριο αποτυχίας αντιστοιχεί στην πλήρη κατάρρευση ή στη ρήξη ενός μέρους ή ενός στοιχείου. Εάν το όριο ζημιάς ενός μέρους ξεπεραστεί, το σύστημα μεταφοράς θα είναι σε κατάσταση ζημιάς, ενώ εάν το όριο αποτυχίας ενός μέρους ξεπεραστεί, το σύστημα θα είναι σε κατάσταση αποτυχίας. Σε περίπτωση μερών χωρίς ένα καθορισμένο ελαστικό όριο ή όριο διαρροής υλικού, όπως τα θεμέλια, μια κατάλληλα επιλεγμένη χαρακτηριστική τιμή μπορεί να προκύψει από την καμπύλη μηχανικής τάσης - επιμήκυνσης ή φορτίου - μετατόπισης.

Τα όρια ζημιάς και αποτυχίας συσχετίζονται με τη λειτουργία της γραμμής μεταφοράς, δηλαδή με την ικανότητά της να μεταφέρει ενέργεια. Στην κατάσταση ζημιάς η λειτουργία της γραμμής θα μπορούσε να καταστεί προβληματική αλλά θα ήταν δυνατή, τουλάχιστον μερικώς, ενώ στην κατάσταση αποτυχίας η ικανότητα μεταφοράς ενέργειας θα χανόταν εντελώς.

Για μερικά μέρη η παραμόρφωση ενός στοιχείου μειώνει την αντοχή ενός άλλου στοιχείου με το οποίο το πρώτο συνδέεται. Σε αυτή την περίπτωση, το όριο ζημιάς πρέπει να καθοριστεί σε σχέση με την αντοχή του δεύτερου στοιχείου. Παραδείγματος χάριν, η μετακίνηση των θεμελίων υποστήριξης μειώνει την αντοχή του υποστηριζόμενου πυλώνα. Επομένως, τα όρια ζημιάς και αποτυχίας των θεμελίων πρόκειται να καθιερωθούν σε σχέση με τη συμπεριφορά του πυλώνα.

2.5.2 Διαβάθμιση των μεμονωμένων μερών και στοιχείων

Η χαρακτηριστική αντοχή των μεμονωμένων μερών όπως οι αγωγοί, οι μονωτήρες, οι διασυνδέσεις, οι χαλύβδινοι δικτυωτοί πυλώνες κλπ. πρέπει να ληφθούν από τις πληροφορίες του κατασκευαστή, να υπολογιστούν από τις φυσικές ιδιότητες των υλικών ή να καθοριστούν με τις τυποποιημένες ή μη τυποποιημένες μεθόδους σε μια μεμονωμένη περίπτωση.



ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙ ΜΕΡΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

3.1 Αγωγοί

Οι εναέριες γραμμές ενέργειας αποσκοπούν στη λογική και αξιόπιστη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ δύο σημείων. Οι αγωγοί μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια και είναι, επομένως, τα σημαντικότερα μέρη μιας εναέριας γραμμής ενέργειας. Οι απαραίτητες δαπάνες για την αγορά και εγκατάστασή τους αντιστοιχούν σε ένα ποσοστό μεταξύ 30% και 50% της συνολικής επένδυσης για μια εναέρια γραμμή. Πολλοί διαφορετικοί τύποι αγωγών έχουν χρησιμοποιηθεί από όταν εγκαταστάθηκαν αρχικά οι εναέριες γραμμές. Σε πολλές βιομηχανικές χώρες υπάρχουν πρότυπα για τους αγωγούς και επίσης διεθνή από την IEC και την CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization). Τα αμερικανικά πρότυπα (US) είναι επίσης διαδεδομένης χρήσης. Τα πρότυπα EN αντικατέστησαν τα εθνικά πρότυπα που ήταν έγκυρα μέχρι τώρα στις ευρωπαϊκές χώρες π.χ. στη Γερμανία τα πρότυπα αγωγών της σειράς DIN 48200. Από τα πρότυπα ο κατάλληλος αγωγός μπορεί να επιλεγεί για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Εκτός αυτού, ειδικοί εναέριοι αγωγοί μπορούν επίσης να κατασκευαστούν, όποτε κρίνεται απαραίτητο.

Οι αγωγοί είναι γυμνοί ή καλυμμένοι, μονωμένοι ή καλώδια γείωσης, αναρτημένοι μεταξύ των στηριγμάτων μιας εναέριας γραμμής, ανεξάρτητα από το εάν είναι ρευματοφόροι ή όχι. Μια δέσμη αγωγών είναι μια διάταξη δύο ή περισσότερων αγωγών που χρησιμοποιούνται αντί ενός ενιαίου αγωγού και που κρατιούνται συνήθως σε μια περίπου σταθερή απόσταση σε ολόκληρο το μήκος τους. Οι αγωγοί

είναι συρματίδια ή συνδυασμοί συρματιδίων μη μονωμένα και κατάλληλα για τη μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος. Μπορούν να είναι συρματίδια, πολύκλωνοι αγωγοί ή καλώδια από ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά, αλλά και μη μεταλλικά καλώδια οπτικών ινών για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς. Τα πρώτα δεν θα διαδραματίσουν κάποιο ρόλο για τις εναέριες γραμμές στο μέλλον.

Οι αγωγοί αποτελούνται είτε από ένα υλικό - απλοί αγωγοί - είτε από δύο υλικά - σύνθετοι αγωγοί. Οι απλοί αγωγοί μπορούν να σχηματιστούν από μονομεταλλικά ή επενδυμένα με μέταλλο χαλύβδινα συρματίδια. Οι σύνθετοι αγωγοί περιλαμβάνουν συνδυασμούς μονομεταλλικών και επενδυμένων με μέταλλο χαλύβδινων συρματιδίων.

3.1.1 Γενικά στοιχεία αγωγών

3.1.1.1 Πρόοδος στην τεχνική ανάπτυξη

Στην αρχική περίοδο μεταφοράς ενέργειας μέσω εναέριων γραμμών, γύρω στο 1880, χρησιμοποιήθηκαν αγωγοί χαλκού. Σχεδιάστηκαν εξετάζοντας περισσότερο τη μηχανική παρά την αγώγιμη και ηλεκτρική συμπεριφορά των υλικών και κατά συνέπεια η υψηλή αγωγιμότητα του χαλκού δεν χρησιμοποιήθηκε στην πλήρη έκτασή της. Επομένως, οι χρησιμοποιούμενες διατομές ήταν μεγαλύτερες από ότι χρειαζόταν, ως προς την απαιτούμενη αγωγιμότητα. Εξαιτίας του μεγάλου βάρους του χαλκού τα ανοίγματα ήταν μικρού μήκους, γεγονός το οποίο με τη σειρά του αύξησε τη συνολική επένδυση. Στα τέλη του 19ου αιώνα ο χαλκός αντικαταστάθηκε βαθμιαία από το αλουμίνιο για τις γραμμές μεταφοράς και διανομής. Οι πρώτες εναέριες γραμμές ενέργειας στις οποίες χρησιμοποιήθηκε το αλουμίνιο κατασκευάστηκαν στην Καλιφόρνια το 1895 και στη Γερμανία το 1900. Η πρώτη εναέρια γραμμή ενέργειας στην οποία χρησιμοποιήθηκε επτάκλωνος αγωγός αλουμινίου κατασκευάστηκε στο Κοννέκτικατ το 1899 και διατηρήθηκε σε λειτουργία για περισσότερο από 50 χρόνια. Μετά από αυτές τις πρώιμες εφαρμογές, η χρήση των αγωγών αλουμινίου αυξήθηκε συνεχώς, όντας το σχεδόν αποκλειστικό υλικό για τους εναέριους αγωγούς στις μέρες μας. Έως σήμερα, το αλουμίνιο έχει χρησιμοποιηθεί για τις εναέριες γραμμές για περισσότερο από 100 χρόνια. Όσον αφορά την αγωγιμότητα, το αλουμίνιο είναι δεύτερο στη σειρά των μη πολύτιμων μετάλλων, μετά το χαλκό. Η αναλογία αγωγιμότητας - βάρους είναι διπλάσια από αυτή του χαλκού και η αναλογία μηχανικής αντοχής - βάρους είναι περίπου 30% υψηλότερη.

Από την εισαγωγή του αλουμινίου το 1900, μια υψηλότερη αναλογία μηχανικής αντοχής - βάρους των αγωγών θεωρήθηκε συμφέρουσα, σε σύγκριση με το καθαρό αλουμίνιο. Επομένως, ένας σύνθετος αγωγός φτιαγμένος από αλουμίνιο και χάλυβα εμφανίστηκε το 1907. Αυτός ο αγωγός συνδύαζε το χαμηλό βάρος και την υψηλότερη ικανότητα φόρτισης του αλουμινίου με την υψηλότερη μηχανική αντοχή ενός πυρήνα χάλυβα επιψευδαργυρωμένου. Τα πλεονεκτήματα που επιτεύχθηκαν από τον αποκαλούμενο αγωγό αλουμινίου με ενίσχυση χάλυβα (ACSR) αναγνωρίστηκαν σύντομα. Χρησιμοποιήθηκαν στη Γερμανία από το 1920 και μονοπώλησαν την αγορά μέσα σε 10 χρόνια, μέχρι το 1930. Η καλή αγωγιμότητα των αγωγών, μαζί με την προνομιακή αναλογία μηχανικής αντοχής - βάρους και τον εύκολο χειρισμό τους ήταν οι λόγοι για τους οποίους εφαρμόστηκαν σχεδόν αποκλειστικά στα έργα εναέριων γραμμών ενέργειας κατά τη διάρκεια του πρώτου μισού του 20ού αιώνα.

Μετά από ορισμένα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην Ελβετία το 1921, ένα νέο κράμα αλουμινίου - μαγνησίου, που ονομάστηκε Aldrey στη Γερμανία και Almelec στη Γαλλία, εμφανίστηκε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '30. Οι μονομεταλλικοί αγωγοί κατασκευάστηκαν με αυτό το υλικό, το οποίο κατάφερε να έχει τα ίδια μηχανικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά με τους αγωγούς αλουμινίου - χάλυβα, μείωσε το βάρος και επίσης βελτίωσε την απόδοση ενάντια στη διάβρωση. Αυτοί οι αγωγοί από κράματα αλουμινίου εξ' ολοκλήρου (AAAC) και οι σύνθετοι αγωγοί (AACSR), που συνδυάζουν αυτό το υλικό με πυρήνες χάλυβα, αποτέλεσαν τις εναλλακτικές λύσεις στους αγωγούς αλουμινίου - χάλυβα. Εντούτοις, η αποδοχή αυτού του τύπου αγωγού, όπως συμβαίνει μερικές φορές με οποιοδήποτε νέο προϊόν, δεν ήταν η ίδια σε όλες τις βιομηχανικές χώρες. Στη Γαλλία, αυτός ο τύπος αγωγού χρησιμοποιείται ήδη σχεδόν αποκλειστικά για πολλά χρόνια. Σε άλλες χώρες, η χρήση του περιορίστηκε σε ειδικές εφαρμογές, λόγω απροσδόκητων προβλημάτων που προκλήθηκαν από τις μηχανικές δονήσεις των αγωγών.

Κατά τη διάρκεια των προηγούμενων ετών, εντούτοις, υπήρξε μια παγκόσμια τάση προς την επιλογή των αγωγών AAAC ή ακόμα και προς τη χρήση των σύνθετων αγωγών από κράματα αλουμινίου και χάλυβα.

Στα ακόμη πιο πρόσφατα χρόνια έχουν εμφανιστεί στην αγορά μερικά καινοτόμα σχέδια αγωγών που συμμορφώνονται με τις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας. Νέα κράματα έχουν αναπτυχθεί, τα οποία παρουσιάζουν μια καλύτερη θερμική ευστάθεια και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα καινοτόμα σχέδια, εκτός από άλλα ειδικά χαρακτηριστικά, βελτίωσαν και την ικανότητα αντοχής στις μηχανικές δονήσεις.

Η επιλογή ή η ανάπτυξη αγωγών για τις γραμμές μεταφοράς και διανομής έχει γίνει μια απαιτητική λειτουργία τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής άποψης. Η επιλογή του τύπου και της διάστασης του αγωγού που ταιριάζει καλύτερα σε μια συγκεκριμένη γραμμή απαιτεί λεπτομερή γνώση των χαρακτηριστικών των τύπων αγωγών που διατίθενται στο εμπόριο. Για μια βέλτιστη επιλογή θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα στοιχεία:

- Ηλεκτρική αγωγιμότητα και θερμική συμπεριφορά
- Θερμικά όρια φορτίου
- Οικονομία της μετάδοσης
- Μηχανική αντοχή του αγωγού
- Μηχανικό φορτίο και καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης
- Τα χαρακτηριστικά πλαστικής παραμόρφωσης των μετάλλων και η συντελούμενη αύξηση του βέλους κάμψης, καθώς επίσης και η
- Συμπεριφορά υπό μηχανικές δονήσεις και η εξασθένιση της αντοχής.

3.1.1.2 Υλικά αγωγών

Ακολούθως παρουσιάζονται ονομαστικά τα πιο διαδεδομένα υλικά των αγωγών.

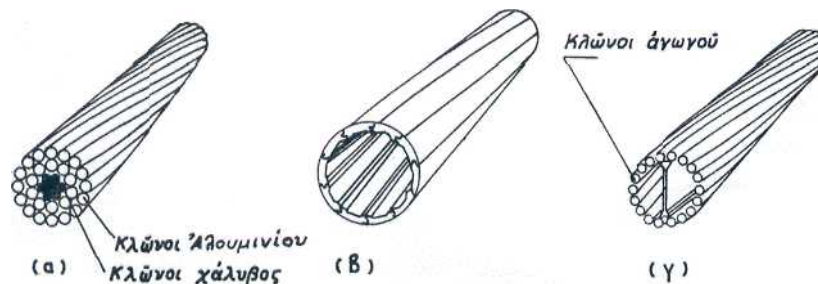
- Αλουμίνιο
- Κράματα αλουμινίου - μαγνησίου - πυριτίου
- Χαλύβδινα συρματίδια
- Χαλύβδινα συρματίδια επικαλυμμένα με αλουμίνιο
- Χαλκός και κράματα χαλκού
- Θερμικά ανθεκτικά κράματα αλουμινίου

3.1.1.3 Αγωγοί εναέριων γραμμών μεταφοράς (ελληνικού συστήματος)

Τα κύρια υλικά των αγωγών των εναερίων γραμμών είναι ο χαλκός και το αλουμίνιο. Ο χαλκός έχει υψηλή αγωγιμότητα και όταν είναι σκληρής ολκήσεως, εμφανίζει μεγάλη μηχανική αντοχή. Βασικό τεχνικό μειονέκτημα του είναι το βάρος του. Το αλουμίνιο είναι κατώτερο του χαλκού σε αγωγιμότητα και αντοχή, αλλά είναι πολύ ελαφρότερο από τον χαλκό και συνδυαζόμενο με χάλυβα, για απόκτηση της απαιτούμενης μηχανικής αντοχής, είναι δυνατόν να συναγωνισθεί αποτελεσματικά το χαλκό. Κατά τα τελευταία χρόνια λόγω μεγαλύτερου κόστους, αλλά και επειδή πολλές φορές δεν ήταν εύκολα διαθέσιμος ο χαλκός, η χρήση του αλουμινίου ως αγωγού έχει επεκταθεί πολύ σε βάρος του χαλκού. Στις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικότερα, το αλουμίνιο χρησιμοποιείται ήδη σε συντριπτική πλειοψηφία έναντι του χαλκού. Στις γραμμές μεταφοράς του ελληνικού συστήματος χρησιμοποιούνται αποκλειστικά αγωγοί αλουμινίου. Οι αγωγοί των γραμμών, στα μεγέθη τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως στις γραμμές μεταφοράς, δεν είναι συμπαγείς, αλλά αποτελούνται από πλήθος συνεστραμμένων κλώνων, για λόγους ευκαμψίας. Στη συνήθη τυποποίηση ένας κεντρικός κλώνος περιβάλλεται από αριθμό διαδοχικών στρώματων, κάθε ένα από τα όποια αποτελείται από πολλούς όμοιους κλώνους, τα διαδοχικά δε στρώματα των κλώνων είναι εναλλάξ συνεστραμμένα κατ' αντίθετες φορές. Κατ' αυτό τον τρόπο στον πλήρη αγωγό οι κλώνοι συγκρατούνται στερεά μεταξύ τους, αλλά ο αγωγός έχει ακόμη πολύ μεγαλύτερη ευκαμψία απ' ό,τι θα είχε, εάν ήταν συμπαγής της αυτής διατομής.

Όπως αναφέρθηκε ήδη προηγουμένως, το αλουμίνιο δεν χρησιμοποιείται μόνο του σαν αγωγός των εναερίων γραμμών μεταφοράς, λόγω μικρής μηχανικής αντοχής. Η τεχνική των συνεστραμμένων κλώνων διευκολύνει την ενσωμάτωση μέσα στον αγωγό αλουμινίου συρματιδίων χάλυβα, τα οποία προσδίδουν σ' αυτόν την απαιτούμενη μηχανική αντοχή. Προκύπτει κατ' αυτό τον τρόπο ο χρησιμοποιούμενος ευρύτατα αγωγός αλουμινίου με ενίσχυση χάλυβα (ACSR), ο οποίος στο κέντρο έχει τους κλώνους από χάλυβα και επάνω από αυτούς τους κλώνους του αλουμινίου. Οι κλώνοι χάλυβα, εάν είναι περισσότεροι του ενός, είναι διατεταγμένοι σε στρώματα τα οποία αποτελούν τον πυρήνα ή ψυχή του αγωγού πάνω στην οποία είναι διατεταγμένα τα στρώματα των κλώνων αλουμινίου (σχ. 3.1 α).

Η επιλογή σε κάθε περίπτωση της κατάλληλης συνθέσεως του αγωγού βασίζεται στις μηχανικές και ηλεκτρικές απαιτήσεις της γραμμής. Πολύ διαδεδομένη είναι η αμερικανική τυποποίηση των αγωγών ACSR, η οποία προβλέπει εκτεταμένη περιοχή διατομών. Στις ελληνικές γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται οι εξής τρεις διατομές αγωγών ACSR: 336 MCM*, 636 MCM και 954 MCM. Η πρώτη χρησιμοποιείται στις γραμμές 66 kV και στις ελαφρές γραμμές 150 kV, η δεύτερη στις βαριές γραμμές 150 kV και η τρίτη στις γραμμές 400 kV. Οι τιμές των διατομών, οι οποίες χαρακτηρίζουν τους αγωγούς ACSR, είναι οι τιμές των διατομών του αλουμινίου των αγωγών. Οι αντίστοιχες διατομές του χάλυβα των αγωγών όπως και η ακριβής σύνθεση των αγωγών, δηλαδή το πλήθος και η διάμετρος των κλώνων αλουμινίου και χάλυβα, δίνονται στους σχετικούς πίνακες των αγωγών ACSR.



Σχήμα 3.1: Αγωγοί γραμμών μεταφοράς (α) τυπικός αγωγός αλουμινίου με ενίσχυση χάλυβα (ACSR) (β) κοίλος αγωγός χαλκού (γ) κοίλος αγωγός χαλκού με διαμήκη αγώγιμη δοκό

Κατά τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνται και αγωγοί από κράματα αλουμινίου με άλλα μέταλλα, όπως το μαγνήσιο και το πυρίτιο. Οι αγωγοί αυτοί έχουν αυξημένη μηχανική αντοχή, ώστε να ικανοποιούν τις μηχανικές απαιτήσεις των γραμμών χωρίς ενίσχυση από χάλυβα, ενώ διατηρούν αγωγιμότητα παραπλήσια εκείνης του αλουμινίου. Πλεονέκτημα των αγωγών από κράματα αλουμινίου είναι η ομοιογένεια του υλικού τους, λόγω της οποίας αποφεύγονται και ορισμένα προβλήματα ηλεκτρολυτικής διαβρώσεως, τα οποία εμφανίζει πολλές φορές η συνύπαρξη δύο διαφορετικών μετάλλων, όπως το αλουμίνιο και ο χάλυβας στους αγωγούς ACSR, καθώς και η απλούστευση των συνδέσεων και τερματισμών. Η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού χρησιμοποιεί αγωγούς κραμάτων αλουμινίου στις γραμμές μέσης τάσεως αυτής.

* Η μονάδα μετρήσεως διατομής CM (Circular Mil) ισούται προς $1/1.273.000$ της τετρ. ίντσας, δηλαδή προς $5,067 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$. Συνήθως χρησιμοποιείται το πολλαπλάσιο αυτού, $\text{MCM} = 1000 \text{ CM}$.

3.1.1.4 Φαινόμενο Corona

Υπό τις υψηλές τάσεις λειτουργίας των γραμμών μεταφοράς η ένταση του ηλεκτροστατικού πεδίου πάνω στην επιφάνεια του αγωγού είναι ισχυρή και είναι σε θέση να προκαλέσει διάσπαση του αέρα γύρω από αυτόν. Η διάσπαση αυτή, η οποία είναι γνωστή ως εκκένωση “corona”, συνοδεύεται από θόρυβο, ο οποίος μοιάζει με τριγμό και ο οποίος είναι αισθητός πολλές φορές κοντά στις γραμμές μεταφοράς ή υποσταθμούς υψηλής τάσεως.

Πιο συγκεκριμένα, έστω ότι σε δύο αγωγούς, που είναι παράλληλοι μεταξύ τους και είναι μεγάλου μήκους, εφαρμόζεται μια μεταβλητή τάση U ($U_0 = \frac{1}{2} \cdot U =$ τάση προς τον ουδέτερο). Παρατηρούμε ότι ο αέρας που παρεμβάλλεται μεταξύ των αγωγών ionίζεται, όταν η τάση υπερβεί μια ορισμένη τιμή και γίνεται αγωγίμος. Η έναρξη του ιονισμού παρουσιάζεται στον αέρα γύρω από τον αγωγό με κυλινδρική μορφή. Το φαινόμενο του ιονισμού του αέρα γύρω από την επιφάνεια του αγωγού που έχει σαν αποτέλεσμα να γίνει ο αέρας αγωγίμος ονομάζεται φαινόμενο Corona. Η τάση U_0 ονομάζεται κρίσιμη τάση διάσπασης. Σε περίπτωση αύξησης της τάσης μεταξύ των αγωγών το στρώμα του ιονισμένου αέρα αυξάνεται σημαντικά με αποτέλεσμα να εμφανιστεί γύρω από τους αγωγούς αμυδρή φωτεινή αίγλη χρώματος VIOLET. Η τάση στην οποία έχουμε ορατό φαινόμενο Corona ονομάζεται ορατή κρίσιμη τάση. Αν αυξηθεί ακόμη παραπάνω η τάση είναι δυνατό οι δύο κύλινδροι φωτεινής αίγλης να έλθουν σε επαφή και να συμβεί υπερπήδηση. Ο ιονισμός του αέρα δημιουργεί ένα πρόσθετο ρεύμα που αυξάνει τις απώλειες ισχύος του συστήματος μια και ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για τον ιονισμό του αέρα. Στην περίπτωση ορατού φαινομένου Corona είναι δυνατό να ακούγεται ένα σφύριγμα συχνότητας 150 Hz, όπως ειπώθηκε παραπάνω.

Η εκκένωση “corona” έχει, συνεπώς, ως αποτέλεσμα μία κατηγορία απωλειών ενέργειας (οι απώλειες σε καλοκαιρία είναι σχετικά μικρές 0,15-1,5 kW/km και για τις τρεις φάσεις ενός τριφασικού δικτύου - σε περίπτωση κακοκαιρίας ξεπερνούν το δεκαπλάσιο) και αποτελεί πηγή ταλαντώσεων υψηλής συχνότητας, οι οποίες παρενοχλούν παρακείμενες εγκαταστάσεις ή συσκευές τηλεπικοινωνιών και ειδικότερα τις ραδιοφωνικές. Ως εκ τούτου, πρέπει η corona να αποφεύγεται ή να ελαχιστοποιείται. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος μείωσης της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου, προς μείωση του φαινομένου corona, είναι η αύξηση της ακτίνας

καμπυλότητα όλων των εκτεθειμένων αγωγίμων επιφανειών, δεδομένου ότι για ορισμένη τάση το πεδίο εξαρτάται σημαντικά από τη γεωμετρία των αγωγών.

Στην περίπτωση γραμμών μεταφοράς αυτό επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση αγωγών με μεγαλύτερες διαμέτρους και για κάθε επίπεδο τάσεως λειτουργίας βρίσκεται η κατά προσέγγιση ελάχιστη διατομή προς αποφυγή της corona. Στις μικρότερες τάσεις το απαιτούμενο από τη μηχανική αντοχή ή την ικανότητα φορτίσεως μέγεθος του αγωγού υπερβαίνει σχεδόν πάντοτε την ελάχιστη αυτή διατομή. Για τις υψηλότερες όμως τάσεις, τις μεγαλύτερες περίπου από 110 kV, η ελάχιστη διατομή καθορίζεται συχνά από τους περιορισμούς της corona, σε τιμή μεγαλύτερη από εκείνη την οποία θα απαιτούσαν οι άλλες συνθήκες.

Οι αγωγοί ACSR, οι οποίοι έχουν μεγαλύτερη διάμετρο για δεδομένη αντοχή και αγωγιμότητα από τους αντίστοιχους αγωγούς χαλκού, πλεονεκτούν έναντι των τελευταίων από απόψεως corona. Προς αντιμετώπιση του φαινόμενου corona στους αγωγούς χαλκού αναπτύχθηκαν οι καλούμενοι “κοίλοι αγωγοί” χαλκού, οι οποίοι έχουν αυξημένη διάμετρο για ορισμένη αγωγιμότητα και αντοχή. Αυτοί αποτελούνται από κυκλικούς ή πεπλατυσμένους κλώνους διατεταγμένους στην περιφέρεια κύκλου, του οποίου το εσωτερικό μένει κενό, προσδίδοντας στους αγωγούς σωληνωτή δομή. Ορισμένοι κοίλοι αγωγοί φέρουν εσωτερική από διαμήκη συνεστραμμένη δοκό μορφής I (σχ. 3.1 β, 3.1 γ).

Οπωσδήποτε, αντιμετώπιση των προβλημάτων της corona στις εξαιρετικά υψηλές τάσεις μεταφοράς με αύξηση της διαμέτρου των αγωγών δεν είναι συμφέρουσα και για τον λόγο αυτόν, εφαρμόζεται κατά κανόνα η πλεονεκτικότερη τεχνική των πολλαπλών αγωγών ανά φάση. Αυτή συνίσταται στον εξοπλισμό κάθε φάσεως της γραμμής με δύο, τρεις, τέσσερις ή και περισσότερους αγωγούς με κατάλληλο διάστημα μεταξύ τους, το άθροισμα των διατομών των οποίων αποτελεί την ολική διατομή του πολλαπλού αγωγού. Η χρησιμοποίηση πολλών αγωγών ανά φάση έχει ως αποτέλεσμα μία σοβαρή μείωση της επιφανειακής εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου καθενός από τους αγωγούς αυτούς και αντίστοιχη μείωση της corona και των συνεπειών της. Η μείωση της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου οφείλεται γενικώς στην ισοκατανομή του ηλεκτρικού φορτίου, το οποίο αντιστοιχεί σε ορισμένη τάση, σε όλους τους επί μέρους αγωγούς.

Συνοψίζοντας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι το φαινόμενο Corona εξαρτάται από τους εξής παράγοντες :

- Την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται στην επιφάνεια του αγωγού
- Την μορφή και την κατάσταση της επιφάνειας των αγωγών
- Την ατμοσφαιρική κατάσταση, θερμοκρασία και ρύπανση
- Την απόσταση μεταξύ των αγωγών,

ενώ για την αποφυγή ή μείωση του πρέπει :

- Να μειωθεί η ένταση του πεδίου στην επιφάνεια των αγωγών. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρησιμοποίηση πολλαπλών ή και κοίλων αγωγών
- Να αυξηθεί η διάμετρος των αγωγών. Αυτό συμβαίνει με τους αγωγούς ASCR λόγω της χαλύβδινης ψυχής
- Να αυξηθεί η απόσταση των αγωγών. Αυτό αυξάνει το κόστος των κατασκευών γιατί απαιτεί αύξηση των διαστάσεων των πυλώνων σε ύψος και πλάτος.

Στις γραμμές 150 kV του ελληνικού συστήματος μεταφοράς χρησιμοποιούνται απλοί αγωγοί, ενώ στις γραμμές 400 kV δύο αγωγοί ανά φάση, ο καθένας διατομής 954 MCM (διατομή πολλαπλού αγωγού φάσεως 2x954 MCM).

3.1.1.5 Αγωγοί γης

Οι περισσότερες εναέριες γραμμές μεταφοράς που έχουν τάσεις 110 kV και πάνω είναι εφοδιασμένες με αγωγούς γης. Ο όρος αγωγός γης χρησιμοποιείται για όλους τους τύπους αγωγών με δυνατότητα γείωσης, σύμφωνα με το πρότυπο EN 50341-1, αν και όλα τα σχέδια αγωγών γης αποτελούνται από ένα πλήθος μεμονωμένων κλώνων. Ο κύριος σκοπός των αγωγών γης είναι η προστασία των αγωγών φάσης ενάντια στις άμεσες επιπτώσεις των κεραυνικών πληγμάτων, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν τη διακοπή της λειτουργίας της γραμμής. Εντούτοις, τα κτυπήματα κεραυνού, ακόμα και όταν καταλήγουν στους αγωγούς γης, μπορούν να προκαλέσουν μια άνοδο της τάσης στους πυλώνες αρκετά υψηλή για να προκαλέσει μια ανάστροφη ηλεκτρική εκκένωση από τον πυλώνα στον αγωγό κατά μήκος της αλύσου των μονωτήρων. Κατά συνέπεια, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η εμφάνιση ηλεκτρικής εκκένωσης κατά μήκος της αλύσου των μονωτήρων, εκτός από τη χρησιμοποίηση των αγωγών γης, είναι απαραίτητο να μειωθεί η αύξηση τάσης στους

πυλώνες. Αυτό μπορεί να συμβεί μέσω κατάλληλης γείωσης των πυλώνων είτε με αγωγούς αντιστάθμισης, με βαθιές ράβδους είτε με άλλα μέσα.

Οι αγωγοί γης παρέχουν επίσης μια δίοδο επιστροφής για τα φασικά ρεύματα βραχυκύκλωσης. Πρέπει, επομένως, να καθοριστούν κατάλληλα ώστε να άγουν τα προβλεπόμενα ρεύματα βραχυκύκλωσης του συστήματος. Μειώνουν επίσης την ηλεκτρική παρεμβολή της γραμμής σε παράλληλες γραμμές. Επιπλέον, η χρήση των αγωγών γης συμβάλλει στο να μειωθεί το πλαίσιο γείωσης των υποσταθμών, καθώς η ποσότητα του ρεύματος που κυκλοφορεί στον αγωγό γης στα πρώτα ανοίγματα της γραμμής κοντά στον υποσταθμό θα μειώσει την ροή του ρεύματος μέσω του πλαισίου γείωσης. Το μέγεθος και οι επενδύσεις για το πλαίσιο αυτό μπορούν να μειωθούν αντίστοιχα.

Στο παρελθόν υιοθετήθηκαν κυρίως οι αγωγοί γης που έχουν χαμηλή αγωγιμότητα, όπως τα συρματίδια χάλυβα ή οι αγωγοί ALI/STyz (ACSR) με χαμηλή περιεκτικότητα σε αλουμίνιο και χρησιμοποιούνται ακόμα σε διάφορες χώρες. Εντούτοις σήμερα, οι περισσότερες επιχειρήσεις, ειδικά στην Ευρώπη, έχουν στραφεί στη χρήση μεγαλύτερων αγωγών ALI/STyz (ACSR) ή άλλων καλωδίων υψηλής αγωγιμότητας, λόγω του υψηλού επιπέδου των ρευμάτων βραχυκύκλωσης που παρουσιάζονται στα ηλεκτρικά συστήματα. Μια άλλη πρακτική που υιοθετείται συχνά από διάφορες επιχειρήσεις συνίσταται στο σχεδιασμό αγωγών γης ιδιαίτερα αγωγίων κοντά στους τερματικούς υποσταθμούς, στα πρώτα 5 με 10 km, που αλλάζουν σε συρματίδια χάλυβα στα υπόλοιπα μέρη της γραμμής, όπου μειώνονται τα ρεύματα βραχυκύκλωσης σε χαμηλότερες τιμές, συμβατές με την ονομαστική τιμή των αγωγών χάλυβα.

Πιο πρόσφατα, η χρήση των αγωγών γης έχει επεκταθεί σε άλλους σκοπούς, όπως η μεταφορά μικρών ποσών ενέργειας σε χαμηλότερες τάσεις ή η μεταφορά τηλεπικοινωνιακών σημάτων με ενσωματωμένες οπτικές ίνες. Τέτοιοι αγωγοί γης ονομάζονται αγωγοί γης οπτικών ινών (OPGW). Κατά συνέπεια, οι αγωγοί γης χάνουν την ιδιότητα των “νεκρών” ή ανενεργών αγωγών και γίνονται πιο χρήσιμα και αποδοτικά ενεργά μέρη.

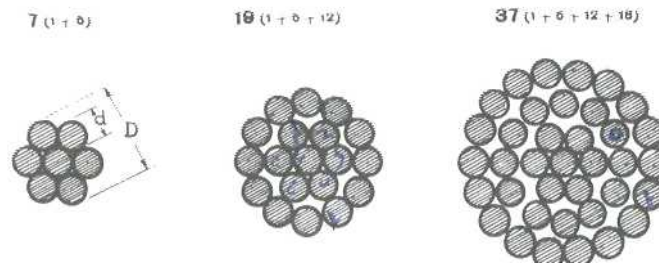
Στις ελληνικές γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται χαλύβδινοι αγωγοί γης διαμέτρου 9,4 mm στις γραμμές 150 kV, και 12,6 mm στις γραμμές 400 kV.

3.1.2 Μορφή αγωγών

Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται, όπως αναφέραμε και προηγούμενα, είναι χωρίς μόνωση και κατασκευάζονται από χαλκό, αλουμίνιο ή αλουμίνιο - χάλυβα (ACSR). Σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται αγωγοί από άλλα υλικά και κράματα π.χ. από γαλβανισμένο χάλυβα, φωσφορούχο ορείχαλκο κλπ.

Οι αγωγοί κατασκευάζονται μονόκλωνοι ή πολύκλωνοι. Στα εναέρια δίκτυα σπάνια χρησιμοποιούνται μονόκλωνοι αγωγοί, γιατί έχουν πολύ μικρότερη μηχανική αντοχή από τους πολύκλωνους. Επίσης οι μονόκλωνοι είναι δύσκαμπτοι. Η διατομή των μονόκλωνων αγωγών είναι μέχρι 16 mm^2 .

Οι πολύκλωνοι αγωγοί έχουν τη μορφή του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 3.2 : Γυμνοί πολύκλωνοι αγωγοί αποτελούμενοι από 7,19 και 37 κλώνους

Οι αγωγοί χαλκού και αλουμινίου, αποτελούνται από κλώνους της ίδιας διατομής. Γύρω από ένα κεντρικό αγωγό περιελίσσονται οι υπόλοιποι σε στρώσεις και οι αγωγοί παίρνουν τη μορφή των συρματόσχοινων. Οι αριθμοί των κλώνων είναι 7,19,37,61 κλπ.

Αν κ είναι ο αριθμός των κλώνων και η είναι ο αριθμός των στρώσεων γύρω από τον κεντρικό αγωγό τότε

$$\kappa = 1 + 3 \cdot \eta \cdot (\eta + 1)$$

Π.χ. αν $\eta=2$ τότε $\kappa = 1 + 3 \cdot 2 \cdot (2 + 1) = 1 + 18 = 19$, δηλαδή ο αγωγός αποτελείται από 19 κλώνους.

Αν κάθε κλώνος έχει διάμετρο d τότε ο αγωγός έχει διάμετρο D .

$$D = 4 \cdot (2 \cdot \eta + 1) \cdot d$$

Π.χ. αν $\eta=2$ (αγωγός με 19 κλώνους) τότε έχουμε

$$D = d \cdot (2 \cdot 2 + 1) = 5 \cdot d$$

δηλαδή αν $d=2\text{mm} \Rightarrow D = 5 \cdot 2 = 10 \text{ mm}$

Η διατομή του αγωγού δεν μπορεί να βρεθεί με τον τύπο:

$$S = \frac{\pi D^2}{4}$$

γιατί μεταξύ των αγωγών υπάρχουν διάκενα. Πρώτα υπολογίζουμε τη διατομή κάθε

σύρματος (κλώνου):

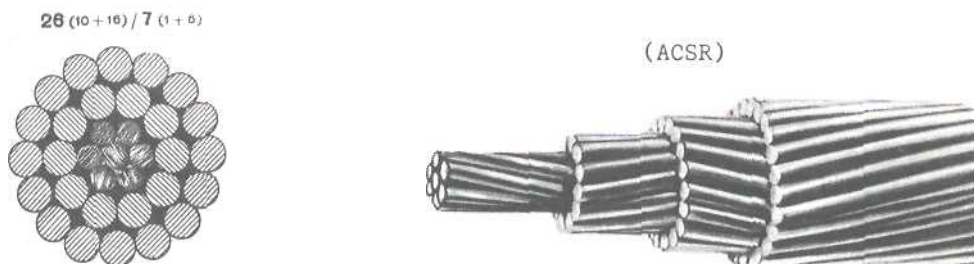
$$s = \frac{\pi d^2}{4}$$

Και για το παράδειγμα μας έχουμε : $s = \frac{\pi \cdot 2^2}{4} = 3,14 \text{mm}^2$

Και κατόπιν βρίσκουμε την συνολική διατομή :

$$S = \kappa \cdot s = 19 \cdot 3,14 = 59,66 \text{mm}^2$$

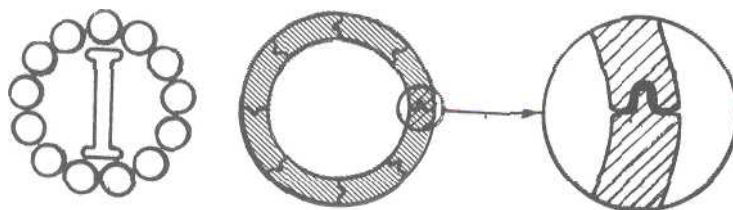
Οι αγωγοί αλουμινίου - χάλυβα ACSR έχουν τη μορφή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.3

Οι παραπάνω τύποι δεν μπορούν να εφαρμοστούν στους αγωγούς αυτούς γιατί η διάμετρος των χαλύβδινων συρμάτων είναι διαφορετική από την διατομή των συρμάτων αλουμινίου.

Σε γραμμές μεταφοράς πολύ υψηλής τάσης έχουν χρησιμοποιηθεί αγωγοί με ειδική διατομή.



Σχήμα 3.4 : Αγωγοί ειδικών διατομών για γραμμές μεταφοράς πολύ υψηλής τάσης

3.1.3 Αγωγοί από χαλκό

Ο χαλκός έχει μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα και καλή μηχανική αντοχή. Η αγωγιμότητα του μειώνεται όταν έχει ξένες προσμίξεις. Επίσης, μειώνεται λίγο η αγωγιμότητα του όταν κατεργαστεί εν ψυχρώ. Αυτό όμως του δίνει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή.

Ένα άλλο πλεονέκτημα του είναι ότι δεν διαβρώνεται εύκολα και γι' αυτό χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε δίκτυα που είναι κοντά στη θάλασσα.

Σήμερα, επειδή το αλουμίνιο έχει μικρότερο κόστος αντικαθιστά το χαλκό κυρίως στους αγωγούς των εναέριων δικτύων.

3.1.4 Αγωγοί από αλουμίνιο

Το αλουμίνιο έχει σε σύγκριση με τον χαλκό τα πλεονεκτήματα:

1. Είναι τρεις φορές ελαφρύτερο και
2. Είναι πιο φθηνό.

Τα μειονεκτήματα είναι.:

1. Έχει το 1/2 της μηχανικής αντοχής του χαλκού.
2. Έχει το 60% περίπου της αγωγιμότητας του χαλκού.

Έτσι ένας αγώνας αλουμινίου με ισοδύναμη διατομή με αγωγό από χαλκό έχει το 1/2 του βάρους του και διάμετρο μεγαλύτερη 1,6 φορές (60% μεγαλύτερη).

Τα παραπάνω μας δείχνουν ότι ο αγωγός από αλουμίνιο δέχεται μεγαλύτερες επιφορτίσεις από τον άνεμο και τον πάγο λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειάς του, αλλά συγχρόνως περιορίζονται σ' αυτόν οι απώλειες από το φαινόμενο corona .

Το αλουμίνιο με κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες οξειδώνεται (σκουριάζει) επιφανειακά. Το στρώμα της οξείδωσης είναι πολύ λεπτό και προστατεύει τον αγωγό από την παραπέρα οξείδωση. Κοντά στη θάλασσα όμως (σε απόσταση μέχρι 1 km περίπου) διαβρώνεται από το αλάτι που περιέχεται στον αέρα, σε βάθος μέχρι 3 mm.

Οι αγωγοί αλουμινίου χρησιμοποιούνται κυρίως στις γραμμές χαμηλής τάσης και μακριά από τη θάλασσα.

Στις γραμμές υψηλής και υπερύψηλης τάσης δεν χρησιμοποιούνται γιατί έχουν μικρή μηχανική αντοχή. (Οι πυλώνες απέχουν πολύ μεταξύ τους και οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις στους αγωγούς είναι πολύ μεγάλες).

3.1.5 Αγωγοί από αλουμίνιο - χάλυβα (ACSR)

Το μειονέκτημα των αγωγών αλουμινίου αντιμετωπίζεται με επιτυχία με τους αγωγούς ACSR. Αυτοί έχουν ψυχή από κλώνους με γαλβανισμένο χάλυβα (σχ.3.2).

Ο χάλυβας αναλαμβάνει τη μηχανική αντοχή και το αλουμίνιο το μεγαλύτερο μέρος της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος .

Οι αγωγοί ACSR έχουν περίπου 50% μεγαλύτερη αντοχή από τους αγωγούς χαλκού και είναι 20% ελαφρύτεροι για ισοδύναμη διατομή με το χαλκό. Χρησιμοποιούνται στις γραμμές υψηλής τάσης γιατί μπορούμε να έχουμε μεγαλύτερο άνοιγμα των πυλώνων (απόσταση μεταξύ των πυλώνων). Επίσης είναι πιο φθηνοί και παρουσιάζουν μικρότερες απώλειες λόγω του φαινομένου corona.

3.1.6 Οικονομική διατομή των αγωγών - Νόμος Kelvin

Στις μεγάλες γραμμές των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ισχύος, το κριτήριο της οικονομικής λειτουργίας, το οποίο επηρεάζει αμέσως το κόστος μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, έχει μεγάλη σημασία. Ένα βασικό χαρακτηριστικό μιας γραμμής μεταφοράς, το οποίο πρέπει να επιλεγεί και επηρεάζει την οικονομία της γραμμής, είναι η διατομή των αγωγών.

Ας υποθέσουμε ότι η τάση λειτουργίας είναι ορισμένη, το ρεύμα είναι I ανά αγωγό και η διατομή των αγωγών είναι q . Οι ετήσιες δαπάνες κεφαλαίου της γραμμής αποτελούνται από ένα σταθερό μέρος και από ένα μέρος το οποίο είναι ανάλογο της διατομής. Δηλαδή το κόστος των μονωτήρων ανήκει στις σταθερές δαπάνες, ενώ το κόστος του χαλκού ή του αλουμινίου είναι σαφώς ανάλογο με τη διατομή και το κόστος των φορέων είναι εν μέρει σταθερό και εν μέρει ανάλογο της διατομής.

Συνεπώς οι ετήσιες δαπάνες μπορούν να εκφραστούν ως:

$$\Delta_1 + \Delta_2 q \quad (3.1.1)$$

Η ωμική αντίσταση των αγωγών ανά μονάδα μήκους είναι ρ/q , οπότε οι τριφασικές απώλειες ισχύος της γραμμής είναι $3(\rho/q)I^2$ ανά μονάδα μήκους.

Εάν το κόστος απωλειών μιας μονάδας ενέργειας είναι k , η συνολική δαπάνη απωλειών κατά τη διάρκεια ενός έτους θα είναι :

$$\frac{3\rho k}{q} \int_{\text{ετος}} I^2 dt = \frac{\Delta_3}{q} \quad (3.1.2)$$

$$\Delta_3 = 3\rho k \int_{\text{ετος}} I^2 dt \quad (3.1.3)$$

Η οικονομικότερη λειτουργία της γραμμής επιτυγχάνεται, όταν ελαχιστοποιηθούν οι ετήσιες δαπάνες κεφαλαίου και οι απώλειες, δηλαδή το άθροισμα :

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 q + \frac{\Delta_3}{q} \quad (3.1.4)$$

Η συνθήκη ελαχιστοποίησης του αθροίσματος (3.1.4) είναι :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dq} (\Delta_1 + \Delta_2 q + \frac{\Delta_3}{q}) &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta_2 - \frac{\Delta_3}{q} &= 0 \end{aligned} \quad (3.1.5)$$

η οποία πληρούται όταν:

$$q = \sqrt{\frac{\Delta_2}{\Delta_3}} \quad (3.1.6)$$

Η εξίσωση (3.1.6) δίνει την οικονομικότερη τιμή της διατομής της γραμμής. Η συνθήκη (3.1.5), η οποία γράφεται και :

$$\Delta_2 q = \frac{\Delta_3}{q} \quad (3.1.7)$$

δηλώνει ότι το μεταβλητό μέρος των ετήσιων δαπανών κεφαλαίου ισούται με το ετήσιο κόστος απωλειών και αποτελεί το νόμο του Kelvin. Η δυσκολία στην πράξη έγκειται στην εύρεση του Δ_3 , όπως δίνεται από την εξίσωση (3.1.3). Επί πλέον, υποθέσαμε ότι οι ετήσιες δαπάνες κεφαλαίου είναι $\Delta_1 + \Delta_2 q$, πράγμα το οποίο δεν ισχύει απαραίτητα. Εκείνο το οποίο σώζει την κατάσταση είναι το ότι η καμπύλη είναι ανοικτή και περίπου οριζόντια στη περιοχή του ελάχιστου και μία ακρίβεια $\pm 20\%$ είναι στην προκείμενη περίπτωση ανεκτή.

Από την εξίσωση (3.1.3) φαίνεται ότι ο συντελεστής φορτίου δεν αρκεί για τον προσδιορισμό του Δ_3 . Αυτό προκύπτει από το ότι ο συντελεστής φορτίου δίνεται από τη σχέση :

$$m = \frac{\int_{\varepsilon_{\text{το}\varsigma}} EI dt}{8760 EI_{\text{max}}} = \frac{\int_{\varepsilon_{\text{το}\varsigma}} I dt}{8760 I_{\text{max}}} \quad (3.1.8)$$

από την οποία φαίνεται ότι, βάσει του m , είναι δυνατόν να προσδιοριστεί το ολοκλήρωμα $\int_{\varepsilon_{\text{το}\varsigma}} I dt$ αλλά όχι το ολοκλήρωμα $\int_{\varepsilon_{\text{το}\varsigma}} I^2 dt$.

Η εξίσωση (3.1.3) μπορεί να γραφτεί υπό τη μορφή :

$$\Delta_3 = 3\rho k \cdot 8760 \cdot \xi \cdot I_{\text{max}}^2 \quad (3.1.9)$$

Το μέγεθος ξ ορίζεται από τη σχέση:

$$\xi = \frac{\int_{\text{ετος}} I^2 dt}{8760 \cdot I_{\max}^2} \quad (3.1.10)$$

και καλείται συντελεστής χρόνου απωλειών.

Ο συντελεστής χρόνου απωλειών ξ εξαρτάται από τη μορφή της καμπύλης διάρκειας του φορτίου (για το αυτό I_{\max}), οι δε τιμές του κυμαίνονται μεταξύ του m και m^2 , όπου m ο συντελεστής φορτίου, οριζόμενος από τη σχέση (3.1.8). Ο συντελεστής ξ βρίσκεται πλησιέστερα προς το m^2 παρά προς το m και δίνεται από διαγράμματα συναρτήσεως του m ή από εμπειρικές σχέσεις, όπως $\xi = 0,3m + 0,7m^2$.

Περαιτέρω ανάλυση του κόστους απωλειών Δ_3

Οι απώλειες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, δηλαδή απώλειες ισχύος και απώλειες ενέργειας.

Εάν λ είναι το ανά μονάδα κόστος απωλειών ισχύος σε €/kW για το έτος και εάν μ το ανά μονάδα κόστος απωλειών ενέργειας (καυσίμου) σε €/kWh, τότε το ετήσιο κόστος των απωλειών ισχύος και ενέργειας θα δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta_3 = 3\rho I_{\max}^2 \cdot \lambda + 3\rho \cdot \xi \cdot 8760 \cdot I_{\max}^2 \cdot \mu \quad \text{€/έτος}$$

$$\text{ή} \quad \Delta_3 = 3\rho I_{\max}^2 \cdot \xi \cdot 8760 \cdot \left(\mu + \frac{\lambda}{8760 \cdot \xi} \right) \quad \text{€/έτος}$$

$$\text{ή} \quad \Delta_3 = 3\rho I_{\max}^2 \cdot \xi \cdot 8760 \cdot \kappa \quad \text{€/έτος}$$

όπου $\kappa = \mu + \frac{\lambda}{8760 \cdot \xi}$ €/έτος το σύνθετο κόστος απωλειών ενέργειας.

3.2 Μονωτήρες

3.2.1 Γενικά στοιχεία μονωτήρων

Οι μονωτήρες είναι τμήματα των εναέριων γραμμών που εγκαθίστανται μεταξύ των ηλεκτροφόρων αγωγών και των γειωμένων μερών των δομών, υποβαλλόμενοι ταυτόχρονα σε μηχανικές και ηλεκτρικές τάσεις. Η απόδοση της μόνωσης χρειάζεται, επομένως, να σχεδιάζεται για τις δυσμενέστερες συνθήκες λειτουργίας ως αποτέλεσμα των κλιματολογικών επιδράσεων, όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η υγρασία, η δροσιά, η ομίχλη, η βροχή, καθώς επίσης και η ρύπανση από τις επικαθίσεις σκονών, αλάτων, καταλοίπων καυσίμων και βιομηχανικών αερίων. Η μηχανική αντίσταση πρέπει να είναι τόσο υψηλή, έτσι που κάθε έκτακτο φορτίο να μεταφέρεται με επαρκή λειτουργική προστασία. Η αντοχή σε διάσπαση και η ηλεκτρική αντίσταση τόξου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλες για να αντέξουν τις συντελούμενες τάσεις.

Για να επιτευχθούν τέτοιοι στόχοι, διάφορα σχήματα μονωτήρων έχουν αναπτυχθεί και μερικά έχουν εξαφανιστεί από την αγορά τα τελευταία 100 χρόνια, από όταν άρχισε η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πρόσφατα σχέδια μονωτήρων προκύπτουν απ' αυτά.

Η πορσελάνη ως το πρώτο υλικό μονωτήρα που αναπτύχθηκε χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα, εν τούτοις με βελτιωμένη σύνθεση. Το ανθεκτικό γυαλί και το πλαστικό διαφορετικών τύπων και “συνταγών” εμφανίστηκαν επίσης με την πάροδο του χρόνου ως πρώτες ύλες μονωτήρων. Τα διεθνή πρότυπα των μονωτήρων απεικονίζουν την υψηλή ποιότητα που είναι διαθέσιμη σήμερα, αλλά δεν αποκλείουν νέες πρώτες ύλες και περαιτέρω ανάπτυξη με νέους τύπους και σχέδια μονωτήρων.

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60 383-1, οι μονωτήρες των εναέριων γραμμών κατατάσσονται σε δύο τύπους, τύπο Α και τύπο Β, αντίστοιχα. Οι μονωτήρες τύπου Α χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι το μήκος της ελάχιστης διαδρομής διάτρησης μέσω του μονωτικού σώματος είναι τουλάχιστον το μισό από αυτό της διαδρομής εξωτερικής υπερπήδησης στην επιφάνεια του μονωτήρα. Αυτό ισχύει, παραδείγματος χάριν, για τις επιμήκεις μονωτικές ράβδους. Τέτοιοι μονωτήρες θεωρούνται ως ανθεκτικοί στη διάτρηση. Οι μονωτήρες για τους οποίους το μήκος της ελάχιστης διαδρομής διάτρησης μέσω του σώματος είναι μικρότερο από το μισό της επιφανειακής διαδρομής υπερπήδησης χαρακτηρίζονται ως μονωτήρες τύπου Β, παραδείγματος χάριν οι δισκοειδείς μονωτήρες και οι μονωτήρες στήριξης της γραμμής. Αυτοί θεωρούνται ως μη ανθεκτικοί σε διάτρηση.

Σύμφωνα με την υπάρχουσα τεχνολογία, ανθεκτικοί σε διάτρηση μονωτήρες συμπαγούς πυρήνα δεν μπορούν να κατασκευαστούν από γυαλί.

3.2.2 Μονωτήρες εναέριων γραμμών μεταφοράς (ελληνικού συστήματος)

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι αγωγοί των γραμμών αναρτώνται στους πυλώνες μέσω των μονωτήρων αναρτήσεως, οι όποιοι παρέχουν και την απαιτούμενη μόνωση των αγωγών έναντι των μεταλλικών μερών των πυλώνων. Οι μονωτήρες αναρτήσεως είναι κατασκευασμένοι από πορσελάνη ή γυαλί.

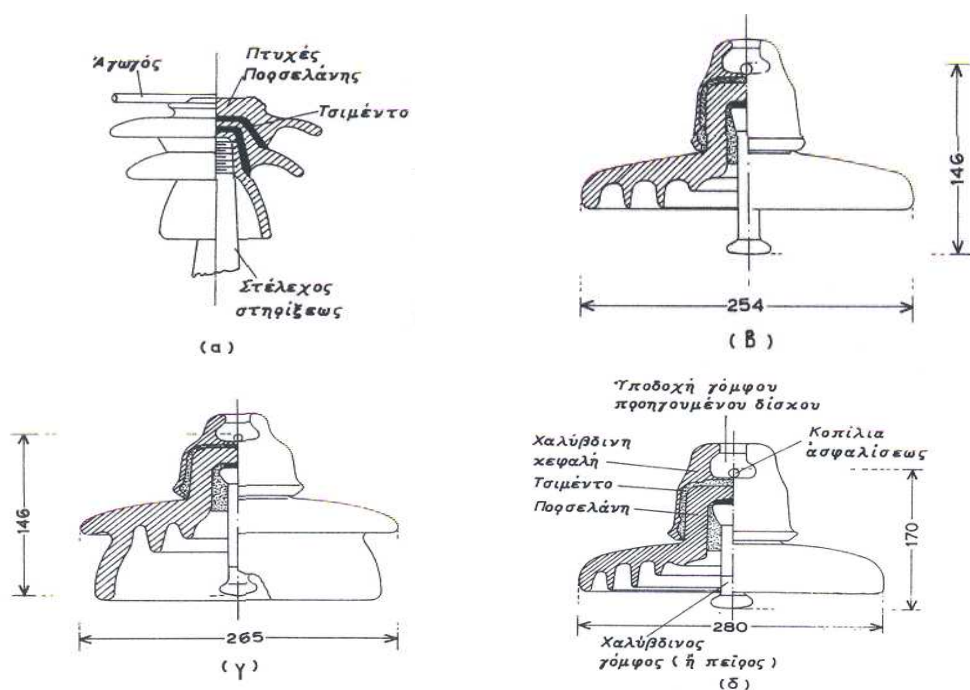
Η πορσελάνη είναι καλό διηλεκτρικό (μονωτικό), έχει καλή μηχανική αντοχή, αλλά επειδή έχει πόρους κατεργάζεται επιφανειακά και γίνεται λεία και αδιαπέραστη από την υγρασία. Η πορσελάνη είναι κεραμικό υλικό και ψήνεται σε φούρνους.

Το γυαλί είναι καλύτερο διηλεκτρικό και έχει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή σε θλίψη και ίση σε εφελκυσμό με την πορσελάνη. Παρουσιάζει το μειονέκτημα του σχηματισμού υγρασίας στην επιφάνεια του. Επίσης είναι δύσκολη η κατασκευή μεγάλων μονωτήρων απ' αυτό.

Πλεονεκτήματα των μονωτήρων γυαλιού απέναντι στους μονωτήρες πορσελάνης :

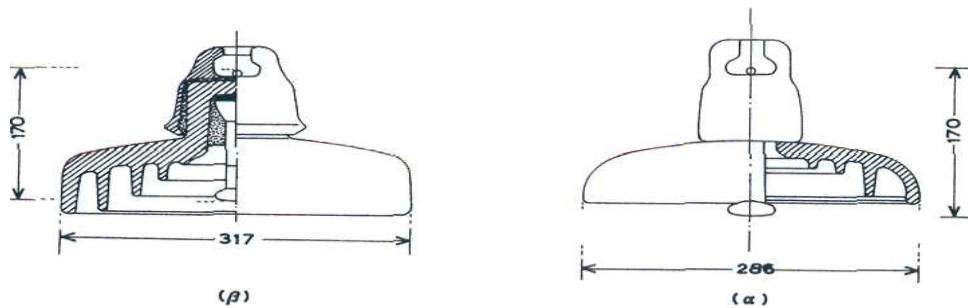
- Ελέγχονται ευκολότερα (φυσαλίδες - ομοιογένεια)
- Σε περίπτωση ηλεκτρικής εκκένωσης κομματιάζονται, ενώ οι μονωτήρες πορσελάνης παθαίνουν μόνο ρωγμές (ευκολότερος εντοπισμός χαλασμένου μονωτήρα)
- Διαστέλλονται λιγότερο και ακτινοβολούν περισσότερη θερμότητα.

Στις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας δύο κύριοι τύποι μονωτήρων χρησιμοποιούνται. Οι μονωτήρες στηρίξεως ή τύπου στελέχους και οι μονωτήρες αναρτήσεως ή δισκοειδείς. Οι πρώτοι χρησιμοποιούνται συνήθως στις γραμμές διανομής μέσης τάσεως και αποτελούνται από περισσότερες από μια πτυχές από πορσελάνη ή γυαλί. Στο κάτω μέρος τους οι μονωτήρες στηρίξεως φέρουν το μεταλλικό στέλεχος στηρίξεως του μονωτήρα επί του στύλου, ενώ η πρόσδεση του αγωγού γίνεται στο λαιμό του μονωτήρα ή στην κεφαλή του, όπου υπάρχει συνήθως κατάλληλο αυλάκι. Μονωτήρες του είδους αυτού χρησιμοποιούνται από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού στα δίκτυα της διανομής 6,6 - 15 - 20 και 22 kV. Τυπικός μονωτήρας στηρίξεως εικονίζεται στο σχήμα 3.11 α. Οι μονωτήρες αναρτήσεως, οι οποίοι χρησιμοποιούνται πολλές φορές και στις γραμμές μέσης τάσεως, χρησιμοποιούνται, σχεδόν αποκλειστικά σε γραμμές τάσεων υψηλότερων από 69.000 V. Οι μονωτήρες αναρτήσεως, οι οποίοι καλούνται και μονωτικές αλυσείς ή αλυσείς μονωτήρων, αποτελούνται από αριθμό όμοιων δισκοειδών μονωτήρων συνδεδεμένων εν σειρά (σχ. 3.13 α, 3.11 β).



Σχήμα 3.11: Μονωτήρες εναέριων γραμμών μεταφοράς και διανομής (α) Τυπικός μονωτήρας στηρίξεως (β) 150 kV πορσελάνης κοινός (γ) 150 kV πορσελάνης τύπου ομίχλης (δ) 400 kV πορσελάνης κοινός

Το στοιχείο της αλύσεως, δηλαδή ο δισκοειδής μονωτήρας, αποτελείται από δίσκο από πορσελάνη ή γυαλί, με χαλύβδινη κεφαλή προσαρμοσμένη στο επάνω μέρος του και προεξέχοντα χαλύβδινο πείρο στο κάτω μέρος, όπως φαίνεται στα σχήματα 3.11(β, γ, δ) και 3.12(α, β).

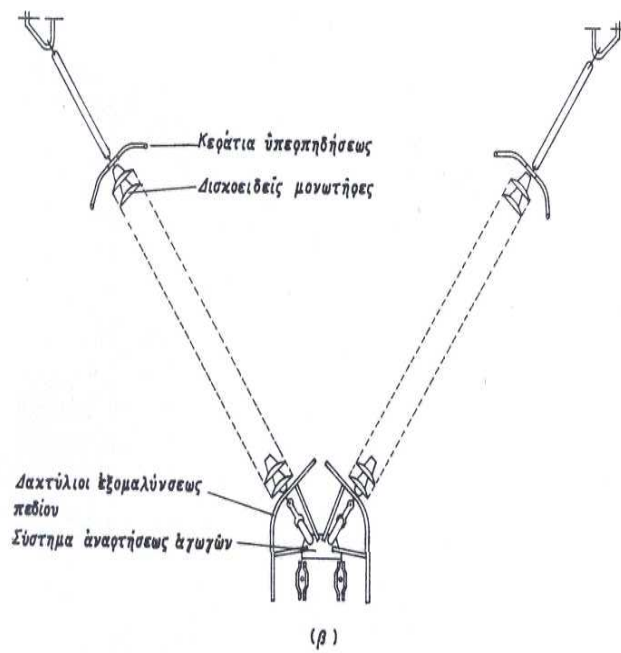
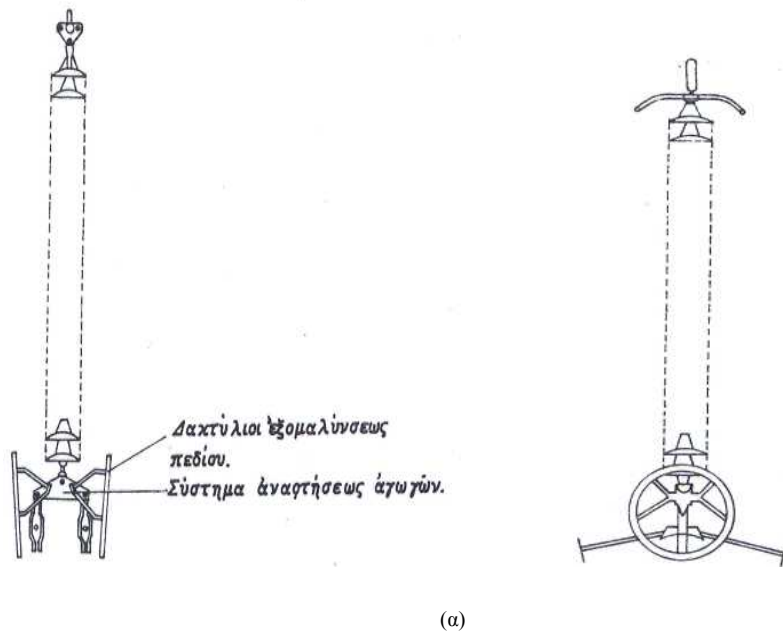


Σχήμα 3.12 : Μονωτήρες εναέριων γραμμών μεταφοράς 400 kV
(α) 400 kV γυάλινος κοινός,
(β) 400 kV γυάλινος τύπου ομίχλης.

Η σύνδεση των διαδοχικών δίσκων για τη συγκρότηση της αλύσεως γίνεται με την εισδοχή του πείρου κάθε δίσκου στην υποδοχή της κεφαλής του επόμενου, η οποία υπάρχει εκεί για το σκοπό αυτό. Το πεπλατυσμένο άκρο του πείρου και η κατάλληλη διαμόρφωση της υποδοχής της κεφαλής, μέσα στην οποία η ενθυλάκωση του πείρου εξασφαλίζεται και με μία διχαλωτή κοπίλια ασφαλίσεως, παρέχουν σταθερότητα και ευκαμψία στους μονωτήρες αναρτήσεως. Ένα σύνηθες μέγεθος δισκοειδούς μονωτήρα, χρησιμοποιούμενου στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσεως, έχει διάμετρο 254 mm και ύψος 146 mm, όπου ως ύψος του δίσκου θεωρείται το διάστημα μεταξύ αντιστοίχων σημείων δύο διαδοχικών δίσκων της αλύσεως.

Τέτοιοι μονωτήρες χρησιμοποιούνται στις γραμμές 150 kV της Δ.Ε.Η., ενώ μονωτήρες διαμέτρου 280 mm και ύψους 170 mm χρησιμοποιούνται στις γραμμές των 400 kV. Πολλοί τύποι δισκοειδών μονωτήρων με διάφορες μηχανικές αντοχές κατασκευάζονται για να χρησιμοποιηθούν στους διάφορους τύπους των γραμμών μεταφοράς.

Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων δίσκων σε ένα μονωτήρα αναρτήσεως εξαρτάται από την τάση της γραμμής και την επιθυμητή στάθμη μονώσεως αυτής, δηλαδή την επιθυμητή κρουστική αντοχή αυτής. Υπό κανονικές συνθήκες το μέτρο ποικίλλει από 10 έως 25 kV πολικής τάσεως της γραμμής ανά μονάδα μονωτήρα. Στα δίκτυα μεταφοράς του ελληνικού συστήματος χρησιμοποιούνται στις μεν γραμμές 150 kV συνήθως 10 δίσκοι μεγέθους 250 x 146 mm, ενώ στις γραμμές 400 kV 17 έως 19 δίσκοι μεγέθους 280 x 170 mm, από πορσελάνη ή γυαλί.



Σχήμα 3.13 : Αλύσεις μονωτήρων ανάρτησεως γραμμών μεταφοράς
 (α) κατακόρυφος απλής ανάρτησεως
 (β) διπλής ανάρτησεως τύπου V

Η σύνδεση των αγωγών στους μονωτήρες ανάρτησεως γίνεται μέσω ειδικών διατάξεων προσδέσεως, όπου καταβάλλεται προσπάθεια να μη δημιουργούνται απότομες κάμψεις των αγωγών στα σημεία προσδέσεως. Η τελευταία απαίτηση έχει ιδιαίτερη σημασία όσο αφορά στην πρόληψη βλάβης των αγωγών από τις μηχανικές ταλαντώσεις τις προκαλούμενες από τον άνεμο και τον πάγο. Το περίγραμμα της κατακόρυφης τομής του μονωτικού τμήματος ενός μονωτήρα είναι δυνατόν να

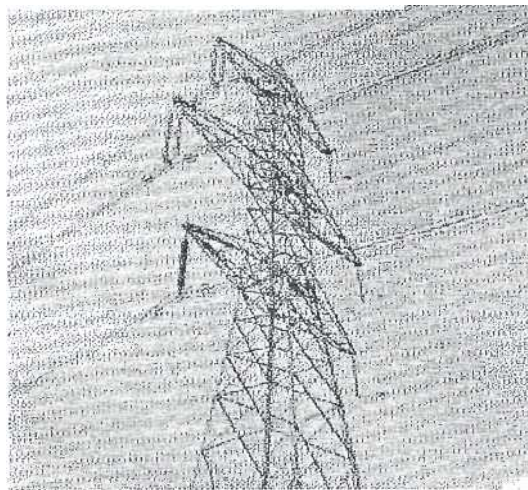
ποικίλλει σημαντικά. Είναι βασική απαίτηση της σχεδιάσεως των μονωτήρων, σε περίπτωση ηλεκτρικής διασπάσεως τους να γίνεται η διάσπαση υπό μορφή εξωτερικής υπερπηδήσεως της επιφάνειας τους, παρά υπό μορφή εσωτερικής διατρήσεως της πορσελάνης ή του γυαλιού. Και είναι προφανής η προτίμηση της διασπάσεως της μόνωσης του αέρος, η οποία αυτοαποκαθίσταται από την καταστρεπτική διάσπαση της στερεάς μόνωσης. Φυσικά ούτε υπερπήδηση ούτε διάτρηση των μονωτήρων αναμένεται υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, παρά μόνο σε περιπτώσεις υψηλών υπερτάσεων, οπότε η διάσπαση είναι αναπόφευκτη, προτιμάται η εξωτερική υπερπήδηση. Στους σύγχρονους μονωτήρες μία υπερπήδηση, εάν δεν διατηρηθεί επί σημαντική σχετικώς χρονική διάρκεια, πολύ μικρή ζημιά συνεπάγεται για τον μονωτήρα και μόλις η υπέρταση περάσει ο μονωτήρας παρουσιάζει την κανονική του συμπεριφορά. Αντίθετα μια διάτρηση αχρηστεύει σχεδόν πάντοτε ένα μονωτήρα. Στην περίπτωση ενός μονωτήρα αναρτήσεως η αχρήστευση ενός δίσκου είναι δυνατόν να μη συνεπάγεται αχρήστευση και όλης της αλύσεως, δεδομένου ότι οι παραμένουσες μονάδες παρέχουν την απαιτούμενη μόνωση, οπωσδήποτε όμως ο συντελεστής ασφάλειας έχει μειωθεί και η βλαβείσα μονάδα πρέπει να αντικατασταθεί αμέσως μόλις ανακαλυφθεί.

Η τάση υπερπηδήσεως ενός μονωτήρα επηρεάζεται από τη γεωμετρική μορφή του, το υλικό της επιφάνειας του, την ρύπανση της επιφάνειας του, την υγρασία της, και κατά ορισμένο ποσοστό από τη μορφή και το υλικό των παρακειμένων αντικειμένων. Οι περισσότεροι μονωτήρες παραμένουν σε λειτουργία επί πολλά χρόνια με πολύ μικρή φροντίδα και καθαρισμό μόνο από τον άνεμο και την βροχή. Ως εκ τούτου ένα από τα προβλήματα των μονωτήρων είναι η κατάλληλη σχεδίαση της μορφής των επιφανειών τους, ώστε η τάση υπερπηδήσεως να επηρεάζεται μόνο σε μικρό ποσοστό από τις συγκεντρωμένες επικαθίσεις και την υγρασία. Στους συνήθεις τύπους μονωτήρων η επάνω επιφάνεια είναι λεία, ώστε να συμβάλει στην παρεμπόδιση εύκολης επικαθήσεως ακαθαρσιών, ενώ η κάτω επιφάνεια τους έχει πτυχώσεις για την αύξηση του μήκους της επιφανειακής διαδρομής μεταξύ άνω και κάτω μεταλλικών μελών και αύξηση του μη εκτεθειμένου στη βροχή τμήματος της, ώστε να παρεμποδισθεί ο σχηματισμός συνεχούς υδάτινης διαδρομής κατά τη διάρκεια της βροχής.

Σε περιοχές υποκειμένες σε εντόνους σχηματισμούς ομίχλης ή ψεκασμούς άλατος από τη θάλασσα, χρησιμοποιούνται ειδικοί μονωτήρες, οι όποιοι ονομάζονται τύπου ομίχλης. Παρ' όλα αυτά, όμως, ένα από τα πλέον αποτελεσματικά μέτρα αποτελεί ο περιοδικός καθαρισμός. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι μονωτήρες των κύριων σταθμών

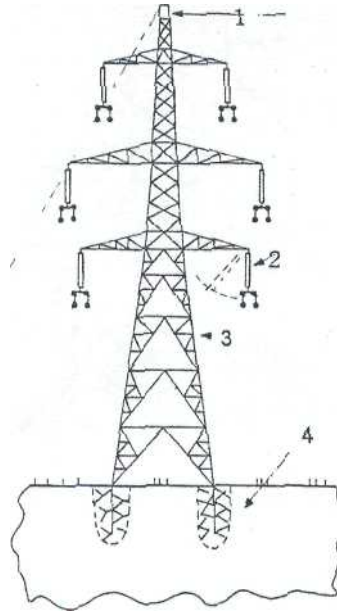
ή υποσταθμών πλένονται υπό τάση ή εκτός τάσεως, με τη χρησιμοποίηση συστημάτων κατάλληλης εκτοξεύσεως ύδατος για τον καθαρισμό τους από τη σκόνη και τις καθαλατώσεις. Στο σχ. 3.11 ο τύπος (γ) και στο σχ. 3.12 ο τύπος (β) είναι δισκοειδείς μονωτήρες τύπου ομίχλης, από τους χρησιμοποιούμενους στην “Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού” στις γραμμές μεταφοράς, τις οδεύουσες παράπλευρα προς τη θάλασσα ή διερχόμενες δια μέσου βιομηχανικών περιοχών με μεγάλη ρύπανση του αέρα. Οι καθαλατώσεις αποτελούν ένα σημαντικό μερικές φορές πρόβλημα των γραμμών των ελληνικών δικτύων ηλεκτρικής ενεργείας, των εγκατεστημένων κοντά στις ακτές της θάλασσας.

Οι μονωτήρες σαν καθοριστικός παράγοντας του ύψους του πυλώνα



Σχήμα 3.14 : Μη ευδιάκριτοι πολυμερείς μονωτήρες

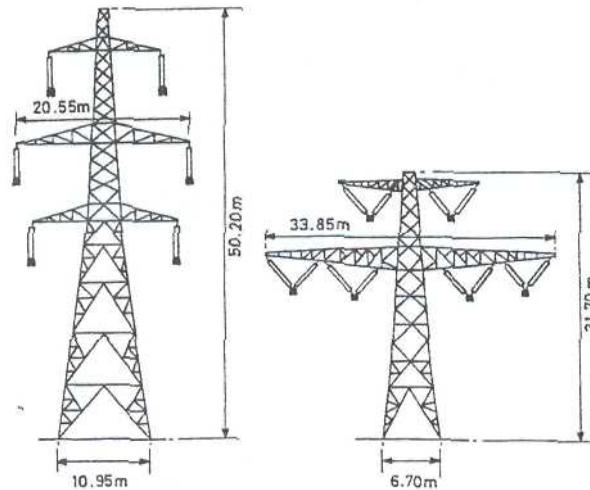
Στην απλή περίπτωση ενός πυλώνα αναρτήσεως για διπλά κυκλώματα, το μήκος της αλληλένδετης σειράς του μονωτήρα έχει άμεση επίδραση στο ύψος του πυλώνα και το μήκος των εγκάρσιων βραχιόνων. Επειδή το φορτίο στήριξης στο κάτω μέρος του πυλώνα εξαρτάται από το ύψος, οι εγκάρσιες τομές της κατασκευής χάλυβα και επομένως η διακριτικότητα του πυλώνα, πρέπει επίσης να αυξάνεται ανάλογα με το ύψος του πυλώνα. Το σχήμα 3.15 δείχνει πως η μείωση του ύψους των μονωτήρων, η οποία συνοδεύεται από μείωση του ύψους των πυλώνων, των εγκάρσιων βραχιόνων και των χάλυβδινων τμημάτων, παρέχει τα πλεονεκτήματα της μείωσης του κόστους κατασκευής και της "αδιαφανούς" εμφάνισης της δομής.



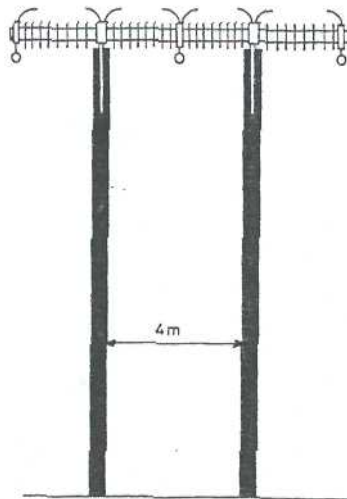
Σχήμα 3.15 : Πλεονεκτήματα από τη μείωση του ύψους των μονωτήρων

- Ο αγωγός γης μπορεί να χαμηλωθεί. Οι αγωγοί φάσης που χρειάζονται προστασία από τους κεραυνούς βρίσκονται πλησιέστερα της κεντρικής γραμμής.
- Η μειωμένη απόσταση αιώρησης επιτρέπει μείωση του μήκους του εγκάρσιου βραχίονα, που έχει σαν αποτέλεσμα μείωση της συστροφής σε περίπτωση σπασμένου αγωγού.
- Οι μειωμένες μηχανικές απαιτήσεις επιτρέπουν τη μειωμένη χρήση χάλυβα.
- Οι μειωμένες πιθανότητες ανατροπής και συστροφής επιτρέπουν την ύπαρξη μικρότερων βάσεων.

Είναι δυνατό να μειωθεί το ύψος των πυλώνων με εγκατάσταση επικλινών ή οριζοντίων μονωτήρων αντί για κατακόρυφες τοποθετήσεις. Η αντικατάσταση αυτή είναι πάγια τακτική στην Ευρώπη για περισσότερες από δύο δεκαετίες, ιδιαίτερα σε περιοχές πλησίον αεροδρομίων. Οποιοδήποτε υψομετρικό όφελος συνήθως χάνεται οπτικά λόγω της ευδιάκριτης εμφάνισης των μονωτικών συγκροτημάτων (σχ. 3.16), παρότι η χρησιμοποίηση λεπτών ανθεκτικών πολυμερών μονωτήρων μετέβαλλε την κατάσταση. Δομές χαμηλού ύψους προκύπτουν από τους μονωτικούς βραχίονες 'τύπου Π' (σχ. 3.17). Οι εγκαταστάσεις αυτές στήριξης κατακρίνονται από την κακή αισθητική τους εμφάνιση και την αντικριστή χρήση μονωτήρων, στους οποίους η επιφανειακή διάσπαση προκαλεί προβλήματα στα προστατευτικά κυκλώματα.



Σχήμα 3.16 : Συνηθισμένοι και χαμηλού ύψους πυλώνες



Σχήμα 3.17 : Μονωτικοί βραχίονες τύπου Π

Οι μονωτήρες είναι πιθανό επίσης να συμβάλλουν στη στερεότητα, όταν χρησιμοποιούνται για να εμποδίσουν την προσβολή από επιφανειακή διάσπαση ανάμεσα σε αγωγούς, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε κοντινές αποστάσεις. Οι μονωτήρες που έχουν ελαφρύ βάρος προτιμώνται για τέτοιες εφαρμογές, ιδιαίτερα οι πολυμερείς ή ειδικές επιμήκειες ράβδοι, αφού οι μηχανικές λειτουργίες περιλαμβάνουν πράξεις τόσο σαν θλιβόμενες διαδοκίδες όσο και σαν συνδέσεις για τις οποίες οι δίσκοι είναι απαράδεκτοι.

3.2.3 Υλικά εξοπλισμού, σύνδεσμοι και αποσβεστήρες ταλάντωσης

Υλικά εξοπλισμού

Υλικά εξοπλισμού θεωρούνται όλα τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την σύνδεση των αγωγών φάσεως με τον βραχίονα του δικτυωτού ιστού, όπου χρησιμεύουν:

- 1) Για την ανάρτηση και τάνυση των αγωγών
- 2) Για την προστασία των μονωτήρων από βλάβες κατά την παρουσίαση τόξων
- 3) Συγκράτηση των αγωγών για να αποφεύγεται η σύγκρουση τους

Όπως και οι μονωτήρες χωρίζονται σε είδη, έτσι και οι αναρτήσεις αυτών χωρίζονται σε αντίστοιχα είδη, π.χ. τύπου καμπάνας ή δίσκου, όπου ο τύπος καμπάνας τοποθετείται σε στήριγμα, οι άλλοι επί άλυσο.

Στην άλυσο αναρτήσεως δεν τοποθετείται κέρασ και στεφάνι προστασίας. Οι μονωτήρες τέρματος αποτελούνται από δυο αλύσους, όπου η κάθε μία έχει από 12 δίσκους μονωτήρων ιδίου τύπου, όπως και η άλυσος αναρτήσεως.

Εξαρτήματα σύνδεσης αγωγών

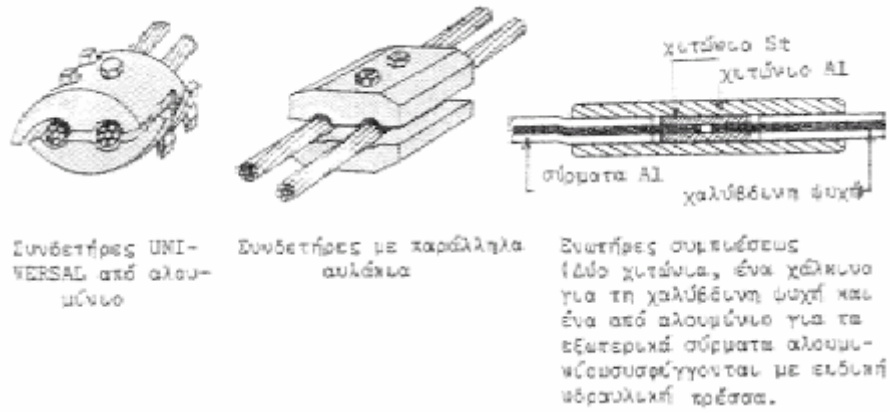
Για τη σύνδεση των αγωγών, μεταξύ τους ή με τα στηρίγματά τους (μονωτήρες), υπάρχουν εξαρτήματα που τα κυριότερα είναι διάφοροι συνδετήρες, σφιγκτήρες και ενωτήρες, οι οποίοι χρησιμεύουν για την ηλεκτρική ή μηχανική σύνδεση των αγωγών.

Συνδετήρες είναι αυτοί που εξασφαλίζουν την ηλεκτρική σύνδεση των αγωγών.

Σφιγκτήρες είναι αυτοί που εξασφαλίζουν τη μηχανική σύνδεση των αγωγών.

Ενωτήρες είναι αυτοί που εξασφαλίζουν ταυτόχρονα την ηλεκτρική και μηχανική σύνδεση.

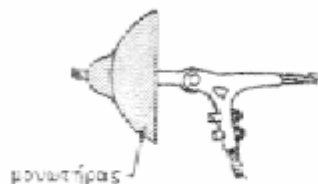
Για κάθε είδος αγωγού χρησιμοποιείται ο κατάλληλος σύνδεσμος. Παραδείγματος χάριν, για τους αγωγούς αλουμινίου ή ASCR έχουμε τα ακόλουθα σχήματα.



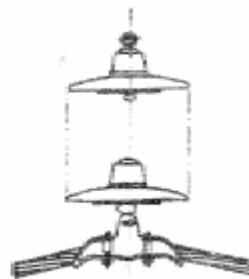
Σχήμα 3.18 : Εξαρτήματα σύνδεσης αγωγών αλουμινίου ή ACSR

Εξαρτήματα ανάρτησης αγωγών

Για τη στήριξη των αγωγών στους μονωτήρες έχουμε τους συνδέσμους π.χ. τους σφιγκτήρες τέρματος και τους σφιγκτήρες ανάρτησης.



Σχήμα 3.19 : Σφιγκτήρας τέρματος



Σχήμα 3.20 : Σφιγκτήρας ανάρτησης

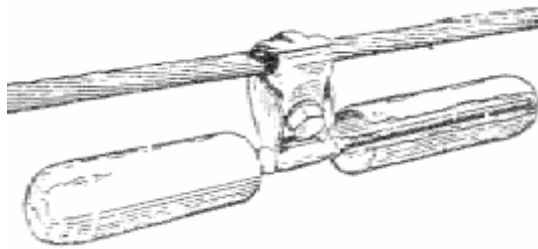
Ειδικά στα τέρματα των γραμμών δέονται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.21

Αποσβεστήρες ταλάντωσης

Στις γραμμές μεταφοράς τα ανοίγματα των γραμμών είναι μεγάλα. Στους αγωγούς των γραμμών αυτών είναι δυνατόν να προξηνηθούν μηχανικές δονήσεις που οφείλονται στην ταχύτητα του ανέμου, σε απότομες εκφορτίσεις χιονιού ή πάγου ή και σε στροβιλισμούς του αέρα. Οι δονήσεις αυτές προξενούν ζημιές στον αγωγό στο σημείο στήριξης του, καθώς και στους μονωτήρες. Γι' αυτό το λόγο τοποθετούνται αποσβεστήρες ταλαντώσεων (σιγαστήρες) στους αγωγούς και από τις δύο πλευρές του μονωτήρα.



Σχήμα 3.22 : Αποσβεστήρας ταλαντώσεων γραμμών μεταφοράς

Οι σιγαστήρες αποτελούνται από το σφιγκτήρα και μ' αυτόν αναρτώνται στους αγωγούς. Στο κάτω άκρο τους υπάρχουν δύο κομμάτια συρματόσχοινο που στα άκρα τους είναι στερεωμένα αντίβαρα από γαλβανισμένο σίδηρο. Οι σιγαστήρες απορροφούν μέρος της ενέργειας των ταλαντώσεων που μετατρέπεται σε θερμότητα.

Για τους αποσβεστήρες ταλάντωσης διακρίνουμε 3 είδη :

- 1) Βραχύβιες ταλαντώσεις, που διακρίνονται από ένα παλμό μεγάλου πλάτους.
- 2) Ταλαντώσεις χαρακτηριζόμενες ως δονητές (καθέτως του αγωγού μικρού πλάτους και μικρού μήκους κύματος και υψηλής συχνότητας)
- 3) Ταλαντώσεις με καλπασμό του αγωγού με μεγάλα μήκη κύματος, μεγάλα πλάτη, μικρή συχνότητα.

Η εύρεση της δόνησης γίνεται με τον ακόλουθο τύπο του Karman.:

$$\varepsilon = 0,2 \frac{U}{d} \quad (3.2.1)$$

όπου U= ταχύτητα του ανέμου,

d= διάμετρος αγωγού.

Εύρεση της ιδιοσυχνότητας

Η εύρεση της ιδιοσυχνότητας των αγωγών επιτυγχάνεται με τον ακόλουθο τύπο:

$$\omega_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(i\pi)^4 EI}{m\alpha^4} + \frac{(i\pi)^2 H}{m\alpha^2}} \quad (3.2.2)$$

όπου α = μήκος κόμματος

H = οριζόντια έλξης

m = μάζα ανά μέρη

$E.I.$ = συντελεστής ακαμψίας, ο οποίος δύναται να μηδενιστεί

i = δείκτης για τις ταλαντώσεις, όπου

0 αρμονικές $i=1$

4 αρμονικές $i=5$

10 αρμονικές $i=11$

19 αρμονικές $i=20$

Η εύρεση της ιδιοσυχνότητας επιβάλλεται για την απομάκρυνση των φαινόμενων του συντονισμού.

3.3 Θεμελιώσεις

3.3.1 Γενικά

Η θεμελίωση είναι το όνομα που δίνεται στο σύστημα που μεταφέρει στο έδαφος τα διάφορα φορτία σταθερής (νεκρά) και μεταβλητής (ενεργά) κατάστασης, που αναπτύσσονται από τον πυλώνα και τους αγωγούς. Τα θεμέλια μπορούν να υποβληθούν ποικιλοτρόπως σε θλιπτικές ή δυνάμεις στήριξης, σε διατμητικές και δυνάμεις ανύψωσης, είτε μεμονωμένα είτε ως αποτέλεσμα οποιουδήποτε συνδυασμού δύο ή τριών από τις δυνάμεις.

Συνήθως, το περιοριστικό φορτίο ως προς τη σχεδίαση των θεμελίων των γραμμών μεταφοράς είναι το φορτίο ανύψωσης. Από αυτή την άποψη, υπάρχει μια σημαντική διαφορά μεταξύ του σχεδίου των θεμελίων για τις γραμμές μεταφοράς σε σχέση με το σχέδιο των θεμελίων για τα περισσότερα συνηθισμένα δομικά έργα. Συνεπώς, το σύνολο της βιβλιογραφίας που περιγράφει τεχνικές σχεδίασης για τα θεμέλια των εναέριων γραμμών μεταφοράς είναι σχετικά μικρό συγκρινόμενο με τη διαθέσιμη βιβλιογραφία για περισσότερο παραδοσιακές πρακτικές σχεδίασης θεμελίων δομικών έργων.

Το επιλεγόμενο σχέδιο θεμελίωσης για ένα συγκεκριμένο πυλώνα πρέπει να παρέχει μια οικονομική και αξιόπιστη υποστήριξη για τη διάρκεια ζωής της γραμμής. Η θεμελίωση πρέπει να είναι συμβατή με το έδαφος και δεν πρέπει να χάνει την αντοχή της με τα χρόνια. Με την προοδευτική αύξηση των τάσεων των συστημάτων μεταφοράς έχει υπάρξει μια σχετική αύξηση στα μεγέθη των θεμελίων και αξίζει να αναφερθεί ότι με έναν τυπικό αγωγό μιας γραμμής 500 kV, οριακά θλιπτικά φορτία και φορτία ανύψωσης, ενός σκέλους, 70 ή 80 τόνων είναι συνηθισμένα για τους πυλώνες ευθυγραμμίας. Με τους πυλώνες τάνυσης, αναπτύσσονται συχνά οριακά φορτία 200 ή 300 τόνων. Σε έδαφος με μικρή ικανότητα να φέρει φορτίο οι διαστάσεις των θεμελίων γίνονται σημαντικές.

Στο παρελθόν ήταν συχνά αποδεκτό να σχεδιάζονται τα θεμέλια για μεγαλύτερες από τις υπολογισθείσες δυνάμεις, έτσι ώστε να επιτρέπονται αβεβαιότητες στα εδαφολογικά χαρακτηριστικά. Με τα πολύ σημαντικά μεγέθη των θεμελίων για τη μεταφορά υπερυψηλής (EHV και UHV) τάσης σήμερα, είναι προφανές ότι σημαντική οικονομία μπορεί να γίνει στα σχέδια παραγωγής θεμελίων, έτσι ώστε να ταιριάζουν ακριβώς με τις συνθήκες του εδάφους.

Όλο και περισσότερο οι γραμμές μεταφοράς διέρχονται μέσω περιοχών με συνθήκες κακής γης, συχνά για λόγους ευκολίας. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη για τη χρήση ειδικών, γενικά μεγαλύτερων, θεμελίων. Τα προβλήματα διοικητικής μέριμνας από την εγκατάσταση μεγάλων θεμελίων, συχνά σε δύσκολες συνθήκες γης, μπορούν επίσης να είναι σημαντικά και πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την εξέταση του σχεδίου των θεμελίων.

3.3.2 Τύποι εδάφους

Το έδαφος στο οποίο τα θεμέλια εγκαθίστανται μπορεί να ποικίλει από πυριγενές, προσχλωσιγενές ή μεταμορφωσιγενές πέτρωμα, μη συνεκτικά εδάφη, άμμο ή αμμοχάλικο, έως συνεκτικό έδαφος, συνήθως άργιλο. Τα εδάφη, εξίσου, με υψηλό οργανικό περιεχόμενο, παραδείγματος χάριν τύρφη, επικρατούν επίσης. Μπορούν ακόμα να βρεθούν και σύνθετα εδάφη, με παραδείγματα αυτών τα αμμώδη αμμοχάλικα και τη λασπώδη άμμο ή την αμμώδη τύρφη.

Θεμελιώδης στην κατάλληλη σχεδίαση των θεμελίων είναι μια ακριβής σειρά εδαφολογικών δοκιμών για να καθοριστεί το πεδίο των τύπων του εδάφους για τους οποίους τα σχέδια των θεμελίων θα απαιτηθούν. Είναι ορθή πρακτική να πραγματοποιούνται οι εδαφολογικές δοκιμές σε ένα ποσοστό της τάξης της μίας στις πέντε τοποθεσίες πυλώνων. Αυτό είναι γενικά επαρκές για να επιτρέψει μια ακριβή πρόβλεψη του πεδίου των τύπων του εδάφους που καθιερώνονται. Πρέπει να επισημανθεί, εντούτοις, ότι με τους μεγάλους πυλώνες που έχουν τετραγωνικές βάσεις 15 ή 20m, περιστασιακά κάθε ένα από τα τέσσερα σκέλη ενός πυλώνα μπορεί να θεμελιωθεί σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους εδάφους.

3.3.3 Τύποι θεμελίωσης

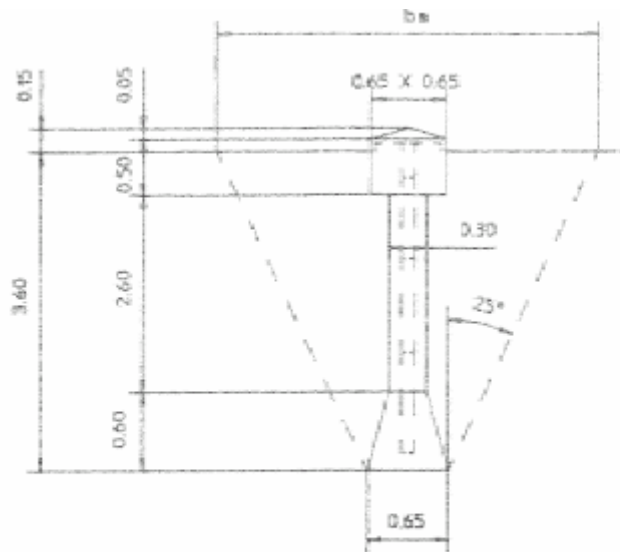
Υπάρχουν επτά βασικοί τύποι θεμελίων των πυλώνων :

- Χαλύβδινη σχάρα θεμελίωσης
- Πλατειά και επιφανειακή βάση υποστήριξης (πέλμα) από σκυρόδεμα
- Θεμελίωση τύπου έγχυτων αιωρούμενων πασσάλων ή τύπου υδατοστεγούς θαλάμου με αέρα για κατασκευές μέσα στο νερό από σκυρόδεμα
- Θεμελίωση με πάσσαλο
- Θεμελίωση τύπου βράχου
- Θεμελίωση τύπου πεδίου
- Καινοτόμες θεμελιώσεις.

3.3.4 Υπολογισμοί θεμελίωσης

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι υπολογισμού της ικανότητας ανύψωσης και στήριξης της θεμελίωσης. Για τους σκοπούς του συγγράμματος αυτού θα περιοριστούμε σε μια απλή προσέγγιση, που πρέπει να αντιμετωπιστεί με προσοχή. Εντούτοις, οι μέθοδοι που υποδεικνύονται θα δώσουν εύλογα ακριβή αποτελέσματα για σχετικά επιφανειακά θεμέλια, που υιοθετούνται συνήθως στους πυλώνες των γραμμών μεταφοράς. Μια επιφανειακή θεμελίωση ορίζεται συνήθως ως μία στην οποία το εύρος του πέλματος είναι μεγαλύτερο από το καθορισμένο βάθος.

Είναι συνηθισμένο να υπολογίζεται η ικανότητα ανύψωσης μιας θεμελίωσης ως ίση με τη μάζα του εδάφους που περιλαμβάνεται στο κόλουρο στερεό, που αναπτύσσεται μεταξύ της βάσης του πέλματος θεμελίωσης και της επιφάνειας του εδάφους. Η γωνία του μπροστινού μέρους του κόλουρου στερεού με την κατακόρυφο ορίζεται συνήθως ως ϕ και ποικίλει από 35° μέχρι 40° στο βράχο, 25° στον καλό ομοιογενή σκληρό άργιλο και μηδέν στο διαποτισμένο μη συνεκτικό έδαφος. Η πυκνότητα του εδάφους ποικίλει από μόλις πάνω από 2000 kg/m^3 για τον ομοιογενή βράχο σε περίπου 1600 kg/m^3 για το έδαφος με κανονική περιεκτικότητα σε υγρασία και σε περίπου 800 ή 900 kg/m^3 στην περίπτωση του εδάφους που υποβάλλεται σε υδάτινη ανύψωση. Παράδειγμα της μεθόδου υπολογισμού της ικανότητας ανύψωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.23.



Volume of concrete

$$\begin{aligned}
 & \times 0,6 (0,65^2 + 0,3^2 + 0,65 \times 0,3) / 12 = 0,111 \\
 & \times 0,3^2 \times 2,60 / 4 = 0,183 \\
 & 0,65^2 \times 0,5 = 0,211 \\
 & 0,65^2 \times 0,05 / 3 = 0,007 \\
 & \hline
 & 0,512^3
 \end{aligned}$$

Volume of frustum

$$\begin{aligned}
 b_s &= 2 \times 3,6 \tan 25 + 0,65 = 3,632 \\
 \text{volume} &= 3,6 [(3,632^2 + 0,65^2 \\
 & + 3,632 \times 0,65) / 12 = 10,81\text{m}^3
 \end{aligned}$$

Weight of concrete $0,512 \times 2240 \text{ kg/m}^3 = 1146\text{kg}$

Weight of ground $10,81 \times 1600 \text{ kg/m}^3 = 17296\text{kg}$

Total uplift capacity $= 18442\text{kg}$

Σχήμα 3.23 : Θεμελίωση τύπου έγχυτων αιωρούμενων πασσάλων από σκυρόδεμα

3.3.5 Θεμελιώσεις εναέριων γραμμών μεταφοράς (ελληνικού συστήματος)

Κάθε πύργος στηρίζεται σε τέσσερα ανεξάρτητα θεμέλια από σκυρόδεμα.

Οι ορθοστάτες των σκελών του πύργου περιβάλλονται από το σκυρόδεμα της θεμελίωσης που ενισχύεται αν χρειασθεί με οπλισμό σκυροδέματος.

Προβλέπονται τυποποιημένες ειδικές επιμηκύνσεις στελεχών θεμελίωσης, που χρησιμοποιούνται ανάλογα με την διαμόρφωση του εδάφους. Τα μήκη και οι αναγκαίες ποσότητες των στελεχών καθορίζονται από την Επιχείρηση πριν από την βιομηχανοποίηση τους.

Χρησιμοποιούνται οι εξής τύποι θεμελιώσεων: Αγκύρωση τύπου βράχου, τύπου έγχυτων αιωρούμενων πασσάλων από οπλισμένο σκυρόδεμα (AUGER), τύπου πέδιλου για διάφορες τάσεις εδάφους. Για κάθε τύπο θεμελίωσης καθορίζεται κατά την παραγγελία του χάλυβα πύργων αντίστοιχο τυποποιημένο μήκος στελέχους..

Κάθε πύργος θα συνοδεύεται από τέσσερις ράβδους γείωσης, μία για κάθε θεμέλιο. Αυτές είναι χαλύβδινες, επιψευδαργυρωμένες εν θερμώ, διαμέτρου 2 CM και μήκους 2,0 m και συνδέονται ανά μία σε κάθε θεμέλιο προς το αντίστοιχο στέλεχος θεμελίωσης στο κάτω του μέρος και σε κατάλληλο κοχλία μέσω μονόκλωνου χαλύβδινου επιψευδαργυρωμένου εν θερμώ αγωγού, ώστε να επιτυγχάνεται καλή ηλεκτρική σύνδεση της ράβδου προς τον πύργο.

Για συμπληρωματική γείωση όπου απαιτείται μπορεί να χρησιμοποιηθεί μονόκλωνος χαλύβδινος αγωγός εδάφους διαμέτρου 1 CM ο οποίος συνδέεται προς τον πύργο στον πρώτο κοχλία πάνω από το έδαφος. Χρειάζονται τέσσερις τέτοιοι κοχλίες επαρκούς μήκους για κάθε πύργο (ένας για κάθε σκέλος).

Σημειώνεται ότι τα παραπάνω ισχύουν για πυλώνες γραμμής 150 kV ελαφρού τύπου απλού κυκλώματος.

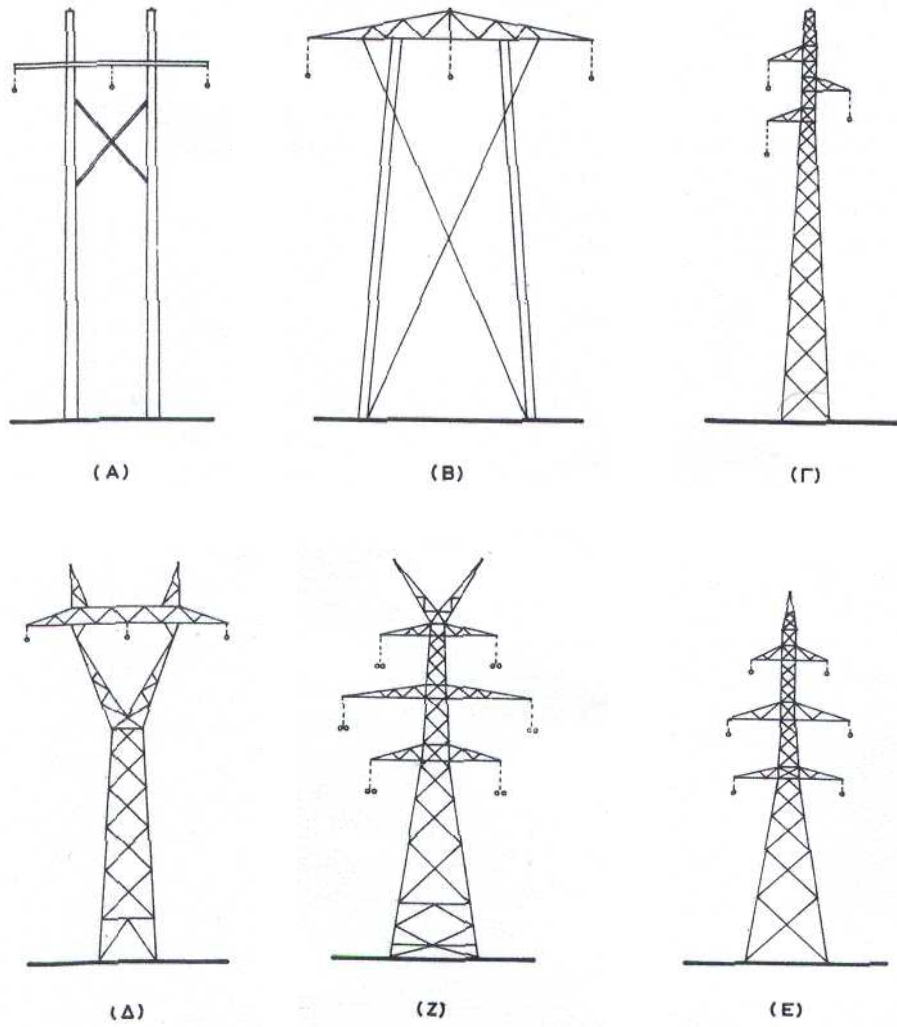
3.4 Στηρίγματα

3.4.1 Γενικά

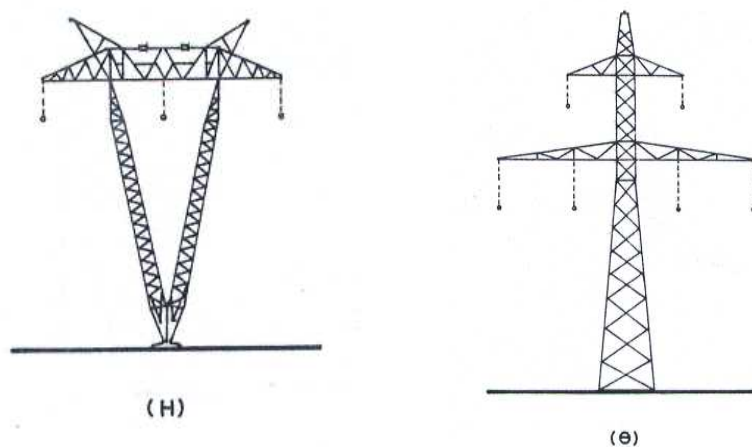
Όπου απαιτείται πολύ μεγάλη αντοχή και διάρκεια ζωής χρησιμοποιούνται χαλύβδινοι πυλώνες, οι οποίοι καλούνται και πύργοι. Πλήθος τέτοιων φορέων χρησιμοποιείται στις γραμμές μεταφοράς υψηλής και υπερυψηλής τάσεως σε όλο τον κόσμο. Στα σχήματα 3.24, 3.25, 3.26 και 3.27 εικονίζονται διάφοροι τύποι πυλώνων γραμμών μεταφοράς, μεταξύ των οποίων και οι χρησιμοποιούμενοι από την Δημοσία Επιχείρηση Ηλεκτρισμού στις γραμμές 66, 150 και 400 kV. Συνήθως από ένα σταθμό παραγωγής αναχωρούν και φθάνουν στις περιοχές μείζονος φορτίου περισσότερα από ένα ανεξάρτητα κυκλώματα γραμμών μεταφοράς. Μεγαλύτερη αξιοπιστία μεταφοράς επιτυγχάνεται, όπως είναι φυσικό, όταν κάθε κύκλωμα αποτελεί χωριστή και ανεξάρτητη γραμμή, οι δε ζώνες διελεύσεως των διαφόρων γραμμών χωρίζονται μεταξύ τους με σημαντική απόσταση κατά το μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής. Η αρχή αυτή, όμως, είναι δαπανηρή και συχνά ανεφάρμοστη, κυρίως σε κατοικημένες περιοχές, όπου η διάθεση ζωνών διελεύσεως για τις γραμμές είναι δυσχερής. Οπωσδήποτε, όμως, σε περιπτώσεις, στις οποίες κάθε κύκλωμα φέρεται σε χωριστούς πυλώνες, η πιθανότητα ταυτόχρονης βλάβης και στα δύο είναι πολύ απομακρυσμένη και γι' αυτό στην πράξη είναι συνήθης η παράλληλη όδευση δύο ή και περισσότερων γραμμών στον ίδιο διάδρομο διελεύσεως.

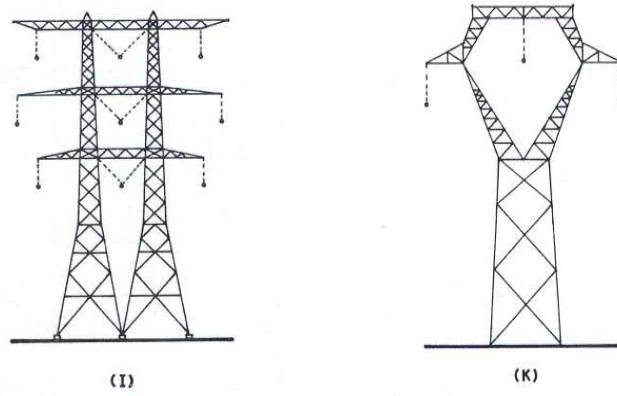
Όπου είναι δύσκολη η εξεύρεση επαρκών διαδρόμων διελεύσεως, όπως σε περιπτώσεις ορεινού χαρακτήρα του εδάφους ή και για λόγους μικρότερου κόστους μεταφοράς, εις βάρος όμως της αξιοπιστίας αυτής, χρησιμοποιούνται γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος, στις οποίες δύο ανεξάρτητα κυκλώματα φέρονται σε κοινούς πυλώνες. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται ευρύτατα στα δίκτυα μεταφοράς 150 kV και 400 kV του ελληνικού συστήματος. Η μειωμένη αξιοπιστία της μεταφοράς με γραμμές διπλού κυκλώματος οφείλεται στη σημαντική πιθανότητα ταυτόχρονης βλάβης και των δύο κυκλωμάτων είτε σε περιπτώσεις μηχανικής βλάβης ενός ή περισσότερων πυλώνων, είτε σε περιπτώσεις προσβολής της γραμμής από κεραυνό.

Στις περιπτώσεις ευθυγράμμων οδεύσεων δεν απαιτείται συνήθως διαμήκης στήριξη των αγωγών σε κάθε πυλώνα και οι αγωγοί καθ' όλο το μήκος της ευθυγραμμίας στηρίζονται μόνο κατακόρυφα ή αναρτώνται στους πυλώνες της γραμμής, οι οποίοι στην περίπτωση αυτή καλούνται πυλώνες "ευθυγραμμίας".

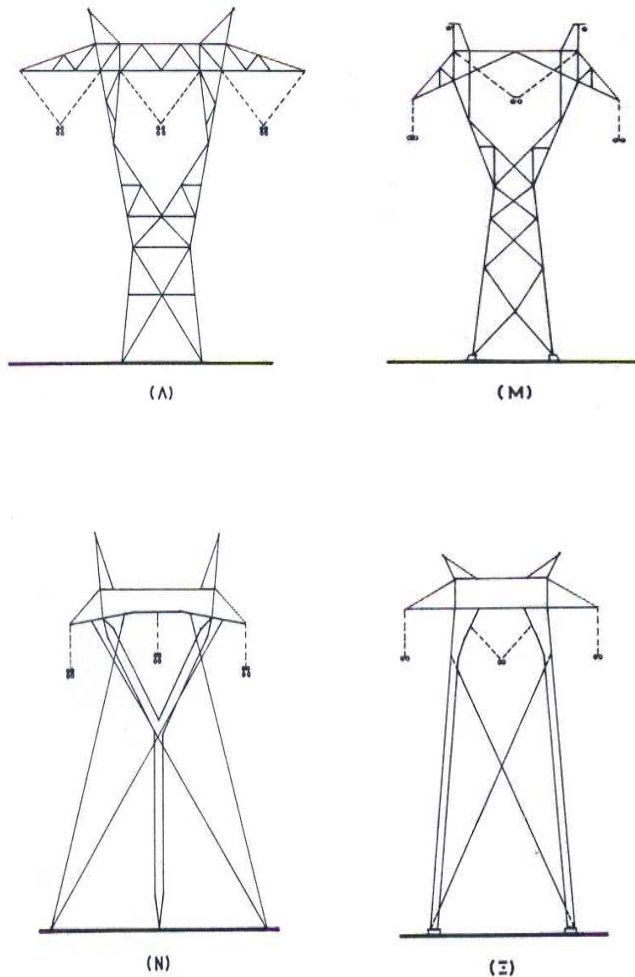


Σχήμα 3.24 : τύποι πυλώνων γραμμών μεταφοράς υψηλής και υπερύψηλης τάσης ενός (Α,Β,Γ,Δ) και δυο (Ε,Ζ) κυκλωμάτων. Ο Α είναι τύπου Η, με ξύλινους φορείς. Στις γραμμές μεταφοράς του ελληνικού συστήματος χρησιμοποιούνται οι τύποι Α(μερική εφαρμογή στις γραμμές 66 kV) Δ και Ε (γραμμές 150 kV) και Ζ (γραμμές 400 kV)

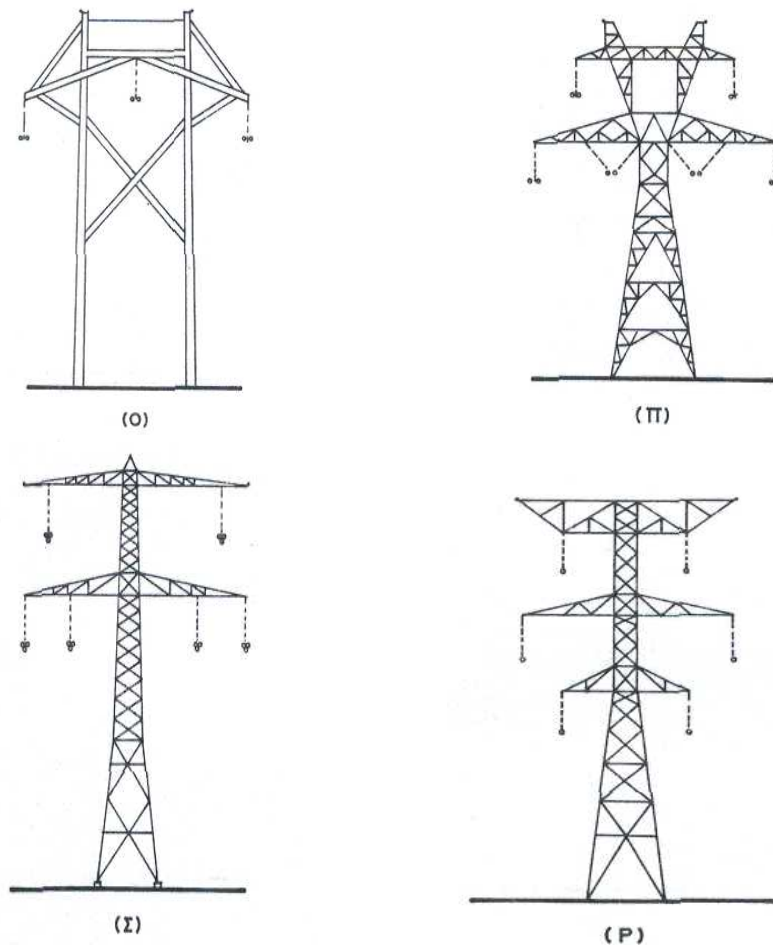




Σχήμα 3.25 : Τύποι πυλώνων γραμμών μεταφοράς υψηλής και υπερύψηλης τάσης ενός (H,K), και δυο (Θ) και τριών (I) κυκλωμάτων



Σχήμα 3.26 : Τύποι πυλώνων γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιούμενοι στα 500 kV (M,N,Ξ) και 735 kV (A)



Σχήμα 3.27 : Διάφοροι τύποι πυλώνων γραμμών μεταφοράς ενός και δυο κυκλωμάτων σε γραμμές 345-400 kV

Εν τούτοις, κατά διαστήματα ή όσες φορές αλλάζει η κατεύθυνση της γραμμής ή στα τέρματα των γραμμών, απαιτείται η χρησιμοποίηση πυλώνων "τομής" ή "τέρματος" ή "γωνίας". Οι πυλώνες αυτοί είναι ισχυρότεροι από τους πυλώνες ευθύγραμμιας, ώστε να είναι σε θέση να παραλαμβάνουν τις διαμήκεις και εγκάρσιες πρόσθετες μηχανικές τάσεις, τις οποίες μεταφέρουν επάνω τους οι αγωγοί στις ανωτέρω περιπτώσεις. Οι πυλώνες τομής παρέχουν τη δυνατότητα τερματισμού των αγωγών της γραμμής επάνω τους από οποιαδήποτε από τις δύο πλευρές, οι δε πυλώνες τέρματος από τη μία και μόνο πλευρά. Οι πρώτοι χρησιμεύουν και για την παρεμπόδιση της διαδόσεως των μηχανικών ταλαντώσεων σε μακρές αποστάσεις. Οι αγωγοί στους πυλώνες αυτούς τερματίζουν μέσω αλύσεων μονωτήρων, διά μέσου των οποίων μεταβιβάζουν τις μηχανικές τάσεις στους πυλώνες, ενώ η ηλεκτρική σύνδεση των αγωγών των δύο πλευρών εξασφαλίζεται με χαλαρές συνδέσεις.

Στις περιπτώσεις στις όποιες η αλλαγή κατευθύνσεως είναι μικρή, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ένας τροποποιημένος τύπος πυλώνα εύθυγραμμίας ικανός να υποστεί την καταπόνηση, την οποία συνεπάγεται η γωνία των αγωγών.

Πάντως και οι απλοί πυλώνες εύθυγραμμίας προβλέπονται συνήθως με ορισμένη ικανότητα αντοχής για πολύ μικρές γωνίες. Αυτοί οι τύποι πυλώνων χρησιμοποιούνται σε ομαλά κατά κανόνα εδάφη, όπου οι θέσεις των πυλώνων είναι δυνατόν να επιλεγούν κατά επιθυμητό τρόπο. Εν τούτοις, σε περιπτώσεις διελεύσεως ποταμών ή κοιλάδων, ο μελετητής της γραμμής έχει περιορισμένες δυνατότητες επιλογής θέσεων και συχνά πρέπει να τοποθετήσει πύργους σε ψηλές θέσεις των δύο πλευρών ή οχθών. Αυτό κατά κανόνα οδηγεί σε ειδικές κατασκευές, που ικανοποιούν τις ειδικές απαιτήσεις των εκάστοτε συνθηκών.

Ειδικές και συνήθως πολύ σύνθετες κατασκευές πυλώνων απαιτούνται στις θέσεις αντιμεταθέσεως των φάσεων μιας γραμμής, σε όσες περιπτώσεις εφαρμόζεται αυτή, για την εξισορρόπηση της αυτεπαγωγής και της χωρητικότητας της γραμμής. Για μια μεμονωμένη γραμμή απλού κυκλώματος μόνο δύο αντιμεταθέσεις σε δύο ενδιάμεσα σημεία μεταξύ σταθμών ή υποσταθμών απαιτούνται, δεδομένου ότι ο αγωγός κάθε φάσεως θα έχει τότε κάθε μία από τις τρεις θέσεις επί ένα τρίτο της συνολικής αποστάσεως. Όπου δύο ή περισσότερα κυκλώματα ηλεκτρικής ενεργείας οδεύουν παράλληλα μεταξύ των ή προς κυκλώματα τηλεπικοινωνιών, είναι δυνατό να απαιτούνται συχνότερες αντιμεταθέσεις για την εξισορρόπηση, όχι μόνο της ίδιας αυτεπαγωγής και της ίδιας χωρητικότητας των κυκλωμάτων, αλλά επίσης και της αλληλεπαγωγής και αλληλοχωρητικότητας μεταξύ κυκλωμάτων. Ο καθορισμός κατάλληλων θέσεων για τις αντιμεταθέσεις προϋποθέτει, σε ορισμένες περιπτώσεις, εκτεταμένη μελέτη της αλληλεπιδράσεως μεταξύ γειτονικών κυκλωμάτων. Έν πάση περιπτώσει, στις περιπτώσεις όπου εφαρμόζεται η αντιμετάθεση στα κυκλώματα ηλεκτρικής ενέργειας, ο αριθμός των απαιτούμενων αντιμεταθέσεων δεν είναι μεγάλος και επομένως λίγοι τέτοιοι πυλώνες απαιτούνται.

Το πρόβλημα της σχεδιάσεως των πυλώνων είναι κυρίως μηχανικό και οικονομικό, από τη στιγμή κατά την οποία είναι δεδομένα ο αριθμός των αγωγών, το μέγεθός τους, και οι επιβαλλόμενες από ηλεκτρικής απόψεως αποστάσεις μεταξύ αγωγών και μεταξύ αγωγών και γης. Προφανώς οι πυλώνες πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί για τη στήριξη των αγωγών, όχι μόνο υπό ομαλές, αλλά και υπό δυσμενείς καιρικές συνθήκες, δηλαδή με ισχυρό άνεμο και με σχηματισμό πάγου στην επιφάνεια των αγωγών. Σε ανοικτό επίπεδο έδαφος τα ανοίγματα της γραμμής, δηλαδή οι

αποστάσεις μεταξύ πυλώνων, καθορίζονται κατά το συμφερότερο τρόπο από το μελετητή της γραμμής. Εάν τα ανοίγματα είναι μεγάλα, υπάρχουν λιγότεροι φορείς ανά χιλιόμετρο γραμμής, αλλά αυτοί πρέπει να είναι ισχυρότεροι για να στηρίζουν μεγαλύτερο τμήμα γραμμής και υψηλότεροι για να τηρηθεί η απαιτούμενη απόσταση αγωγών εδάφους, δεδομένου ότι μεγαλύτερο άνοιγμα συνεπάγεται μεγαλύτερο βέλος αγωγών για την ίδια τάνυση αυτών. Ως εκ τούτου, το κόστος ανά πυλώνα προκύπτει μεγαλύτερο, αλλά απαιτούνται λιγότεροι πυλώνες. Πέρα από ένα ορισμένο μήκος ανοίγματος, για ένα δεδομένο κύκλωμα, η επιλογή του αγωγού βασίζεται περισσότερο στη μηχανική αντοχή του παρά στις ηλεκτρικές ιδιότητές του, με σύνηθες αποτέλεσμα αυξημένο κόστος αγωγού. Το μήκος του ανοίγματος καθορίζει μέχρι ενός σημείου και την απόσταση μεταξύ αγωγών φάσεων, δεδομένου ότι επηρεάζει την πιθανότητα προσεγγίσεως και επαφής αυτών στο μέσο του ανοίγματος. Επομένως, μεγαλύτερα ανοίγματα συνεπάγονται μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ αγωγών, αυξάνοντας κατ' αυτό τον τρόπο το κόστος των πυλώνων. Προσοχή πρέπει επίσης να δοθεί στις έκτακτες καταπονήσεις των πύργων, τις προκαλούμενες από θραύση ενός ή δύο αγωγών και να θεσπίζεται σε κάθε περίπτωση το σχετικό κριτήριο στο οποίο πρέπει να βασίζεται η μελέτη των πυλώνων, ώστε αυτοί να μην υποχωρούν μηχανικώς, παρά μόνο υπό τις πλέον ασυνήθεις συνθήκες.

Οι ανωτέρω παράγοντες πρέπει να σταθμισθούν κατά τη μελέτη της γραμμής, ώστε να προκύψει η συμφερότερη σχεδίαση της. Τα ανοίγματα των γραμμών μεταφοράς σε τυπικές περιπτώσεις ποικίλλουν από 150 περίπου μέτρα έως και 500 μέτρα, από τα οποία τα μεγαλύτερα αντιστοιχούν στις υψηλότερες τάσεις. Σε ασυνήθεις περιπτώσεις διαβάσεως ποταμών ή μεγάλων κοιλάδων έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς και ανοίγματα μεγαλύτερα από ένα χιλιόμετρο.

Οι ελάχιστες αποστάσεις αγωγών - εδάφους, επίσης, ποικίλλουν σημαντικά, αρχίζοντας από 7 περίπου μέτρα σε ελεύθερα εδάφη έως και 12 ή 15 μέτρα σε αγροτικές περιοχές. Όπως είναι φυσικό, το ύψος των αγωγών στους πυλώνες είναι μεγαλύτερο κατά το βέλος και το τελευταίο ποικίλλει ανάλογα με το άνοιγμα της γραμμής και την αντοχή των αγωγών. Το ύψος των αγωγών πάνω από το έδαφος μεταβάλλεται σημαντικά με τη θερμοκρασία τους, δεδομένου ότι μικρή μεταβολή του μήκους των αγωγών προκαλεί μεγάλη σχετικά μεταβολή του βέλους τους.

Οι αναφερόμενες αποστάσεις από το έδαφος θα πρέπει να θεωρούνται ως οι τιμές που αντιστοιχούν στο μέγιστο βέλος αγωγών, το οποίο θα ήταν δυνατόν να δημιουργηθεί είτε υπό μέγιστη θερμοκρασία αγωγού ή υπό χαμηλή θερμοκρασία και βαριά επιφόρτιση οφειλόμενη στην επικάθηση πάγου.

Μία γραμμή απλού κυκλώματος έχει φυσικά τρεις αγωγούς, οι οποίοι φέρουν ηλεκτρικό ρεύμα και μία διπλού κυκλώματος έξι αγωγούς. Επιπροσθέτως, υπάρχουν κατά κανόνα ένας ή δύο αγωγοί γης, εγκατεστημένοι υψηλότερα από τους αγωγούς των φάσεων, για να τους προστατεύουν από τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα. Οι αγωγοί γης, καταλλήλως εγκατεστημένοι, αποτελούν πολύ αποτελεσματικό μέσο αποφυγής των διακοπών λειτουργίας της γραμμής κατά τη διάρκεια των καταιγίδων που συνοδεύονται από κεραυνική δραστηριότητα.

3.4.2 Τύποι στηριγμάτων και οι εφαρμογές τους

3.4.2.1 Ορισμοί

Οι πυλώνες ή οι στύλοι των εναέριων γραμμών ενέργειας είναι μέρη των στηριγμάτων και αποτελούνται από τον κορμό του πυλώνα ή του στύλου, τις κορυφές των αγωγών γης και τους εγκάρσιους βραχίονες. Η τάση μεταφοράς, ο αριθμός των κυκλωμάτων, το ύψος των στηριγμάτων και άλλες παράμετροι καθορίζουν τη σχεδίαση του στηρίγματος και τα υλικά, όπου χρησιμοποιούνται ο χάλυβας, το ενισχυμένο σκυρόδεμα ή το ξύλο. Τα στηρίγματα δεσπόζουν όσον αφορά την αισθητική επίδραση μιας εναέριας γραμμής, ελέγχουν τη λειτουργική αξιοπιστία και καθορίζουν την απαραίτητη επένδυση μέχρι ενός σημείου. Πρέπει να αντέξουν αξιόπιστα τις δυνάμεις των αγωγών και τα εξωτερικά φορτία.

Στύλοι από ενισχυμένο σκυρόδεμα, χάλυβα συμπαγούς τοιχώματος (χωρίς ανοίγματα) και ξύλο καθώς επίσης και χαλύβδινοι δικτυωτοί πυλώνες και δομές σε σχήμα Π συνοψίζονται ως αυτοϋποστηριζόμενες δομές. Τα πρόσθετα καλώδια στήριξης εγγυώνται τη σταθερότητα της δομής.

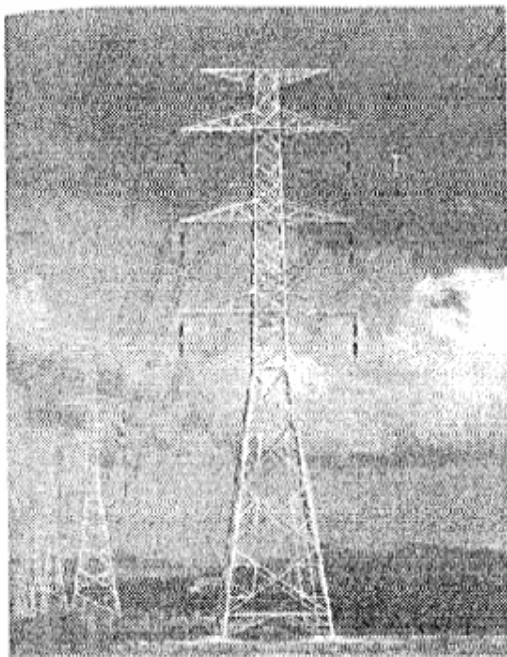
Ο τύπος της σύνδεσης του αγωγού μέσω των μονωτήρων στα στηρίγματα εξαρτάται από τη λειτουργία του στηρίγματος μέσα στο σύστημα μεταφοράς. Στα στηρίγματα ευθυγραμμίας, οι αγωγοί στερεώνονται σε αλύσεις μονωτήρων ανάρτησης ή στους μονωτήρες στήριξης της γραμμής σε περίπτωση γραμμών χαμηλής και μέσης τάσης. Οι μονωτήρες στήριξης της γραμμής είναι ικανοί σε μικρό βαθμό μόνο να μεταφέρουν δυνάμεις στην κατεύθυνση της γραμμής. Οι αλύσεις μονωτήρων

ανάρτησης ταλαντεύονται κάθετα στην κατεύθυνση των αγωγών, που είναι επικρατούσα για τη γεωμετρία του άνω μέρους του πυλώνα. Στα στηρίγματα τομής και τέρματος, οι αγωγοί συνδέονται με τη βοήθεια των αλύσεων μονωτήρων τάνυσης, που μεταφέρουν τη συνολική δύναμη τάνυσης του αγωγού στο στήριγμα.

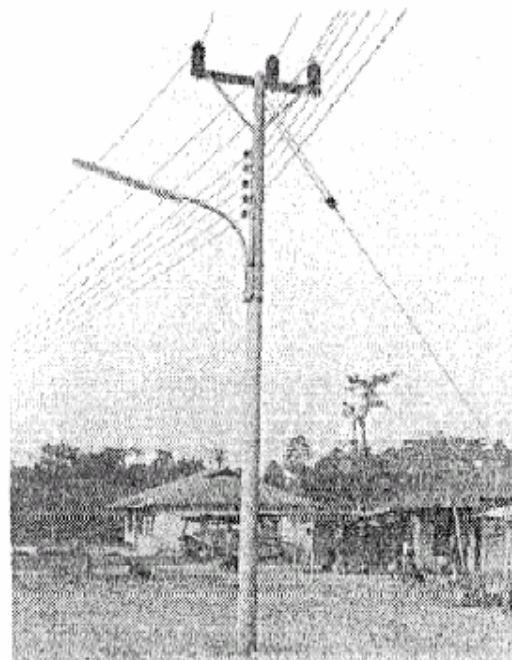
3.4.2.2 Λειτουργίες των στηριγμάτων σε μια εναέρια γραμμή

Στηρίγματα ευθυγραμμίας

Τα στηρίγματα ευθυγραμμίας μεταφέρουν τους αγωγούς σε ευθεία γραμμή. Κατά την κανονική λειτουργία δεν μεταφέρουν τις δυνάμεις τάνυσης του αγωγού στα στηρίγματα και, επομένως, μπορούν να σχεδιάζονται σχετικά ελαφριοί. Δεδομένου ότι αντιπροσωπεύουν τα πλεονεκτικότερα στηρίγματα αγωγών, όσον αφορά την επένδυση, επιδιώκεται στο να είναι τα τμήματα γραμμών εξοπλισμένα καθ' όσο είναι δυνατό με στηρίγματα ευθυγραμμίας. Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζεται το στήριγμα ευθυγραμμίας μιας γραμμής 220 kV, ενώ στην εικόνα 3.2 ο στύλος ανάρτησης μιας γραμμής 33 kV.



Εικόνα 3.1 : Πυλώνας ευθυγραμμίας γραμμής 220 kV με αλύσεις μονωτήρων



Εικόνα 3.2 : Στύλος ευθυγραμμίας γραμμής 33 kV με μονωτήρες στήριξης της γραμμής

Στηρίγματα ευθυγραμμίας - γωνίας

Τα στηρίγματα ευθυγραμμίας - γωνίας χρησιμεύουν ως στηρίγματα για την ανάρτηση των αγωγών όπου η γραμμή αλλάζει κατεύθυνση κατά τις γωνίες εκτροπής της γραμμής. Σε αυτήν την περίπτωση, οι αλύσεις μονωτήρων ανάρτησης έχουν μια κεκλιμένη θέση ακόμη και χωρίς τη δράση του αέρα. Τα στηρίγματα ευθυγραμμίας - γωνίας χρησιμοποιούνται για εκτροπές γραμμών μεταξύ 0° και 20° και αποκτούν μεγαλύτερη σημασία για γραμμές με ένα ή δύο κυκλώματα και τάσεις μέχρι 110 kV. Σε περίπτωση υψηλότερων τάσεων προκύπτει μια δυσμενής γεωμετρία του άνω μέρους του πυλώνα. Επομένως το οικονομικό πλεονέκτημά τους συγκρινόμενο με τα στηρίγματα γωνίας πρέπει να εξεταστεί για κάθε έργο. Η σύνδεση των αγωγών στις δομές ευθυγραμμίας - γωνίας είναι τεχνικά ασύμφορη.

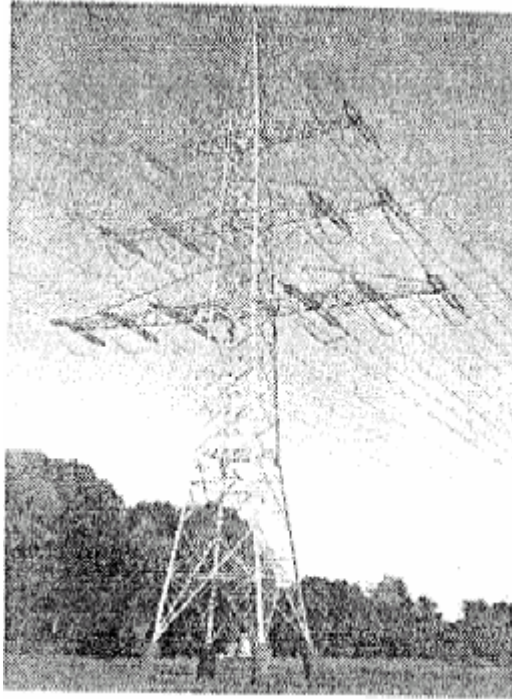
Στηρίγματα γωνίας

Τα στηρίγματα γωνίας μεταφέρουν τις προκύπτουσες δυνάμεις τάνυσης των αγωγών εκεί όπου η γραμμή αλλάζει κατεύθυνση κατά τις γωνίες εκτροπής της γραμμής. Σε αντίθεση με τα στηρίγματα ευθυγραμμίας - γωνίας, είναι εξοπλισμένα με αλύσεις μονωτήρων τάνυσης. Τα στηρίγματα γωνίας φορτίζονται με τον ίδιο τρόπο με τα στηρίγματα γωνίας - τομής. Στα γειτονικά σε τέτοια στηρίγματα ανοίγματα μπορούν να εμφανιστούν ιδιαίτερες διαφορές στην δύναμη τάνυσης των αγωγών, π. χ. λόγω της ανομοιομορφης επικάλυψης με πάγο. Εντούτοις, αυτός ο τύπος στηρίγματος δεν σχεδιάζεται για μια αντίστοιχη περίπτωση φόρτισης, σε αντίθεση με τα στηρίγματα γωνίας - τομής. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού, τα στηρίγματα γωνίας χρησιμοποιούνται σπάνια σε περιοχές που είναι επιρρεπείς σε έντονο σχηματισμό πάγου, π. χ. στην κεντρική και βόρεια Ευρώπη.

Στηρίγματα τομής και γωνίας - τομής

Τα στηρίγματα τομής και γωνίας - τομής μεταφέρουν τις δυνάμεις τάνυσης των αγωγών κατά την κατεύθυνση της γραμμής ή κατά τη συνισταμένη κατεύθυνση, αντίστοιχα, και χρησιμεύουν επιπροσθέτως ως άκαμπτα σημεία στη γραμμή. Σχεδιάζονται για δυνάμεις τάνυσης αγωγών που διαφέρουν στις δύο κατευθύνσεις της γραμμής και εξασφαλίζουν την προστασία της γραμμής ενάντια σε αλυσιδωτές βλάβες. Στην κεντρική Ευρώπη είναι διαδεδομένη πρακτική να χρησιμοποιούνται στηρίγματα γωνίας - τομής σε πρακτικά κάθε γωνιακό σημείο της γραμμής. Αυτό διευκολύνει επίσης την εγκατάσταση των αγωγών. Σε περίπτωση μακριών, ευθειών

τμημάτων της γραμμής, τα στηρίγματα τομής πρέπει να διαταχθούν σε αποστάσεις μεταξύ 5 και 10 km για να παρέχουν άκαμπτα σημεία στη γραμμή και κατά συνέπεια, να περιορίζουν τις αλυσιδωτές βλάβες, που μπορεί να αρχίσουν να συμβαίνουν στα στηρίγματα ευθυγραμμίας. Στην εικόνα 3.3 παρουσιάζεται το στήριγμα τομής μιας γραμμής 110 kV.



Εικόνα 3.3 : Πυλώνας τομής γραμμής 110 kV
με αλύσεις μονωτήρων τάνυσης

Στηρίγματα τέρματος

Τα στηρίγματα τέρματος μεταφέρουν τις συνολικές δυνάμεις τάνυσης των αγωγών κατά την κατεύθυνση της γραμμής στη μια πλευρά. Συχνά, τα στηρίγματα τέρματος φορτίζονται επιπρόσθετα από τους αγωγούς που οδηγούν στις εισόδους των υποσταθμών, οι οποίοι λειτουργούν συχνά υπό μεγάλη γωνία ως προς τον οριζόντιο άξονα και από τις δυνάμεις τάνυσης των αγωγών, που προκαλούνται από τις μικρές αποστάσεις στην είσοδο. Αυτές οι συνθήκες φόρτισης μπορεί να οδηγήσουν σε δυσμενή φορτία σε μεμονωμένα μέλη των χαλύβδινων δικτυωτών πυλώνων και πρέπει να εξεταστούν κατά τη διάρκεια της σχεδίασης. Τα στηρίγματα τέρματος των γραμμών διπλού κυκλώματος με μόνο ένα κύκλωμα εγκατεστημένο υφίστανται ένα υψηλό φορτίο στρέψης.

Ειδικά στηρίγματα

Στις γραμμές μεταφοράς ένα στήριγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες λειτουργίες των μεμονωμένων τύπων στηριγμάτων, π. χ. στην περίπτωση διακλαδιζόμενων στηριγμάτων, όπου δύο κυκλώματα μπορούν να διέλθουν και ένα ή δύο άλλα κυκλώματα τερματίζονται. Ένα τέτοιο διακλαδιζόμενο στήριγμα προϋποθέτει τη λειτουργία ενός στηρίγματος γωνίας ή γωνίας - τομής σχετικά με τα κυκλώματα που διέρχονται. Τα κυκλώματα τερματισμού φορτίζουν το στήριγμα όπως στην περίπτωση των στηριγμάτων τέρματος. Οι περιπτώσεις φόρτισης πρέπει να συνδυαστούν για να καλύψουν τους πιο δυσμενείς όρους φόρτισης λαμβάνοντας υπ' όψιν τη λειτουργία ενός τέτοιου στηρίγματος.

3.4.2.3 Σχεδίαση στηρίγματος και εφαρμογή

Επιλογή σχεδίου στηρίγματος

Πολυάριθμα σχέδια στηριγμάτων χρησιμοποιούνται στις εναέριες γραμμές μεταφοράς, όπως οι αυτοϋποστηριζόμενοι πυλώνες χάλυβα, οι χαλύβδινοι πυλώνες με καλώδια στήριξης (guyed), είτε συμβατικού τύπου είτε διαγώνιας ανάρτησης σχοινιών, οι αυτοϋποστηριζόμενοι χαλύβδινοι στύλοι, οι εύκαμπτοι και ημιεύκαμπτοι χαλύβδινοι πυλώνες και στύλοι, οι ξύλινοι στύλοι, τα ξύλινα πλαίσια τύπου Η και οι στύλοι ή οι κατασκευές από σκυρόδεμα. Η επιλογή του πιο κατάλληλου σχεδίου στηρίγματος για μια ορισμένη εναέρια γραμμή μεταφοράς είναι ένα ευαίσθητο ζήτημα, που εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους υψίστης σημασίας :

- Η βέλτιστη χρησιμοποίηση των ζωνών διέλευσης, θεωρώντας ότι η δυνατότητα απόκτησης εδάφους για νέες γραμμές γίνεται όλο και περισσότερο δύσκολη και δαπανηρή. Κατά συνέπεια, για καλύτερη χρήση του εδάφους, η σχεδίαση συνεπτυγμένων γραμμών ή γραμμών πολλαπλών κυκλωμάτων είναι όλο και περισσότερο ελκυστικός και οικονομικός.
- Η μείωση των περιβαλλοντικών επιδράσεων των γραμμών τείνει επίσης να γίνει ένας βασικός παράγοντας, ειδικά σχετικά με την επίδραση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, την οπτική επίδραση και την επίδραση της τοποθεσίας.
- Ένα από τα αρχικά ενδιαφέροντα του σχεδιαστή γραμμών είναι να εξασφαλίζει ότι η γραμμή μεταφοράς είναι σε θέση να μεταφέρει την απαραίτητη ενέργεια σε μια λογική τιμή.

- Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της γραμμής ενδιαφέρει επίσης πολύ, επειδή αυτό το σημείο θα έχει έναν εξέχοντα ρόλο στην επιλογή του τύπου του στηρίγματος για μια νέα γραμμή.
- Θέση και σημασία της γραμμής.
- Το έδαφος και η πρόσβασή του είναι καθοριστικά σχετικά με τα μήκη των ανοιγμάτων και τις τοποθεσίες των στηριγμάτων. Οι βαριοί στύλοι από μπετό δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια εδαφική έκταση μη προσπελάσιμη από βαριά φορτηγά.
- Αριθμός κυκλωμάτων που εγκαθίστανται στις συνηθισμένες δομές.
- Το μηχανικό φορτίο των αγωγών και τα φορτία που αντέχουν λόγω κλιματολογικών παραγόντων.
- Το απαραίτητο ύψος των δομών για να ξεπεραστούν τα όποια εμπόδια.
- Η χρήση του εδάφους κάτω από μια νέα γραμμή και στην κοντινή περιοχή.
- Οι δυνατότητες να αποκτηθεί η ζώνη διέλευσης και οι τοποθεσίες των στηριγμάτων, καθώς επίσης και οι αποζημιώσεις που θα πληρωθούν.
- Το κεραυνικό επίπεδο και η ρύθμιση των αγωγών γης.
- Η διαθεσιμότητα σχεδίων στηριγμάτων.
- Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή και τη συντήρηση της γραμμής.
- Τελευταίο, αλλά όχι λιγότερο σημαντικό, η απαραίτητη επένδυση για την κατασκευή μιας νέας γραμμής.

Η επίδραση αυτών των παραμέτρων ποικίλλει από γραμμή σε γραμμή και από περιοχή σε περιοχή. Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του στηρίγματος για μια μεμονωμένη γραμμή μπορεί να αποδειχθεί οικονομική ιδιαίτερα για γραμμές μεγάλου μήκους.

Αυτοϋποστηριζόμενοι χαλύβδινοι δικτυωτοί πυλώνες

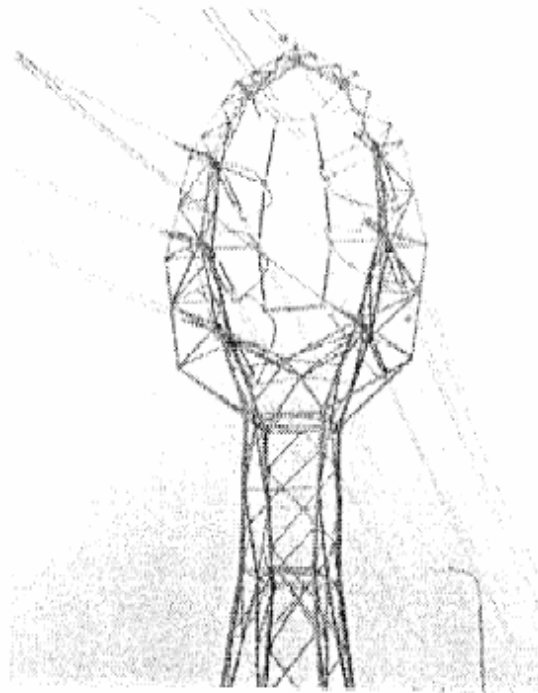
Οι αυτοϋποστηριζόμενοι χαλύβδινοι δικτυωτοί πυλώνες είναι οι πιο παραδοσιακοί τύποι που χρησιμοποιούνται στις εναέριες γραμμές ενέργειας. Υιοθετούνται, κυρίως, εκεί όπου οι απαιτήσεις λόγω των τοπικών συνθηκών και του περιβάλλοντος επιτάσσουν τοποθεσίες πυλώνων και ζώνη διέλευσης περιορισμένου εύρους (εικόνα 3.4). Γραμμές εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) που υπερβαίνουν τα 150 kV είναι συχνά εξοπλισμένες με αυτόν τον τύπο στηρίγματος. Η διαμόρφωσή

τους μπορεί να ρυθμιστεί για να προσαρμόσει διάφορα κυκλώματα και όλους τους τύπους διαμορφώσεων των αγωγών. Το σχέδιο του χαλύβδινου δικτύωματος είναι επίσης οικονομικό και σε περίπτωση ψηλών πυλώνων (εικόνα 3.5).

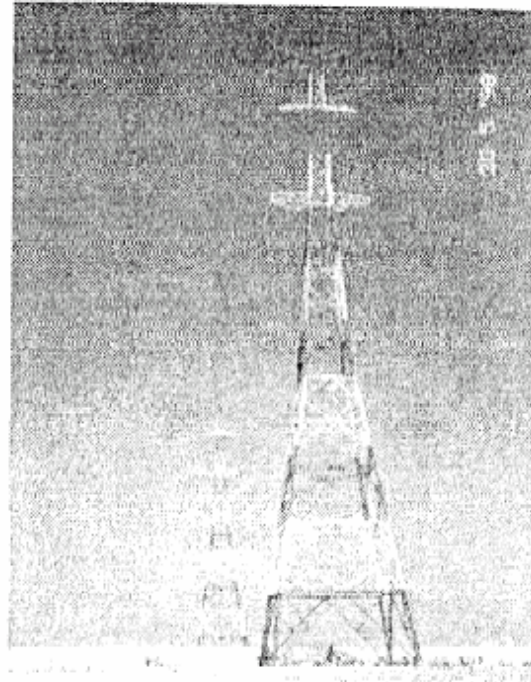
Τα βάρη και τα μήκη των στοιχείων των πυλώνων που μεταφέρονται είναι χαμηλότερα συγκρινόμενα με τους χαλύβδινους στύλους από σκυρόδεμα ή χάλυβα συμπαγούς τοιχώματος.

Εάν είναι απαραίτητο, η αναβάθμιση των υπάρχοντων πυλώνων μπορεί να πραγματοποιηθεί σχετικά απλά. Η ανταλλαγή των εγκάρσιων βραχιόνων είναι δυνατή. Η αύξηση των υπάρχοντων υψών των πύργων μπορεί να επιτευχθεί με την παρεμβολή πρόσθετων τμημάτων κορμού του πυλώνα. Η ζημιά που συμβαίνει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μπορεί να αποκατασταθεί με απλά μέσα επίσης. Η εγκατάσταση πρόσθετων μερών, όπως η τηλεπικοινωνιακή κεραία και οι σχετικές πλατφόρμες, είναι δυνατή, εάν η δομική ευστάθεια το επιτρέπει. Οι πυλώνες που δεν είναι πλέον απαραίτητοι μπορούν να απορριφθούν και να ανακυκλωθούν. Ο χάλυβας χωρίς προστατευμένη επιφάνεια προσφέρει μόνο μια χαμηλή αντίσταση ενάντια στην επίδραση του κλίματος και του περιβάλλοντος. Σήμερα, όλοι οι χαλύβδινοι δικτυωτοί πυλώνες είναι γαλβανισμένοι με βύθιση εν θερμώ για προστασία από τη διάβρωση και λαμβάνουν συχνά ένα πρόσθετο προστατευτικό επίστρωμα, με συνέπεια έναν μακροχρόνιο κύκλο ζωής.

Οι γραμμές που εγκαθίστανται με αυτοϋποστηριζόμενους χαλύβδινους δικτυωτούς πυλώνες χρειάζονται μεγάλη ποσότητα χάλυβα για να κατασκευαστούν, να μεταφερθούν και να ανεγερθούν. Επομένως, άλλα σχέδια τους αντικαθιστούν, ιδιαίτερα σε μεγάλου μήκους γραμμές υπερυψηλής τάσης απλού κυκλώματος σε λιγότερο πυκνοκατοικημένες περιοχές και σε αγροτικές ή μη-καλλιεργήσιμες εκτάσεις.



Εικόνα 3.4 : Πυλώνας 380 kV προσαρμοσμένος σε τοπικές απαιτήσεις



Εικόνα 3.5 : Πυλώνας ευθυγραμμίας 380 kV που διασχίζει το Σουέζ

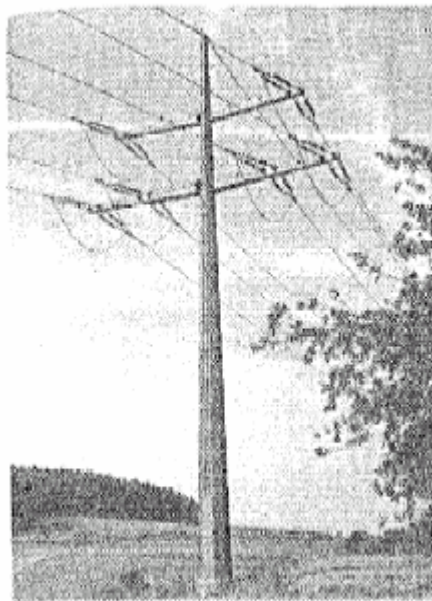
Αυτοϋποστηριζόμενοι χαλύβδινοι στύλοι

Οι αυτοϋποστηριζόμενοι χαλύβδινοι στύλοι χρησιμοποιούνται συχνά στις κορεσμένες αστικές ή προαστιακές περιοχές, όπου η διαθεσιμότητα ζωνών διέλευσης είναι περιορισμένη και ανοίγματα μικρού μήκους είναι δυνατά μόνο. Η χρήση τους, σε τέτοιες περιπτώσεις, αποτελεί μια πολύτιμη εναλλακτική λύση στα υπόγεια καλώδια. Παρέχουν επίσης τη δυνατότητα χρησιμοποίησης ως συμπαγείς δομές, συμπεριλαμβάνοντας τη λειτουργία μονωτικών εγκάρσιων βραχιόνων φτιαγμένων, για παράδειγμα, από σύνθετους μονωτήρες. Όσον αφορά την αισθητική, οι χαλύβδινοι στύλοι συμμορφώνονται με την επιθυμία να χρησιμοποιούνται ευχάριστες οπτικά δομές, που απαιτούνται συχνά στις αστικές περιοχές ή σε άλλες περιοχές, όπου η αισθητική μπορεί να διαδραματίσει κάποιο ρόλο στην επιλογή του στηρίγματος.

Οι στύλοι ευθυγραμμίας φτιαγμένοι από τμήματα δοκών τύπου Η μπορούν να επιλεγούν για τις γραμμές μέσης τάσης. Δεδομένου ότι δεν απαιτούν μεγάλη προσπάθεια στην παραγωγή, οι δαπάνες τους ανά μονάδα βάρους είναι σχετικά χαμηλές, αν και έχουν ένα σχετικά μεγάλο νεκρό βάρος. Τα τμήματα των δοκών τύπου Η παρουσιάζουν διαφορετική αντίσταση σχετική με τους κύριους άξονές των εγκάρσιων τομών τους και μια μικρή δυσκολία στρέψης μόνο.

Οι άνευ ραφής χαλύβδινοι σωληνωτοί στύλοι χάλυβα με διαφορετικές διαμέτρους από τμήμα σε τμήμα ή με συνεχώς κωνική μορφή παράγονται με κύλιση ή διέλκυση. Είναι δυνατό να προσαρμοστούν οι διαστάσεις των διατομών τους στη ροπή κάμψης. Δεδομένου ότι ακριβός εξοπλισμός είναι απαραίτητος για την κατασκευή, αυτός ο τύπος στύλου υιοθετείται στις χώρες όπου οι τοπικοί κατασκευαστές τον προσφέρουν.

Οι χαλύβδινοι κωνικοί στύλοι με έξι, οκτώ ή περισσότερες πλευρές κατασκευάζονται από χαλύβδινα μεταλλικά ελάσματα με λυγισμό και συγκόλληση, επιτρέποντας κατά συνέπεια να παραχθούν στύλοι με σχετικά υψηλή αντίσταση και επίσης, επαρκή δυσκολία στρέψης. Η μορφή και η διατομή μπορούν να προσαρμοστούν στο φορτίο. Οι χαλύβδινοι κωνικοί στύλοι χρησιμοποιούνται επίσης για τις γραμμές υψηλής τάσης. Στην εικόνα 3.6 παρουσιάζεται ένας στύλος ευθυγραμμίας από χάλυβα συμπαγούς τοιχώματος μιας γραμμής 110 kV διπλού κυκλώματος. Επίσης, γραμμές 400 kV έχουν κατασκευαστεί παγκοσμίως χρησιμοποιώντας χαλύβδινους στύλους, παραδείγματος χάριν στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Ολλανδία . Γραμμές εξοπλισμένες με τέτοιους στύλους χρειάζονται σημαντικά υψηλότερες επενδύσεις για 110 kV και υψηλότερες τάσεις μεταφοράς λόγω, μεταξύ άλλων, των σημαντικά μεγαλύτερων προσπαθειών που απαιτούνται για τις θεμελιώσεις, σε σύγκριση με το διαδεδομένο σχέδιο των χαλύβδινων δικτυωτών πυλώνων, ειδικά σε περίπτωση δυσμενούς υπεδάφους.



Εικόνα 3.6 : Μονοκόμματος, χαλύβδινος κωνικός στύλος από χάλυβα συμπαγούς τοιχώματος γραμμής 110 kV

Στύλοι από σκυρόδεμα με ενίσχυση χάλυβα

Οι στύλοι από σκυρόδεμα με ενίσχυση χάλυβα έχουν χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικά σχέδια για εναέριες γραμμές ενέργειας κατά τη διάρκεια πολλών ετών και χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως ως στύλοι από στρεφόμενο σκυρόδεμα για εγκαταστάσεις χαμηλής και μέσης τάσης. Επίσης, αυτό το σχέδιο έχει υιοθετηθεί πιο πρόσφατα για γραμμές 110 και 132 kV διπλού κυκλώματος. Η δυνατότητα να επιτευχθεί η απαιτούμενη αντοχή για τους στύλους γωνίας και γωνίας - τομής με στρεφόμενο σκυρόδεμα ήταν απαραίτητη προϋπόθεση για αυτήν την εφαρμογή. Οι μηχανικώς δονούμενοι στύλοι από σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται για τις γραμμές όπου η εγκατάσταση στύλων από στρεφόμενο σκυρόδεμα δεν μπορεί να δικαιολογηθεί οικονομικά και, από την άλλη, η μεταφορά των συγκεκριμένων στύλων θα ήταν πάρα πολύ ακριβή.

Όταν είναι σχεδιασμένοι και κατασκευασμένοι κατάλληλα, οι στύλοι από σκυρόδεμα θα έχουν μια μακροχρόνια διάρκεια ζωής χωρίς οποιεσδήποτε ενέργειες για τη συντήρηση. Ειδικότερα, η επανεπίστρωση των στύλων δεν θα είναι απαραίτητη, εν αντιθέσει με τις χαλύβδινες δομές. Οι στύλοι από σκυρόδεμα έχουν μια αμείωτη λειτουργική ικανότητα ακόμα και μετά από 50 έτη σε λειτουργία, όπως αποδεικνύεται από παραδείγματα.

Οι στύλοι από μπετό χαρακτηρίζονται από μία ευνοϊκή οπτική επίδραση, η οποία καθίσταται ειδικού ενδιαφέροντος κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Είναι λογικοί και ανταγωνιστικοί όσον αφορά τις δαπάνες, λόγω της σημαντικά χαμηλότερης απαίτησης σε χάλυβα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για έργα σε χώρες όπου ο χάλυβας πρέπει να εισαχθεί, αλλά το τσιμέντο και τα σκύρα (άμμος και χαλίκι) για την παραγωγή σκυροδέματος είναι διαθέσιμα.

Το μεγάλο βάρος παρουσιάζεται ως ένα σημαντικό μειονέκτημα για τους στύλους από σκυρόδεμα, αυξάνοντας, κατά συνέπεια, τις προσπάθειες για τη μεταφορά και την ανέγερση. Το μεγάλο βάρος περιορίζει την εφαρμογή σε λιγότερα ψηλά ύψη στύλων στις περισσότερες περιπτώσεις. Αντίστοιχα, ισχυρά εργαλεία είναι απαραίτητα για την ανέγερση, τα οποία δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε τύπο εδάφους. Όταν δεν μεταφέρεται όπως πρέπει μπορούν να δημιουργηθούν ρωγμές και ο στύλος να μην είναι άλλο λειτουργικός. Λόγω του μεγάλου βάρους μόνο η μεταφορά μεταξύ κοντινών αποστάσεων πρέπει να εξεταστεί. Εκτός από την παραγωγή, οι δυνατότητες μεταφοράς περιορίζουν τα μήκη των στύλων που

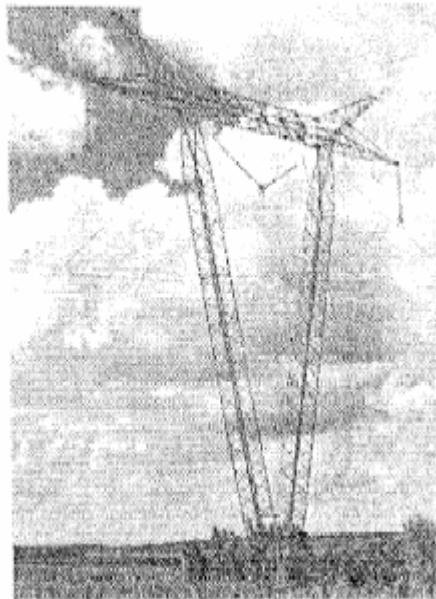
υλοποιούνται. Στις ορεινές περιοχές, η χρήση των στύλων από σκυρόδεμα καθίσταται συχνά αδύνατη εξαιτίας της δυσκολίας να μεταφερθούν οι στύλοι στις περιοχές τοποθέτησης.

Ξύλινοι στύλοι

Η χρήση ξύλινων στύλων για τις εναέριες γραμμές ενέργειας είναι διαδεδομένη στις χώρες όπου το ξύλο είναι διαθέσιμο σε καλή ποιότητα και μεγάλες ποσότητες. Παραδείγματος χάριν, γραμμές 110 και 220 kV έχουν κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας ξύλινες δομές στη Βόρεια και Νότια Αμερική και στην Αυστραλία.

Στηρίγματα με καλώδια στήριξης (Guyed)

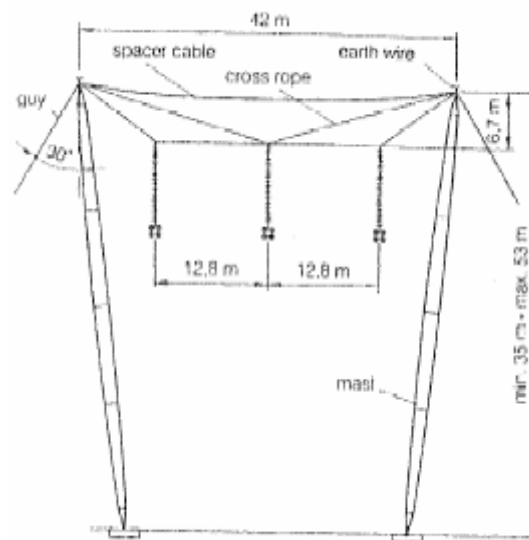
Τα στηρίγματα με καλώδια στήριξης εισήχθησαν νωρίς στις δεκαετίες του '30 σε σχήμα Η ή σε σχήμα Π. Οι τύποι με καλώδια στήριξης σε σχήμα V (και σπάνια σε σχήμα Y) ήρθαν αργότερα, αλλά σιγά-σιγά χρησιμοποιούνται ως υποκατάστατο των αυτοϋποστηριζόμενων δομών για μεγάλου μήκους γραμμές απλού κυκλώματος, ειδικά σε επίπεδα ή εύκολα προσβάσιμα εδάφη, για οικονομικούς και αισθητικούς λόγους. Στις γεωργικές περιοχές, που είναι κυρίως επίπεδες, τα στηρίγματα με καλώδια στήριξης πρέπει να εφοδιάζονται με προστασία των αγκύρων ενάντια στην επίδραση των μηχανημάτων, που είναι επιρρεπή στο να τους προκαλέσουν ζημιά. Στην εικόνα 3.7 παρουσιάζεται ένας πυλώνας με καλώδια στήριξης σε σχήμα V.



Εικόνα 3.7 : Πυλώνας με καλώδια στήριξης σε σχήμα V

Στηρίγματα χωρίς εγκάρσιους βραχίονες

Η εμφάνιση των πυλώνων χωρίς εγκάρσιους βραχίονες, όπου ο εγκάρσιος βραχίονας αντικαταστάθηκε από τα σχοινιά, μείωσε επιπλέον το βάρος του χάλυβα που είναι απαραίτητος για το σχεδιασμό γραμμών απλού κυκλώματος. Τέτοιοι τύποι πυλώνων κατέστησαν ευκολότερη την απόκτηση συνεπτυγμένων γραμμών με αυξημένο φορτίο χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης. Οι πυλώνες χωρίς εγκάρσιους βραχίονες υιοθετήθηκαν αρχικά για γραμμές 735 kV απλού κυκλώματος στον Καναδά. Στο σχήμα 3.28 παρουσιάζεται το γενικό σχέδιο τους. Αυτοί οι τύποι πυλώνων χρειάζονται σχετικά ευρείες περιοχές για τις τοποθεσίες ανέγερσης τους. Η χρήση τους, επομένως, περιορίζεται σε λίγο πολύ ακαλλιέργητες εκτάσεις.



Σχήμα 3.28 : Γενικό σχέδιο πυλώνα χωρίς εγκάρσιους βραχίονες

3.4.3 Γεωμετρία του άνω τμήματος του κορμού του πυλώνα

3.4.3.1 Απαιτήσεις

Τα στηρίγματα των γραμμών μεταφοράς απαιτούν ένα σχέδιο με τις αρκούντως ασφαλείς αποστάσεις μεταξύ των αγωγών μέσα σε ένα άνοιγμα, καθώς επίσης και μεταξύ της γης και των ηλεκτροφόρων μερών των στηριγμάτων, υπό όλες τις κλιματολογικές και ηλεκτρικές επιδράσεις που είναι πιθανές να εμφανιστούν. Το ύψος σύνδεσης των αγωγών εξαρτάται από την απαραίτητη απόσταση από το έδαφος ή από τα αντικείμενα που συναντώνται. Η απαραίτητη απόσταση καθορίζεται κυρίως από τη σχετική τάση της γραμμής. Το ύψος της σύνδεσης από μόνο του δεν μπορεί να

επηρεάσει άμεσα τις διαστάσεις του άνω μέρους του πυλώνα. Η απόσταση που απαιτείται μεταξύ των αγωγών εξαρτάται κυρίως από το βέλος κάμψης και, επομένως, από το μήκος του ανοίγματος, ενώ οι αποστάσεις από τα γειωμένα μέρη του στηρίγματος καθορίζονται από τον τύπο και τη διάταξη των μονωτήρων, τις ηλεκτρικές τάσεις που ενεργούν στη γραμμή και τη δράση του αέρα στους αγωγούς και τους μονωτήρες. Οι αγωγοί και οι μονωτήρες ταλαντεύονται με τον αέρα. Επομένως, οι θέσεις των αγωγών και των μονωτήρων εξαρτώνται από τη δράση του αέρα, η οποία διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο κατά τη σχεδίαση της γεωμετρίας του άνω μέρους του πυλώνα. Η πιθανότητα να εμφανιστεί μια ορισμένη απόσταση μπορεί να περιγραφεί με στατιστικές κατανομές.

Οι ελάχιστες επιβαλλόμενες από ηλεκτρικής απόψεως αποστάσεις εξαρτώνται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τον τύπο του διακένου του αέρα και την τάση:

- Τάσεις συχνότητας ισχύος,
- Υπερτάσεις αργού μετώπου και
- Υπερτάσεις γρήγορου μετώπου.

3.4.3.2 Επιβαλλόμενες από ηλεκτρικής απόψεως αποστάσεις σύμφωνα με τα σχετικά πρότυπα

Οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων ανάρτησης των αγωγών επιλέγονται έτσι ώστε στο κανονικό σύστημα, οι κατά τη λειτουργία ηλεκτρικές εκκενώσεις μεταξύ των ηλεκτροφόρων και των γειωμένων μερών μιας εναέριας γραμμής να είναι απίθανες. Η κανονική λειτουργία του συστήματος περιλαμβάνει διαδικασίες διακοπής, κεραυνικά πλήγματα και υπερτάσεις λόγω διακοπών του συστήματος. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 50341-1, διακρίνονται στο ελάχιστο διάκενο αέρα, που απαιτείται για να αποφευχθεί μια ανησυχητική εκκένωση μεταξύ των αγωγών και του δυναμικού της γης, και στο ελάχιστο διάκενο αέρα, το οποίο απαιτείται για να αποφευχθεί μια εκκένωση μεταξύ των ηλεκτροφόρων αγωγών. Οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών στο μέσο του ανοίγματος και η απόσταση των ταλαντευόμενων αγωγών από τα γειωμένα μέρη πρέπει επίσης να εξετασθούν.

Όσον αφορά τις αποστάσεις των αγωγών και τα διάκενα ασφαλείας για τους πυλώνες του ελληνικού συστήματος, ισχύουν τα ακόλουθα :

- Η κατακόρυφος απόσταση μεταξύ του σημείου προσδέσεως του αγωγού προστασίας και του σημείου προσδέσεως του αγωγού φάσεως θα είναι τουλάχιστον ίση προς 4,75 m. Ως σημείο προσδέσεως του αγωγού θεωρείται ο σφικτήρας αναρτήσεως ή ο σφικτήρας τέρματος.
- Η δημιουργούμενη γωνία προστασίας μεταξύ της κατακόρυφου και της ευθείας της σύνδεσης στο σημείο πρόσδεσης του αγωγού προστασίας μετά του σημείου προσδέσεως του ακραίου αγωγού φάσεως δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 30°.
- Το ύψος του σημείου προσδέσεως του αγωγού φάσεως από το έδαφος πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με 19,00 m για πυλώνα κανονικό, με τα σκέλη κανονικά και χωρίς επιμηκύνσεις κορμού ή σκελών.
- Το διάκενο ασφαλείας μεταξύ του σημείου προσδέσεως του αγωγού φάσεως και οιοδήποτε σημείου του πυλώνα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με 1,5 m για την περίπτωση αποκλίσεως της από την αλυσσο μονωτήρων αναρτήσεως από την κατακόρυφο, κατά γωνία 0° - 40° για πυλώνα ευθυγραμμίας και 0°- 60° για πυλώνα μικρής γωνίας. Το εν λόγω διάκενο πρέπει να είναι επίσης τουλάχιστον ίσο προς 0,90 m για την περίπτωση απόκλισης της αλυσσο κατά γωνία 65° για πυλώνα ευθυγραμμίας και 75° για πυλώνα μικρής γωνίας.

Σημειώνεται ότι τα παραπάνω ισχύουν για πυλώνες γραμμής 150 kV ελαφρού τύπου απλού κυκλώματος.

3.4.4 Βασικές απαιτήσεις σχεδίασης

3.4.4.1 Εισαγωγή

Το πρότυπο EN 50341-1 καθορίζει τη βασική απαίτηση για τη σχεδίαση των εναέριων ηλεκτρικών γραμμών ως εξής :

- Θα επιτελεί το σκοπό της κάτω από ένα καθορισμένο σύνολο συνθηκών, με αποδεκτά επίπεδα αξιοπιστίας και κατά τρόπο οικονομικό. Αυτό αναφέρεται στις παραμέτρους των απαιτήσεων αξιοπιστίας.

- Δεν θα υπόκειται σε αλυσιδωτή κατάρρευση εάν μια βλάβη προκληθεί σε ένα καθορισμένο μέρος. Αυτό αναφέρεται στις παραμέτρους των απαιτήσεων προστασίας.
- Δεν θα υπόκειται στην πρόκληση ανθρώπινων τραυματισμών ή απώλειας ζωής κατά τη διάρκεια της κατασκευής και της συντήρησης. Αυτό αναφέρεται στις παραμέτρους των απαιτήσεων ασφάλειας.

Για να συμμορφωθούν με αυτές τις βασικές απαιτήσεις, όλα τα μέρη μιας εναέριας γραμμής πρέπει να επιλεγούν, να σχεδιαστούν και να εγκατασταθούν έτσι ώστε να λειτουργούν αξιόπιστα υπό τις κλιματολογικές επιδράσεις που αναμένονται κανονικά, υπό τη μέγιστη τάση λειτουργίας, υπό την επίδραση του τρέχοντος φορτίου και υπό φορτίο βραχυκύκλωσης. Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις και οι υπερτάσεις λόγω διακοπών πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Όσον αφορά τη σχεδίαση του στηρίγματος, οι επιδράσεις στα στηρίγματα συνδυάζονται με τις περιπτώσεις φόρτισης, έτσι ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη απόδοση ως προς την αξιοπιστία, την προστασία και την ασφάλεια. Αβεβαιότητες λόγω της διασποράς των επιδράσεων, των ατελειών των στηριγμάτων και της παραλλαγής των ιδιοτήτων των υλικών πρέπει να εξεταστούν για να επιτευχθεί μια αρκετά χαμηλή πιθανότητα να συμβούν, έτσι ώστε να γίνουν αποδεκτές σχετικά με την αξιοπιστία και την ασφάλεια.

Τα φορτία που επιδρούν στα στηρίγματα κατά την κανονική λειτουργία εξαρτώνται από το δομικό σχέδιο και από τη χρήση και τη θέση των στηριγμάτων στην εναέρια γραμμή. Αυτό το γεγονός λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση των στηριγμάτων, επειδή μια διαβάθμιση της αντοχής τους οδηγεί σε μείωση των επενδύσεων, χωρίς διακινδύνευση της αξιοπιστίας. Κατά τη σχεδίαση των στηριγμάτων εξετάζονται οι επιδράσεις λόγω των διαφορών στις δυνάμεις τάνυσης των αγωγών, εξαιτίας ανομοιόμορφης επικάλυψης πάγου και λόγω μιας τοπικής ζημιάς. Για οικονομικούς λόγους δεν θα σχεδιαστούν όλα τα στηρίγματα τόσο ισχυρά, έτσι ώστε να αντέχουν όλα τα πλέον δυσμενή φορτία. Αλλά σε σημαντικές τοποθεσίες μέσα στη ζώνη διέλευσης, τα στηρίγματα είναι διατεταγμένα έχοντας σχεδιαστεί για αυτές τις ειδικές συνθήκες. Επομένως, οι αλυσιδωτές βλάβες θα είναι περιορισμένες σε ένα μικρό τμήμα της γραμμής μόνο. Λόγω αυτών των παραγόντων, διαφορετικοί τύποι στηριγμάτων χρησιμοποιούνται σε μια γραμμή.

3.4.4.2 Στατικό σχέδιο

Τα στηρίγματα σχεδιάζονται έτσι ώστε η επαρκής τελική αντοχή και η λειτουργικότητα, κάτω από τις δεδομένες απαιτήσεις, να είναι εγγυημένες. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας κατάλληλα μοντέλα σχεδίασης, που περιγράφουν σωστά τη στατική λειτουργία. Αυτά τα μοντέλα σχεδίασης είναι βασισμένα σε εγκεκριμένες θεωρίες και πρακτικές σχεδίασης, οι οποίες ελέγχονται επίσης με δοκιμές. Τέτοια μοντέλα για την ανάλυση και τη σχεδίαση καθιερώνονται επίσης στα σχετικά πρότυπα. Η μοντελοποίηση ως τρισδιάστατων δικτυωτών πλαισίων με αρθρωμένα μέλη για τους χαλύβδινους δικτυωτούς πυλώνες και η μέθοδος ισοδύναμων μελών για το λυγισμό, σύμφωνα με το Eurocode 3, πρέπει να αναφερθούν ως κατάλληλα μοντέλα σχεδίασης.

Η λειτουργικότητα μπορεί να περιοριστεί ή να μην εξασφαλίζεται άλλο εάν το στήριγμα δοκιμαστεί σε μεγάλες παραμορφώσεις. Αυτές μπορούν να έχουν επιπτώσεις στην αισθητική, εντούτοις, οι παραμορφώσεις των σημείων ανάρτησης των αγωγών μειώνουν, επίσης, τις επιβαλλόμενες από ηλεκτρικής απόψεως αποστάσεις. Η λειτουργικότητα διασφαλίζεται εάν οι παραμορφώσεις των στηριγμάτων δεν καθιστούν προβληματική τη λειτουργία της εναέριας γραμμής. Ο υπολογισμός των παραμορφώσεων πραγματοποιείται για να επιβεβαιώσει τη λειτουργικότητα.

Η επαρκής αντοχή εξασφαλίζει ότι η ζημιά του στηρίγματος λόγω υπερβολικά μεγάλων παραμορφώσεων, η απώλεια της ευστάθειας, η ανατροπή ή η κατάρρευση δεν είναι πιθανή. Εάν τα όρια αντοχής των μεμονωμένων στοιχείων δεν ξεπερνιούνται, η επαρκής αντοχή ολόκληρης της δομής επιβεβαιώνεται. Τα όρια αυτά καθορίζονται από τις τιμές σχεδίασης για τις εσωτερικές δυνάμεις και τις ροπές ή για τις μηχανικές τάσεις. Ένα όριο για την αντοχή, για παράδειγμα, είναι η πλαστική παραμόρφωση του υλικού που περιγράφεται από την τιμή σχεδιασμού f_{yd} της αντοχής διαρροής του υλικού. Το όριο της αντοχής καλείται επίσης δομική αντίσταση σχεδίασης. Οι επιδράσεις στα στηρίγματα έχουν ως αποτέλεσμα εσωτερικές δυνάμεις και ροπές καθώς επίσης και μηχανικές τάσεις που καλούνται αποτελέσματα των επιδράσεων. Η επαρκής αντοχή ενός στοιχείου επιβεβαιώνεται εάν το αποτέλεσμα των επιδράσεων δεν υπερβαίνει τη δομική αντίσταση.

Το στατικό σχέδιο των στηριγμάτων υποδιαιρείται σε διάφορα βήματα. Στο πρώτο βήμα, καθορίζονται οι επιδράσεις για τις περιπτώσεις φόρτισης που εξετάζονται. Εξαρτώνται από τον τύπο και τη διάταξη των αγωγών, τον τύπο και την εφαρμογή του στηρίγματος και τη γεωμετρία του στηρίγματος. Στο δεύτερο βήμα, τα αποτελέσματα των επιδράσεων, που είναι οι εσωτερικές δυνάμεις και οι ροπές στα μεμονωμένα στοιχεία, υπολογίζονται για τις δεδομένες περιπτώσεις φόρτισης. Σε κάθε περίπτωση, επιλέγονται οι μέγιστες δυνάμεις και ροπές, δεδομένου ότι μόνο αυτά τα στοιχεία επηρεάζουν την εκτίμηση. Στο τρίτο βήμα, πραγματοποιείται η εκτίμηση των στοιχείων. Για κάθε μεμονωμένο στοιχείο καθορίζεται το επικρατών φορτίο, επιλέγονται το υλικό και οι διατομές, έτσι ώστε η αντίσταση σχεδίασης τους να είναι επαρκής για να αντέξει τα αποτελέσματα των επιδράσεων. Όταν οι διεθνείς διαστάσεις και το υλικό του επιλεγμένου σχεδίου είναι γνωστές, το νεκρό βάρος της δομής και η περιοχή που εκτίθεται στον αέρα μπορούν να υπολογιστούν. Λόγω της επιρροής του νεκρού βάρους και της επίδρασης του αέρα στην ίδια τη δομή στήριξης, το τελικό σχέδιο εξαρτάται επίσης από αυτές τις παραμέτρους. Το στατικό σχέδιο του στηρίγματος μιας γραμμής μεταφοράς είναι, επομένως, σε γενικές γραμμές, μια επαναληπτική διαδικασία.

3.4.4.3 Τιμές σχεδίασης και μέθοδοι ελέγχου

Είναι στόχος του σχεδίου να ελέγξει ότι τα όρια ζημιάς ή αποτυχίας δεν θα ξεπεραστούν υπό όλες τις σχετικές συνθήκες του σχεδίου.

Η μέθοδος μερικών συντελεστών αποτελεί τη βάση για τη σχεδίαση και την κατασκευή των στηριγμάτων των γραμμών μεταφοράς. Οι μερικοί συντελεστές για τις επιδράσεις και για την αντίσταση λαμβάνουν υπ' όψιν τις αβεβαιότητες στις επιδράσεις, στα γεωμετρικά στοιχεία και στην προσομοίωση του στατικού μοντέλου. Οι μερικοί συντελεστές μπορούν επίσης να επιλεγούν αναφορικά με έναν επιθυμητό συντονισμό της αντοχής και μπορούν να εξαρτώνται, επομένως, από τον τύπο του στηρίγματος και τη λειτουργία του στη γραμμή. Εάν οι τιμές σχεδίασης για τις επιδράσεις, τις ιδιότητες του υλικού και τα γεωμετρικά στοιχεία χρησιμοποιούνται κατάλληλα στα μοντέλα σχεδίασης, καταστάσεις ζημιάς ή αποτυχίας στις εναέριες γραμμές είναι απίθανες.

3.4.5 Περιπτώσεις φόρτισης

3.4.5.1 Συνδυασμοί φορτίων

Τα διαφορετικά εξωτερικά φορτία που ενεργούν ταυτόχρονα στα στηρίγματα των εναέριων γραμμών συνδυάζονται στις περιπτώσεις φόρτισης κατά τρόπο κατάλληλο. Αυτοί οι συνδυασμοί των επιδράσεων πρέπει να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις σχετικά με την αξιοπιστία, την προστασία και την ασφάλεια. Οι περιπτώσεις φόρτισης πρέπει να λαμβάνουν υπ' όψιν όλες τις συνθήκες φόρτισης που αναμένονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής και κατά τη διάρκεια ολόκληρης της περιόδου ζωής μιας εναέριας γραμμής, έτσι ώστε η ζημιά να είναι απίθανη. Για τη σχεδίαση των στοιχείων, όλες οι επιδράσεις μιας περίπτωσης φόρτισης θεωρούνται ότι ενεργούν ταυτόχρονα και θα επιλεγεί εκείνη η περίπτωση φόρτισης, που οδηγεί στο υψηλότερο φορτίο του εν λόγω στοιχείου. Σε πολλά πρότυπα για τις εναέριες γραμμές υπάρχει διάκριση μεταξύ κανονικών και εκτάκτων φορτίων, κατά την οποία ισχύουν διαφορετικές απαιτήσεις ευστάθειας ή διαφορετικές επιτρεπόμενες μηχανικές τάσεις. Γενικά, όλες οι περιπτώσεις που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας μιας εναέριας γραμμής θεωρούνται ως κανονικό φορτίο. Το φορτίο του αέρα είναι, επομένως, ένα παράδειγμα κανονικού φορτίου. Τα φορτία ή οι συνδυασμοί φορτίων που έχουν χαμηλή πιθανότητα να συμβούν θεωρούνται ως έκτακτα φορτία, π. χ. η ανομοιόμορφη επικάθιση πάγου μεταξύ των ανοιγμάτων ή η διάχυση πάγου. Στο πρότυπο EN 50 141-1 πέντε τυποποιημένες περιπτώσεις φόρτισης διευκρινίζονται. Αυτές επηρεάζουν τα μεμονωμένα στοιχεία κατά τρόπο διαφορετικό, έτσι που δεν μπορεί να προβλεφθεί εκ των προτέρων ποιες περιπτώσεις φόρτισης θα είναι επικρατούσες για τα μεμονωμένα στοιχεία ενός στηρίγματος. Οι περιπτώσεις φόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο EN 50341-1 συνοψίζονται στον πίνακα 3.1.

Οι περιπτώσεις φόρτισης για τη σχεδίαση των στηριγμάτων και των θεμελιώσεων καθορίζονται σε κάθε πρότυπο εναέριας γραμμής ή προδιαγραφή έργου. Για παράδειγμα, για χρήσιμους ορισμούς, οι περιπτώσεις φόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο EN 50341-3-4 περιγράφονται παρακάτω.

Με βάση το σχέδιο, οι περιπτώσεις φόρτισης υποδιαιρούνται λαμβάνοντας υπ' όψιν τη μεταβολή του μήκους των ανοιγμάτων και τις εκτροπές των γραμμών που αντιστοιχούν στην εφαρμογή κάθε μεμονωμένου τύπου στηρίγματος. Για παράδειγμα, για ένα στήριγμα γωνίας, που σχεδιάζεται για εκτροπές γραμμών μεταξύ 0° και 20°,

όλες οι περιπτώσεις φόρτισης πρέπει να εξασφαλίζονται για αυτές τις δύο γωνίες για να καλύψουν όλες τις επικρατούσες τάσεις των μεμονωμένων στοιχείων. Για να υπολογιστούν οι δυνάμεις τάνυσης των στοιχείων και να ανεγερθούν τα θεμέλια, οι χαμηλότερες τιμές των μόνιμων φορτίων πρέπει να χρησιμοποιούνται εάν αυτές οι επιδράσεις μειώνουν τα αποτελέσματα άλλων επιδράσεων. Εδώ, για τα νεκρά φορτία των αγωγών δεχόμαστε το μικρότερο μήκος ανοίγματος.

Load case	Conditions
1a	Extreme wind load
1b	Wind load at a minimum temperature
2a	Uniform ice loads on all spans
2b	Uniform ice loads, transversal bending
2c	Unbalanced ice loads, longitudinal bending
2d	Unbalanced ice loads, torsional bending
3	Combined wind and ice load
4	Construction and maintenance loads
5a	Security loads, torsional loads
5b	Security loads, longitudinal loads

Πίνακας 3.1 : Πρότυπες περιπτώσεις φόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο EN 50431-1

3.4.5.2 Ακραίο φορτίο αέρα

Σε περίπτωση ακραίου φορτίου αέρα, τα μόνιμα φορτία, το φορτίο αέρα σε όλες τις σχετικές κατευθύνσεις στον αγωγό, το στήριγμα, στους μονωτήρες, τα βοηθητικά εξαρτήματα και στον εξοπλισμό καθώς επίσης και οι δυνάμεις τάνυσης των αγωγών, που αυξάνονται από τη δράση του αέρα, δεχόμαστε ότι ενεργούν ταυτόχρονα. Η δράση του αέρα κάθετα στη γραμμή ή υπό γωνία 45° (διαγώνιος αέρας) θα είναι επικρατούσα για την πλειοψηφία των στηριγμάτων ευθυγραμμίας. Άλλες κατευθύνσεις του αέρα μπορούν να αποκτήσουν μεγαλύτερη σημασία ανάλογα με τη διάταξη των αγωγών και τις γωνίες της γραμμής. Η εφαρμόσιμη θερμοκρασία επηρεάζει τη δύναμη τάνυσης του αγωγού και εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες της εξεταζόμενης γεωγραφικής περιοχής. Στον πίνακα 3.2, οι αντίστοιχες περιπτώσεις φόρτισης παρατίθενται για παράδειγμα, σύμφωνα με το EN 50341-3-4.

Στην περίπτωση φόρτισης Α δεχόμαστε ότι τα μόνιμα φορτία, ο αέρας με κατεύθυνση τον άξονα του εγκάρσιου βραχίονα στους αγωγούς, τον πυλώνα και τον εξοπλισμό, καθώς επίσης και οι δυνάμεις τάνυσης των αγωγών σε μια θερμοκρασία της τάξης των + 5°C, ενεργούν ταυτόχρονα. Αυτή η περίπτωση φόρτισης, ειδικότερα,

θα είναι επικρατούσα για τα μέλη των σκελών και τις συσφίξεις στην μπροστινή πλευρά, παράλληλα στον άξονα του εγκάρσιου βραχίονα, για τους πυλώνες ευθυγραμμίας, ευθυγραμμίας γωνίας και τους ψηλούς πυλώνες γωνίας.

Στην περίπτωση φόρτισης B δεχόμαστε ότι τα μόνιμα φορτία, το φορτίο του αέρα κάθετα στον άξονα του εγκάρσιου βραχίονα στους αγωγούς, τον πυλώνα και τον εξοπλισμό, καθώς επίσης και η σχετική δύναμη τάνυσης των αγωγών σε μια θερμοκρασία της τάξης των + 5°C, ενεργούν ταυτόχρονα. Αυτή η περίπτωση φόρτισης παράγει τις μεγαλύτερες δυνάμεις στις μπροστινές πλευρές παράλληλα στην κατεύθυνση του αέρα στην περίπτωση των ψηλών δικτυωτών πυλώνων.

Στην περίπτωση φόρτισης C δεχόμαστε ότι τα μόνιμα φορτία, το φορτίο του αέρα στους αγωγούς, τον πυλώνα και τον εξοπλισμό υπό γωνία 45° ως προς τον άξονα του εγκάρσιου βραχίονα και οι δυνάμεις τάνυσης των αγωγών σε μια θερμοκρασία της τάξης των + 5°C ενεργούν ταυτόχρονα. Η διαγώνια επίδραση του αέρα παράγει συχνά τα υψηλότερα φορτία των μελών των σκελών και των θεμελίων τους στην περίπτωση των πυλώνων ευθυγραμμίας και ευθυγραμμίας γωνίας και, σε μερικές περιπτώσεις, στους πυλώνες γωνίας και γωνία-τομής επίσης.

Load case	Conditions
A	Wind load in direction of crossarms, conductors without ice loads
B	Wind load in line direction, conductors without ice loads
C	Wind load under 45°, conductors without ice loads
D	Reduced wind load in direction of crossarms, conductors with ice loads
E	Reduced wind load in line direction, conductors with ice loads
F	Reduced wind load under 45°, conductors with ice loads
G	Conductor tensile forces at -20°C, unbalanced ice loads, conductors particularly with ice loads
H	Conductor tensile forces at -20°C or -5°C with ice load, conductors with ice loads. Differing conductor tensile forces. This case does only apply for strain towers.
I	Construction and maintenance loads, conductors without ice loads
J	Torsional load, one conductor tensile forces reduced, conductors with ice loads
K	Longitudinal bending, all conductor tensile forces reduced, conductors with ice loads
L	Load after failing of one insulator string, conductors with ice loads

Πίνακας 3.2 : Περιπτώσεις φόρτισης σύμφωνα με το EN 50341-3-4

3.4.5.3 Φορτίο αέρα στην ελάχιστη θερμοκρασία

Σε αυτή την περίπτωση φόρτισης δεχόμαστε ότι τα μόνιμα φορτία, ένα μειωμένο φορτίο αέρα συγκρινόμενο με την περίπτωση φόρτισης 1a (πίνακας 3.1) και οι δυνάμεις τάνυσης των αγωγών στην ελάχιστη θερμοκρασία ενεργούν ταυτόχρονα. Αυτή η περίπτωση φόρτισης μπορεί να είναι σημαντική όπου οι δυνάμεις των αγωγών δρουν ενάντια στη βαρύτητα στο στήριγμα. Αυτές καλούνται δυνάμεις ανύψωσης (ανοδικές).

Η περίπτωση φόρτισης G είναι εφαρμόσιμη μόνο όπου εμφανίζονται δυνάμεις ανύψωσης και πρέπει να μελετηθούν δύο συνδυασμοί φόρτισης. Στην πρώτη περίπτωση, τα μόνιμα φορτία και οι δυνάμεις τάνυσης των αγωγών ενεργούν σε μια θερμοκρασία της τάξης των -20°C . Με αυτόν τον τρόπο εμφανίζονται τα ελάχιστα βέλη κάμψης των αγωγών, με συνέπεια τις μέγιστες δυνάμεις ανύψωσης. Αυτή η περίπτωση φόρτισης θα είναι επικρατούσα εάν οι δυνάμεις ανύψωσης ενεργούν και στα δύο γειτονικά ανοίγματα. Στη δεύτερη περίπτωση ενεργούν τα μόνιμα φορτία και δεχόμαστε τα φορτία του πάγου σε ένα άνοιγμα.

3.4.5.4 Ομοιόμορφα και ασύμμετρα φορτία πάγου χωρίς αέρα

Ακραίο φορτίο πάγου

Σε περίπτωση ακραίου φορτίου πάγου, τα μόνιμα φορτία, τα φορτία του πάγου και οι δυνάμεις τάνυσης των αγωγών, που αυξάνονται λόγω του φορτίου του πάγου στην αντίστοιχη θερμοκρασία, ενεργούν ταυτόχρονα. Διάφορες συνθήκες μπορούν να διακριθούν αναφορικά με το φορτίο του πάγου. Ένα ομοιόμορφο φορτίο πάγου μπορεί να θεωρηθεί στους αγωγούς φάσης και τους αγωγούς γης, σε όλα τα ανοίγματα ενός τμήματος της γραμμής, είτε του ίδιου μεγέθους για όλους τους αγωγούς (περίπτωση φόρτισης 2a) είτε διαφορετικών τιμών στους μεμονωμένους αγωγούς, συντελώντας, στην περίπτωση αυτή, σε κάμψη των στηριγμάτων κάθετα στην κατεύθυνση της γραμμής (περίπτωση φόρτισης 2b). Σε περίπτωση ανομοιόμορφης επικάλυψης πάγου στους αγωγούς φάσης και τους αγωγούς γης, δημιουργούνται διαφορές στις δυνάμεις τάνυσης των αγωγών που φορτίζουν το στήριγμα στην κατεύθυνση της γραμμής (περίπτωση φόρτισης 2c) και μπορούν να οδηγήσουν σε ροπές στρέψης (περίπτωση φόρτισης 2d). Ο σχηματισμός πάγου στα ίδια τα στηρίγματα είναι αξιοσημείωτος μόνο στις χώρες με εξαιρετικά υψηλά φορτία πάγου, π. χ. στη Βόρεια Σκανδιναβία.

Στην περίπτωση φόρτισης J δεχόμαστε ένα φορτίο στρέψης, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη διαφορετική επικάθιση πάγου στα γειτονικά ανοίγματα, τη διάχυση πάγου και τις διαφορετικές δυνάμεις τάνυσης των αγωγών μετά από μια βλάβη της γραμμής και αντιστοιχεί στην περίπτωση φόρτισης 2d. Τα μόνιμα φορτία και τα φορτία του πάγου στους αγωγούς σε μια θερμοκρασία της τάξης των 5°C δεχόμαστε ότι ενεργούν ταυτόχρονα, ενώ η οριζόντια δύναμη τάνυσης ενός ή περισσότερων αγωγών μειώνεται ανάλογα με τη σχεδίαση των αγωγών. Η δύναμη τάνυσης των αγωγών δεχόμαστε ότι μειώνεται κατά τη μία πλευρά.

Το μέγεθος της μείωσης της δύναμης τάνυσης των αγωγών εξαρτάται από τον τύπο και το σχέδιο του στηρίγματος. Σε περίπτωση στηριγμάτων ευθυγραμμίας και ευθυγραμμίας γωνίας, η οριζόντια δύναμη τάνυσης ενός αγωγού μειώνεται στη μία πλευρά κατά 50% σε περίπτωση απλών αγωγών, σε περίπτωση πολλαπλών αγωγών με μήκη των αλύσεων μονωτήρων μέχρι 2,5 m κατά 35 %, σε περίπτωση πολλαπλών αγωγών με μήκη των αλύσεων μονωτήρων πάνω από 2,5 m κατά 35 %. Σε περίπτωση αγωγών γης, η μείωση δεχόμαστε ότι είναι 65 %.

Σε περίπτωση πυλώνων γωνίας, τομής, τέρματος και τέρματος γωνίας, η οριζόντια δύναμη τάνυσης ενός απλού αγωγού ή πολλαπλών αγωγών δεχόμαστε ότι μειώνεται στη μια πλευρά κατά 100 %. Αυτή η περίπτωση φόρτισης επηρεάζει ειδικότερα τα χαμηλότερα πέλματα του εγκάρσιου βραχίονα των πυλώνων ευθυγραμμίας και γωνίας και είναι συχνά επικρατούσα για τη σχεδίαση των συσφίξεων των δικτυωτών πυλώνων.

Στην περίπτωση φόρτισης K τα μόνιμα φορτία και τα φορτία του πάγου σε όλους τους αγωγούς σε μια θερμοκρασία της τάξης των -5°C ενεργούν ταυτόχρονα με τις δυνάμεις τάνυσης των αγωγών, που μειώνονται σε όλους τους αγωγούς κατά τη μία πλευρά του στηρίγματος. Για τα στηρίγματα ευθυγραμμίας και ευθυγραμμίας γωνίας, οι οριζόντιες δυνάμεις τάνυσης όλων των αγωγών μειώνονται κατά 20% για τους μονωτήρες στήριξης και τις αλύσεις μονωτήρων ανάρτησης με μήκη μέχρι 2,5 m, κατά 15% για μήκη των αλύσεων μονωτήρων ανάρτησης πάνω από 2,5 m. Για τους αγωγούς γης, οι δυνάμεις τάνυσης των αγωγών μειώνονται κατά 40 %. Για τους πυλώνες τομής και γωνίας - τομής, η οριζόντια δύναμη τάνυσης μειώνεται κατά τη μία πλευρά κατά 40 %. Η περίπτωση φόρτισης K επηρεάζει ειδικότερα τη σχεδίαση των στηριγμάτων τομής με μόνο ένα κύκλωμα εγκατεστημένο, όσον αφορά την διαβάθμιση των συσφίξεων των χαλύβδινων δικτυωτών δομών υποστήριξης.

3.4.5.5 Συνδυασμένο φορτίο αέρα και πάγου

Σε περίπτωση συνδυασμένου φορτίου αέρα και πάγου (περίπτωση φόρτισης 3 του πίνακα 3.1), τα μόνιμα φορτία, τα φορτία πάγου, τα φορτία αέρα στα στηρίγματα, ο εξοπλισμός και οι καλυμμένοι με πάγο αγωγοί, καθώς επίσης και οι δυνάμεις τάνυσης των αγωγών, που αυξάνονται από το φορτίο του αέρα και του πάγου, ενεργούν ταυτόχρονα. Τα ακραία φορτία αέρα και πάγου εμφανίζονται ταυτόχρονα μόνο σε σπάνιες περιπτώσεις. Κατά κανόνα, ένας συνδυασμός φορτίων θα επιλεγεί, όπου το ακραίο φορτίο πάγου και ένα μέτριο φορτίο αέρα, που αντιστοιχεί στο 40% με 70% του φορτίου του αέρα 50 ετών, θα συνδυαστούν.

Η περίπτωση φόρτισης D συνδυάζει μόνιμα φορτία, φορτία πάγου, το φορτίο του αέρα στην κατεύθυνση του άξονα του εγκάρσιου βραχίονα στους αγωγούς με το φορτίο πάγου, στο στήριγμα και τον εξοπλισμό, μαζί με τη σχετική δύναμη τάνυσης των καλυμμένων με πάγο αγωγών και τη δράση του αέρα. Η δυναμική πίεση του αέρα μειώνεται κατά 50 %, συγκρινόμενη με τις περιπτώσεις φόρτισης A έως C. Δεδομένου ότι η επίδραση του αέρα στους καλυμμένους με πάγο αγωγούς αντιπροσωπεύει ένα πρόσθετο φορτίο, οι δυνάμεις τάνυσης των αγωγών αυξάνονται. Αυτή η περίπτωση φόρτισης συντελεί στο μέγιστο φορτίο για τα μέλη σκελών των πυλώνων γωνίας και γωνίας - τομής με εκτροπές γραμμής περίπου πάνω από 40° και για τους πυλώνες τέρματος. Ο βαθμός στον οποίο αυτή η περίπτωση φόρτισης θα είναι επικρατούσα για τα στηρίγματα ανάρτησης εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου του πάγου, τις διαστάσεις των αγωγών και από το σχέδιο του στηρίγματος.

Οι περιπτώσεις φόρτισης R και F αντιστοιχούν στην περίπτωση φόρτισης D, εντούτοις, με τον αέρα να επιδρά κάθετα και υπό γωνία 45°, αντίστοιχα, ως προς τον άξονα του εγκάρσιου βραχίονα.

3.4.5.6 Φορτία κατασκευής και συντήρησης

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής και της συντήρησης φορτία μπορεί να προκύψουν, παραδείγματος χάριν από αναρριχόμενα πρόσωπα, από τις προσωρινές άγκυρες ή λόγω της σύνδεσης εργαλείων ή από την ανάρτηση του αγωγού. Αυτά τα φορτία πρέπει να εξεταστούν δεόντως κατά τη σχεδίαση των στηριγμάτων.

Κατά τη διάρκεια της ανέγερσης των πυλώνων, οι δυνάμεις εξαιτίας της διάταξης των γερανών πρέπει να εξεταστούν, καθώς επίσης και εξαιτίας των αγκύρων. Τα στηρίγματα δένονται προσωρινά κατά τη διάρκεια των διαδικασιών ανάρτησης,

κατά τις οποίες εμφανίζονται φορτία που θα μπορούσαν να υπερβούν εκείνα τα φορτία που ενεργούν μόνιμα. Ειδικά, αυξανόμενες δυνάμεις τάνυσης των αγωγών μπορούν να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια των διαδικασιών ανάρτησης. Αυξανόμενα φορτία μπορούν να εμφανιστούν και σε προσωρινές περατώσεις της διαδικασίας ανάρτησης του αγωγού. Κατά τη συντήρηση της γραμμής, είναι δυνατή η αναρρίχηση στους πυλώνες, με συνέπεια ένα πρόσθετο φορτίο στα μέλη του δικτυωτού πλαισίου. Το χαμήλωμα των αγωγών χρησιμοποιώντας αρπάγες διατεταγμένες στους εγκάρσιους βραχίονες μπορεί επίσης να οδηγήσει σε αυξημένα φορτία, τα οποία θα πρέπει να αντέξουν τα στηρίγματα.

Τα στηρίγματα πρέπει να παρέχουν επαρκή αντίσταση σε όλα τα φορτία που είναι πιθανό να εμφανιστούν κατά τις διαδικασίες κατασκευής και συντήρησης. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στις διαδικασίες κατασκευής και συντήρησης, δεδομένου ότι η βλάβη ενός στοιχείου πιθανώς θα προκαλούσε τραυματισμούς στους εναερίτες που συντηρούν τη γραμμή. Τα στηρίγματα που σχεδιάζονται για συνθήκες φορτίων πάγου είναι, κατά κανόνα, αρκετά ισχυρά έτσι ώστε να αντέχουν τα φορτία κατασκευής και συντήρησης που εμφανίζονται συνήθως. Ορισμένα στοιχεία των στηριγμάτων σε περιοχές χωρίς φορτία πάγου είναι πιθανό, παρ' όλα αυτά, να παρουσιάσουν το μέγιστο φορτίο τους κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή της συντήρησης.

Για την προσομοίωση των φορτίων κατά τη διάρκεια της κατασκευής και της συντήρησης, τα μόνιμα φορτία και τα φορτία κατασκευής, καθώς επίσης και οι δυνάμεις τάνυσης των αγωγών στους $+ 5^{\circ}\text{C}$, δεχόμαστε ότι ενεργούν ταυτόχρονα, όπως στην περίπτωση φόρτισης I. Ένα προσωρινά υψηλότερο φορτίο λόγω υπερτάνυσης των αγωγών λαμβάνεται υπ' όψιν μέσω των αυξανόμενων δυνάμεων τάνυσης των αγωγών, εφόσον ενδείκνυται. Οι περιπτώσεις φορτίων κατασκευής και συντήρησης επηρεάζουν ιδιαίτερα τη σχεδίαση των εγκάρσιων βραχιόνων. Σε περίπτωση χαλύβδινων δικτυωτών δομών, τα φορτία δεχόμαστε ότι ενεργούν στους πιο δυσμενείς κόμβους του χαμηλότερου πέλματος της μπροστινής πλευράς του εγκάρσιου βραχίονα. Για άλλα σχέδια, δεχόμαστε ότι ενεργούν στα σημεία ανάρτησης ενός αγωγού. Αυτή η περίπτωση φόρτισης μπορεί επίσης να είναι επικρατούσα για μακριά μέλη στον κορμό του πυλώνα, που χρησιμοποιούνται για αναρρίχηση, επειδή αυτά τα μέλη πρέπει να εκτιμούνται για κάμψη εξαιτίας των φορτίων κατασκευής και συντήρησης.

3.4.5.7 Φορτία προστασίας

Μέρη της γραμμής μπορούν να αποτύχουν λόγω ανεπαρκούς ποιότητας ή λόγω σαμποτάζ και μπορούν να προκαλέσουν, κατά συνέπεια, πρόσθετα φορτία στα άλλα μέρη μιας γραμμής. Ο στόχος της σχεδίασης θα είναι, στην περίπτωση αυτή, ο περιορισμός της ζημιάς και, ιδιαίτερα, η αποσόβηση καταρρεύσεων. Ειδικά, η βλάβη ενός στηρίγματος γωνίας μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση και είναι, επομένως, επικίνδυνη.

Η έκταση μιας ζημιάς θα περιοριστεί από τις επαρκείς προϋποθέσεις φόρτισης και την αντίστοιχη σχεδίαση της γραμμής. Η διάταξη των στηριγμάτων τομής στα τμήματα γραμμής μεγάλου μήκους προστατεύει τη γραμμή από κατάρρευση, επειδή αυτά τα ειδικά στηρίγματα σχεδιάζονται για να αντέχουν τις διαμήκεις δυνάμεις αγωγών. Για παράδειγμα, οι αγωγοί στη μια πλευρά του σχετικού στηρίγματος δεχόμαστε ότι φορτίζονται με ένα υποθετικό πρόσθετο φορτίο ίσο με το νεκρό βάρος του αγωγού.

Τα φορτία στρέψης και τα διαμήκη φορτία καθορίζονται με σαφήνεια. Οι λεπτομέρειες πρέπει να οριστούν στα πρότυπα ή τις προδιαγραφές των έργων. Η περίπτωση φόρτισης Η σχεδιάζεται να παρέχει άκαμπτα σημεία σε μια γραμμή και εφαρμόζεται στους πυλώνες τομής μεγάλης κλίσης και γωνίας - τομής. Για να εξασφαλιστεί η ευστάθεια των πυλώνων τομής για τα ασύμμετρα διαμήκη φορτία των αγωγών, η δύναμη ενός αγωγού δεχόμαστε ότι ενεργεί στην πιο δυσμενή θέση και τα δύο τρίτα των μονόπλευρων δυνάμεων του αγωγού ως προς όλους τους άλλους αγωγούς ενεργούν στην ίδια κατεύθυνση. Η περίπτωση φόρτισης L προσομοιώνει το φορτίο που θα εμφανιζόταν μετά από μια βλάβη μιας αλύσου ενός συνόλου πολλαπλών μονωτήρων και επηρεάζει κυρίως τη σχεδίαση των εγκάρσιων βραχιόνων. Τα μόνιμα φορτία, τα φορτία πάγου και οι σχετικές δυνάμεις τάνυσης των αγωγών στους -5°C ενεργούν ταυτόχρονα σε αυτήν την περίπτωση φόρτισης, κατά την οποία η βλάβη μιας αλύσου μονωτήρων εξετάζεται πρόσθετα.

3.4.6 Τρόπος εγκατάστασης των πυλώνων

Γενικώς, οι θεμελιώσεις αποτελούνται από τέσσερα χωρισμένα πέλματα. Αυτά κατασκευάζονται από σκυρόδεμα κλάσεως B 160, το σκυρόδεμα είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μετά το πέρας 28 ημερών αντοχή θλίψης ανερχομένη σε 160 Kg/cm^2 (χαλίκι, σκύρο και άμμος πρέπει να είναι καθαρά και απαλλαγμένα από άργιλο, οργανικές ουσίες και άλατα).

Απαγορεύεται η χρήση θαλάσσιας άμμου. Οι πύργοι δεν πρέπει να συναρμολογούνται προ προελεύσεως 15 ημέρων από την διάστρωση του σκυροδέματος. Τα εντός του σκυροδέματος ενσωματωμένα στελέχη των πύργων πρέπει να ρυθμίζονται προσεχτικός μέσω οδηγιών .

Οι βάσεις πρέπει να είναι οριζόντιες, ακριβώς ώστε να μην υπάρχουν υψομετρικές διαφορές ανάμεσα στα τέσσερα πέλματα μεγαλύτερη των 3 mm.

Τα εντός του εκ σκυροδέματος πέλματος ενσωματωμένα στοιχεία πρέπει να γειώνονται με μια επιψευδαργυρωμένη χαλύβδινη ράβδο διαμέτρου 2 cm και μήκους 200 cm .

Η ηλεκτρική αντίσταση του πύργου πρέπει να μετρείται μετά την συναρμολόγηση έκαστου τμήματος πάντα πριν την τοποθέτηση του αγωγού προστασίας ή της εγκαταστάσεως των συνδέσεων του αγωγού εδάφους. (Οι εν λόγω μετρήσεις πρέπει να λαμβάνουν χωράν μια τουλάχιστον εβδομάδα μετά την τελευταία βροχόπτωση).

Η ανέγερση πύργων πρέπει να γίνεται με κάθε προσοχή, ώστε να αποφεύγεται κάθε πιθανή φθορά της επιψευδαργύρωσης. Μετά την τοποθέτηση των αγωγών πρέπει να επιθεωρηθούν άπαντες οι κοχλίες των πύργων και να συσφυχθούν στην τελική τους θέση .

Κατά την τοποθέτηση των μονωτήρων πρέπει να λαμβάνονται τα απαιτούμενα μετρά προς αποφυγήν εκδορών ή ρωγμών.

Για την γραμμή μεταφοράς των 150 KV η άλυσος ανάρτησης αποτελείται από μια απλή άλυσο με δέκα δίσκους μονωτήρων συνδεμένων μεταξύ της κατάλληλης κεφαλής και υποδοχής, φέρουσα τους αγωγούς φάσεως επί σφιγκτήρα αναρτήσεως. Οι αγωγοί φάσεως πρέπει να προστατεύονται στα σημεία τοποθέτησης των σφιγκτήρων αναρτήσεως.

Η άλυσος τέρματος θα πρέπει να τοποθετείται στο παρά τον πύργο (γειωμένου) άκρου κέρασ προστασίας και παρά τον αγωγό (υπό τάση) άκρο στεφάνου προστασίας .

Η απόσταση μεταξύ κέρατος προστασίας και στεφάνου προστασίας πρέπει να είναι περίπου 15 cm .

Οι αποσβεστήρες ταλάντωσης πρέπει να εφαρμόζονται επί των αγωγών κατά τρόπο τέτοιο, ώστε να μην επέλθει βλάβη επί τον αγωγό ή επί των μεμονωμένων συρμάτων αυτού .

Η τάνυση και η ρύθμιση των αγωγών επιτυγχάνεται με αυλακωτούς τροχαλίες, όπου οι αύλακες πρέπει να έχουν μεγαλύτερο βάθος τουλάχιστον κατά 25% μεγαλύτερο της διαμέτρου των αγωγών και ακτίνα τουλάχιστον κατά 10% μεγαλύτερη από του αγωγού.

Εάν κατά την κατασκευή της γραμμής παρουσιαστούν βλάβες επί των αγωγών τότε χρησιμοποιούμε τον χιτώνια επισκευών. Οι συνδέσεις των αγωγών και οι συνδέσεις τέρματος επιτυγχάνονται με ειδικά εξαρτήματα πίεσεως.

Γενικώς απαγορεύεται η σύνδεση αγωγών σε ανοίγματα πάνω από σιδηροδρομικές γραμμές, υδάτινες οδούς ή εθνικές οδούς, επίσης και στα εκατέρωθεν αυτής ανοίγματα ή τμήματα γραμμών μεταξύ πύργων τάνυσης με ολιγότερα των τριών ανοιγμάτων .

Η ρύθμιση των αγωγών επιτυγχάνεται με ένα ταχύμετρο, το οποίο τοποθετείται στον πύργο σκοπεύσεως οριζόντια του άξονα του τηλεσκοπίου στο απαιτούμενο υψόμετρο του αντίστοιχου επιθυμητού βέλους, με τον κάθετο άξονα τελείως κατακόρυφο. Η σκόπευση γίνεται σε στόχο με τον προσαρμοζόμενο απέναντι πύργο και στο απαιτούμενο υψόμετρο Με την περιστροφή του ταχυμέτρου, χωρίς την κατακόρυφη μετακίνηση του, καθίσταται δυνατή η σκόπευση όλων των αγωγών από αυτή την θέση. Έτσι, κατά αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η επαλήθευση των αντίστοιχων βελών για τις διάφορες θερμοκρασίες και ανοίγματα.

Η διαφορά βελών μεταξύ δύο οποιονδήποτε αγωγών αυτού του ανοίγματος και επί του οριζοντίου επιπέδου δεν πρέπει να υπερβαίνει δυο διαμέτρους του αγωγού.

Η τοποθέτηση των αγωγών προστασίας ακολουθεί τις οδηγίες των αγωγών φάσεων.

Εκτός των ανωτέρω, σε ορισμένα τμήματα των γραμμών καθ' όλο το μήκος τους τοποθετείται χαλύβδινος επιψευδαργυρωμένος ή χάλκινος αγωγός εδάφους διαμέτρου τουλάχιστον 10 mm και σε βάθος 60 cm. Σε βραχώδες περιοχή δύναται να περιορισθεί σε βάθος 15 cm με τσιμεντοκονιά κατά διαστήματα 2 m.



ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΡΑΜΜΩΝ

4.1 Γενικά

Τα δίκτυα χρησιμοποιούνται για την μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα περισσότερα δίκτυα είναι εναέρια. Τα υπόγεια και υποβρύχια δίκτυα κατασκευάζονται όταν το επιβάλλουν ειδικοί λόγοι (π.χ. όταν περνούν από πυκνοκατοικημένες περιοχές, όταν γίνεται σύνδεση ενός νησιού με το Εθνικό Σύστημα). Τα εναέρια δίκτυα πλεονεκτούν σε σχέση με τα άλλα, γιατί έχουν μικρό κόστος κατασκευής, εύκολη επιθεώρηση και συντήρηση. Το κόστος τους φθάνει το 30% περίπου του κόστους ενός υπόγειου δικτύου.

Για να κατασκευαστεί ένα δίκτυο πρέπει να γνωρίζουμε:

- Την χρονολογική καμπύλη φορτίου (Χ.Κ.Φ.). Η μελέτη της Χ.Κ.Φ. μας δίνει πολλά στοιχεία οικονομικά και τεχνικά. Από αυτά τα στοιχεία καθορίζεται η ισχύς που θα μεταφέρεται ή θα διανέμεται στους καταναλωτές, λαμβάνοντας υπ' όψιν και την αύξηση του φορτίου που θα έχουμε στα επόμενα χρόνια.
- Με τα προηγούμενα στοιχεία καθορίζονται οι θέσεις των υποσταθμών καθώς και η τάση του δικτύου.
- Χαρτογραφείται η περιοχή και καθορίζεται η διαδρομή του δικτύου. Πάνω στο χάρτη φαίνονται τα υψόμετρα και οι θέσεις των πυλώνων.

Η ΔΕΗ έχει τυποποιήσει σε κατηγορίες τα δίκτυα, ώστε να υπάρχει και ομοιομορφία υλικού και μικρότερο κόστος.

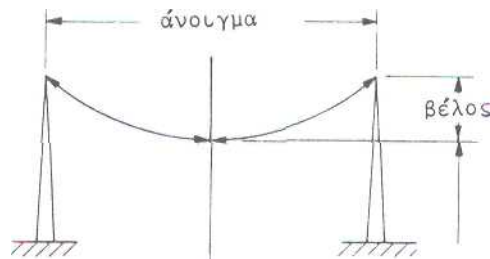
Κατά τη μελέτη ενός δικτύου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω:

- Το δίκτυο να παρουσιάζει ευχέρεια συντήρησης και επισκευής.
- Να έχει το μικρότερο δυνατό μήκος.
- Η δαπάνη απαλλοτριώσεων για το διάδρομο εργασιών να μην είναι πολύ μεγάλη.

Παρακάτω θα γνωρίσουμε ορισμένα κατασκευαστικά στοιχεία των εναέριων δικτύων και τις δυνάμεις που επιδρούν στα διάφορα υλικά τους .

Άνοιγμα ονομάζουμε την απόσταση μεταξύ δύο πυλώνων.

Το άνοιγμα μεταξύ δύο πυλώνων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Κατά κανόνα οι πυλώνες απέχουν πολύ μεταξύ τους. Η κατασκευή τους είναι ισχυρή για να μπορούν να δεχτούν το βάρος των αγωγών, του χιονιού που θα επικολληθεί, τις δυνάμεις του ανέμου και το δικό τους βάρος. Άλλοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στη μελέτη κατασκευής των εναέριων δικτύων είναι η σύσταση του εδάφους, καθώς και οι καιρικές συνθήκες της περιοχής.



Σχήμα 4.1 : Χαρακτηριστικά στοιχεία μιας εναέριας γραμμής

Τα στοιχεία που αποτελούν ένα δίκτυο (στύλοι, αγωγοί, μονωτήρες, κλπ) δέχονται ορισμένες δυνάμεις επιφόρτισης. Αυτές είναι διαμήκεις και εγκάρσιες.

4.2 Επιφόρτιση των αγωγών

Οι αγωγοί δέχονται δυνάμεις επιφόρτισης από:

- Το ίδιο βάρος τους
- Το στρώμα πάγου που τους καλύπτει κυλινδρικά και
- Τη πίεση του ανέμου που δρα οριζόντια ως προς το έδαφος πάνω στον αγωγό με πάγο ή χωρίς πάγο.

Στη χώρα μας η ΔΕΗ υπολογίζει το βάρος του πάγου με ακτίνα μέχρι 14cm. Η συνολική επιφόρτιση του αγωγού είναι η συνισταμένη των τριών επιφορτίσεων.



Σχήμα 4.2 : Οι διάφορες επιφορτίσεις αγωγών εναέριων δικτύων

Οριζόντιο βελάκι : επιφόρτιση ανέμου

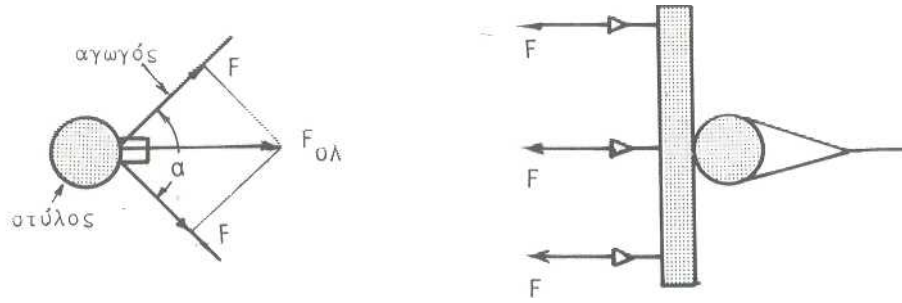
Κάθετο βελάκι : βάρος αγωγού καλυμμένου με πάγο

Συνισταμένη αυτών : συνολική επιφόρτιση αγωγού.

Επίσης πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη η τάνυση των αγωγών, που μεταβάλλεται αρκετά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. (Το καλοκαίρι αυξάνεται το βέλος σε σύγκριση με τον χειμώνα) .

4.3 Επιφόρτιση φορέων

Οι φορείς (μονωτήρες, βραχίονες κλπ) υπολογίζονται, ώστε να αντέχουν στις διάφορες επιφορτίσεις, που προέρχονται από τις συνολικές επιφορτίσεις των αγωγών και γίνονται ιδιαίτερα μεγάλες στις γωνίες και τα τέρματα.



Σχήμα 4.3 : Οι επιφορτίσεις των φορέων μιας γραμμής είναι ιδιαίτερα μεγάλες στις γωνίες και στα τέρματα

4.4 Μηχανικά χαρακτηριστικά εναέριων γραμμών

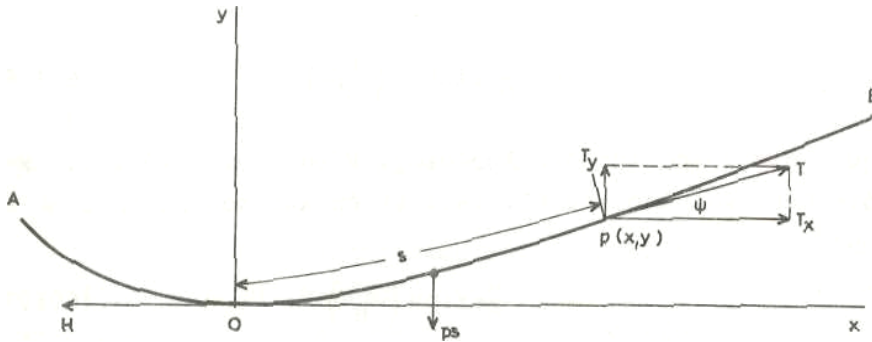
Η μηχανική σχεδίαση των εναέριων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας υπόκειται σε ορισμένους κανόνες, οι οποίοι εξασφαλίζουν το απρόσιτο των αγωγών για το κοινό, αποβλέποντας στην ασφάλεια του. Οι βασικότερες απαιτήσεις της μηχανικής σχεδίασεως των γραμμών αφορούν στις ελάχιστες αποστάσεις των αγωγών από το έδαφος και από γειτονικά κτίσματα και τη μηχανική αντοχή των αγωγών, των μονωτήρων και των φορέων. Οι μηχανικές δυνάμεις, οι οποίες καταπονούν τις γραμμές, είναι το βάρος των αγωγών, η δύναμη του ανέμου και πιθανώς το βάρος του πάγου, ο οποίος σχηματίζεται από το χιόνι. Βάσει των δυνάμεων αυτών, υπολογίζεται τόσο η καταπόνηση και, συνεπώς, η μηχανική αντοχή αγωγών και στηριγμάτων, όσο και η καμπύλη των αγωγών στο χώρο και οι αποστάσεις τους από το έδαφος.

4.4.1 Υπολογισμός καμπύλης και βέλους αγωγών

Ας υποθέσουμε ότι αγωγός γραμμής βάρους p ανά μονάδα μήκους αναρτάται από τα σημεία A και B και έστω O το κατώτατο σημείο του αγωγού, δηλαδή το σημείο στο οποίο η καμπύλη γίνεται οριζόντια, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 4.4. Έστω ένα σημείο P του αγωγού, με συντεταγμένες x και y στο σύστημα αξόνων του, το οποίο ορίζει ένα τμήμα OP μήκους s , κατά μήκος της καμπύλης του αγωγού και φ η γωνία, την οποία σχηματίζει η εφαπτόμενη της καμπύλης με την οριζόντια στο σημείο P . Οι δυνάμεις οι οποίες δρουν στο τμήμα OP είναι η οριζόντια τάση H στο O , η τάση T στο σημείο P , κατά την εφαπτόμενη της καμπύλης με συνιστώσες T_y και T_x , επίσης το βάρος ps του τμήματος OP , το οποίο εφαρμόζεται κατακόρυφα στο κέντρο βάρους του τμήματος OP . Δεδομένου ότι το τμήμα τού αγωγού βρίσκεται σε ισορροπία, τόσο οι οριζόντιες όσο και οι κατακόρυφες συνιστώσες των δυνάμεων είναι ίσες μεταξύ τους δηλαδή :

$$H = T_x \quad (4.1 \alpha)$$

$$T_y = ps \quad (4.1 \beta)$$



Σχήμα 4.4 : Καμπύλη αγωγού γραμμής με επίδραση του βάρους του

Η σχέση η πρώτη δείχνει ότι η οριζόντια συνιστώσα της τάσεως T_x είναι σταθερή σε όλο το μήκος της γραμμής. Θα είναι επίσης :

$$\frac{T_y}{T_x} = \varepsilon\phi\Psi \quad (4.2)$$

Είναι όμως, $\varepsilon\phi\Psi = \frac{dy}{dx}$. Οπότε : $\frac{dy}{dx} = \frac{T_y}{T_x} = \frac{ps}{H}$ (4.3)

Το στοιχειώδες μήκος της καμπύλης στο σημείο P είναι :

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (4.4)$$

Οπότε,

$$\frac{ds}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = \sqrt{1 + \frac{p^2 s^2}{H^2}} \quad \text{ή} \quad dx = \frac{ds}{\sqrt{1 + \frac{p^2 s^2}{H^2}}} \quad (4.5)$$

Ολοκληρώνοντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης (4.5) παίρνουμε :

$$x + C = \frac{H}{p} \sinh^{-1}\left(\frac{ps}{H}\right) \quad (4.6)$$

όπου C η σταθερά της ολοκλήρωσης. Είναι όμως για $s=0$, $x=0$ οπότε $C=0$ και επιλύοντας ως προς s την εξίσωση (4.6) έχουμε :

$$s = \frac{H}{p} \sinh\left(\frac{px}{H}\right) \quad (4.7)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.3) το s με την τιμή αυτής της σχέσης (4.7) έχουμε :

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \frac{H}{p} \sinh\left(\frac{px}{H}\right) \Rightarrow y = \int \sinh\left(\frac{px}{H}\right) \Rightarrow \\ &\Rightarrow y = \frac{H}{p} \cosh\left(\frac{px}{H}\right) + D \end{aligned} \quad (4.8)$$

όπου D μία άλλη σταθερά ολοκλήρωσης. Στο σημείο 0 είναι $x=0$ και $y=0$, οπότε για το σημείο αυτό η εξίσωση (4.8) γίνεται :

$$0 = \frac{H}{p} + D \Rightarrow D = -\frac{H}{p} \quad (4.9)$$

Επομένως η εξίσωση της καμπύλης της γραμμής είναι :

$$\boxed{y = \frac{H}{p} \left[\cosh\left(\frac{px}{H}\right) - 1 \right]} \quad (4.10)$$

Η καμπύλη αυτή καλείτε αλυσοειδής .

Η συνολική τάση T στο σημείο P είναι βάσει των εξισώσεων (4.1 α), (4.1 β) και (4.7),

$$T = \sqrt{T_x^2 + T_y^2} = \sqrt{H^2 + H^2 \sinh^2\left(\frac{px}{H}\right)} \quad (4.11)$$

$$= \sqrt{H^2 \cosh^2\left(\frac{px}{H}\right)} \Rightarrow$$

$$T = H \cosh\left(\frac{px}{H}\right) \quad (4.12)$$

Εάν τα σημεία αναρτήσεως της γραμμής A, B βρίσκονται στο ίδιο ύψος και η μεταξύ τους οριζόντια απόσταση είναι $2l$, τότε στα σημεία αυτά στα οποία $x=\pm l$ θα είναι :

$$\boxed{T = H \cosh\left(\frac{pl}{H}\right)} \quad (4.13)$$

Η τάση του αγωγού στα σημεία αναρτήσεως, στα οποία αυτή είναι και μεγαλύτερη από κάθε άλλο σημείο της γραμμής, καλείται τάνυση των αγωγών. Βέλος της γραμμής καλείται η τιμή του y στα σημεία A ή B και δίνεται από την εξίσωση (4.10) για $x=l$:

$$\boxed{d = \frac{H}{p} \left[\cosh\left(\frac{pl}{H}\right) - 1 \right]} \quad (4.14)$$

Το συνολικό μήκος του αγωγού προκύπτει από την εξίσωση (4.7) και είναι :

$$s = 2\left(\frac{H}{p}\right) \sinh\left(\frac{pl}{H}\right) \quad (4.15)$$

Προσεγγιστικοί τύποι

Εάν η ποσότητα $\frac{p^2 l^2}{2H^2}$ είναι μικρή σε σύγκριση με την μονάδα, η T είναι σχεδόν ίση με την H. Η εξίσωση της αλυσοειδούς (4.10) μπορεί να αναπτυχθεί ως εξής :

$$y = \frac{H}{p} \left(1 + \frac{p^2 x^2}{2H^2} + \frac{p^4 x^4}{24H^4} + \dots - 1\right) \Rightarrow$$

$$y = \frac{px^2}{2H}$$

Θεωρώντας T=H έχουμε $y = \frac{px^2}{2T}$ (4.16)

Επομένως το βέλος είναι $d = \frac{pl^2}{2T}$ (4.17)

Το μήκος του τόξου s προκύπτει από την εξίσωση (4.7) κατά παρόμοιο τρόπο :

$$s = \left(\frac{H}{p}\right) \left(\frac{px}{H} + \frac{p^3 x^3}{6H^3} + \dots\right) \Rightarrow s = \left(x + \frac{p^2 x^3}{6T^2}\right) \quad (4.18)$$

Το συνολικό μήκος του αγωγού είναι βάσει της (4.18) :

$$s = 2\left(l + \frac{p^2 l^3}{6T^2}\right) \quad (4.19)$$

Οι προσεγγιστικοί τύποι (4.16) έως και (4.19) δίνουν ικανοποιητική ακρίβεια για τις περισσότερες των περιπτώσεων της πράξεως, στις οποίες το βέλος είναι λιγότερο από 10% του ανοίγματος της γραμμής.

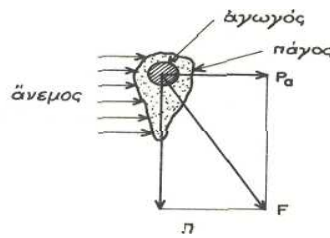
4.4.2 Επίδραση ανέμου και πάγου

Σε περιοχές στις οποίες η θερμοκρασία του περιβάλλοντος πέφτει κάτω από 0°C, σχηματίζονται συχνά στρώματα πάγου επάνω στους αγωγούς των γραμμών, τα οποία πολλές φορές έχουν σημαντικό πάχος και επιφάνεια. Η εξωτερική επιφάνεια την οποία προβάλλει ο αγωγός με το στρώμα του πάγου είναι αυξημένη και, επομένως, εκτός από το πρόσθετο βάρος του πάγου, ο αγωγός υφίσταται και αυξημένη δύναμη ανέμου. Κατά τον υπολογισμό του βέλους και της ταχύσεως της γραμμής πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι προσθετές αυτές εξωτερικές καταπονήσεις.

Εάν το βάρος του πάγου είναι p_n ανά μέτρο, το συνολικό βάρος του αγωγού είναι $p+p_n$ ανά μέτρο. Εάν επίσης είναι p η δύναμη του ανέμου ανά τρέχον μέτρο αγωγού, η οποία υποτίθεται ότι δρα οριζόντια, τότε η συνολική δύναμη επί ενός μέτρου αγωγού θα είναι,

$$F = \sqrt{(p + p_n)^2 + p_a^2} \quad (4.20)$$

και θα δρα υπό γωνία ως προς την κατακόρυφο, όπως φαίνεται και από το ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 4.5 : Συνολική δύναμη επί εναέριου αγωγού υπό την επίδραση πάγου και, ανέμου

Ο αγωγός υπό την επίδραση της συνολικής δυνάμεως F τίθεται στο κεκλιμένο επίπεδο της δυνάμεως αυτής, αλλά διατηρεί το σχήμα αλυσοειδούς καμπύλης, με την σταθερά F στην θέση της p .

Εάν η συνολική διάμετρος του αγωγού είναι D cm και υποτεθεί ότι το στρώμα του πάγου έχει ομοιόμορφο ακτινικό πάχος K cm γύρω από τον αγωγό τότε, δεδομένου ότι το βάρος του πάγου είναι περίπου 914 Kg/m^3 , το βάρος του πάγου ανά μέτρο αγωγού θα είναι,

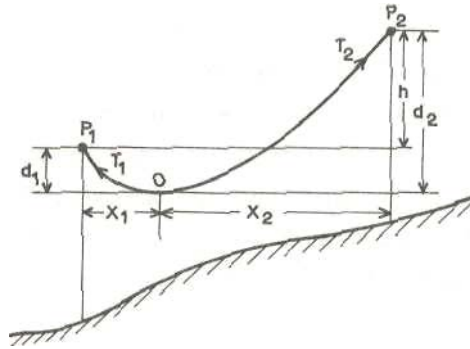
$$p = 914 \cdot \pi \left[\left(\frac{D}{2} + K \right)^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right] \cdot 10^{-4} \Rightarrow$$

$$p = 0,287 \cdot K \cdot (D + K) \text{ Kg / m} \quad (4.21)$$

Η δύναμη του ανέμου ανά τρέχον μέτρο αγωγού, για πίεση ανέμου u Kg/m, είναι :

$$p_a = u(D + 2K) \cdot 10^{-2} \text{ Kg / m} \quad (4.22)$$

4.4.3 Ανάρτηση αγωγών σε κεκλιμένο έδαφος



Σχήμα 4.5 : Ανάρτηση γραμμής σε κεκλιμένο έδαφος

Το σχήμα παριστάνει γραμμή αναρτημένη σε δύο σημεία P_1 και P_2 διαφορετικών υψομέτρων, των οποίων η υψομετρική διαφορά είναι h . Εάν το έδαφος δεν είναι πολύ απότομο θα υπάρξει ένα σημείο, στο οποίο ο αγωγός θα είναι οριζόντιος. Τότε η καμπύλη OP_1 είναι μία αλυσοειδής ανοίγματος x_1 , και η OP_2 είναι μία αλυσοειδής ανοίγματος x_2 . Οι εξισώσεις (4.13), (4.14) και (4.15) ισχύουν για κάθε μία πλευρά οπότε και είναι :

$$d_1 = \frac{H}{p} \left[\cosh\left(\frac{px_1}{H}\right) - 1 \right] \quad (4.23)$$

$$d_2 = \frac{H}{p} \left[\cosh\left(\frac{px_2}{H}\right) - 1 \right] \quad (4.24)$$

$$T_1 = H \cosh\left(\frac{px_1}{H}\right) \quad (4.25)$$

$$T_2 = H \cosh\left(\frac{px_2}{H}\right) \quad (4.26)$$

Προφανώς η μέγιστη τάνυση εφαρμόζεται στο υψηλότερο στήριγμα P_2 του σχήματος, δεδομένου ότι το x_2 είναι μεγαλύτερο από το x_1 .

Γνωστά μεγέθη είναι τα p , h και η οριζόντια απόσταση μεταξύ των σημείων αναρτήσεως x_1+x_2 . Είναι συνεπώς,

$$d_2 - d_1 = \frac{H}{p} \left[\cosh\left(\frac{px_2}{H}\right) - \cosh\left(\frac{px_1}{H}\right) \right] h$$

$$x_1 + x_2 = m$$

και
$$T = T_2 = H \cosh\left(\frac{px_2}{H}\right) \quad (4.27)$$

η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της τάνυσης.

Οι τρεις εξισώσεις είναι αρκετές για τον προσδιορισμό των αγνώστων x_1 , x_2 και H , από τα οποία μπορούν να βρεθούν το βέλος και η τάση. Αναλυτικά, οι εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν με την μέθοδο των διαδοχικών προσεγγίσεων και είναι χρήσιμη η εύρεση μιας προσεγγιστικής λύσεως, υποθέτοντας ότι η καμπύλη είναι παραβολή. Η προσεγγιστική λύση βρίσκεται ως ακολούθως :

Είναι,

$$d_1 = \frac{px_1^2}{2T} \quad d_2 = \frac{px_2^2}{2T} \quad T = H$$

$$d_2 - d_1 = h = \left(\frac{p}{2T}\right)(x_2^2 + x_1^2) \quad (4.25)$$

$$= \left(\frac{p}{2T}\right)(x_2 + x_1)(x_2 - x_1) = \left(\frac{pm}{2T}\right)(x_2 - x_1)$$

Οπότε λοιπόν ισχύει,

$$x_2 - x_1 = \frac{2Th}{pm}$$

$$x_2 = \frac{1}{2}m + \frac{Th}{pm} \quad \text{και} \quad x_1 = \frac{1}{2}m - \frac{Th}{pm} \quad (4.26)$$

Έχοντας υπολογίσει x_1 , x_2 από τις εξισώσεις (4.26), υπολογίζονται τα d_1 και d_2 από τις εξισώσεις (4.25).



ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΕΠΙ ΤΩΝ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΠΟ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΠΑΓΟ ΠΟΥ ΟΔΗΓΗΣΑΝ ΣΕ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΠΥΛΩΝΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται διεξοδικά τα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη φόρτιση των εναερίων γραμμών μεταφοράς λόγω ισχυρού ανέμου και επικάλυψης των αγωγών με πάγο, με αφορμή την κατάρρευση των πυλώνων κατά την πρόσφατη θεομηνία στην Κεφαλονιά. Σκοπός είναι να διαπιστωθεί αν οι προκύπτουσες δυνάμεις τάνυσης των αγωγών βρίσκονται μέσα στα ανεκτά όρια των προδιαγραφών για τους συγκεκριμένους τύπους αγωγών και πυλώνων. Σημειώνεται ότι οι προδιαγραφές τόσο των αγωγών όσο και των πυλώνων που μελετώνται (αγωγοί τύπου ASCR - LINNET ALUMOWED και πυλώνες ευθυγραμμίας απλού κυκλώματος ελαφρού τύπου) παρατίθενται εν συντομία ως παράρτημα στο τέλος της εργασίας. Επίσης, κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της μελέτης που παρουσιάζεται παρακάτω πλήθος στοιχείων συνελέχθησαν από ποικίλους δικτυακούς τόπους.

5.1 Δεδομένα

Εναέριοι αγωγοί της ΔΕΗ (3+2) βρίσκονται αναρτημένοι από πυλώνες που απέχουν μεταξύ τους **350 μέτρα**. Η δύναμη τάνυσης των αγωγών κατά την τοποθέτησή τους είναι **1200 Kg** και το βάρος τους **0,665 Kg ανά μέτρο**.

Σημειώνεται πως στην μελέτη που ακολουθεί δεχόμαστε ότι οι πυλώνες βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

5.2 Υπολογισμοί στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

Αρχικά υπολογίζεται :

- α) Η δύναμη που καταπονεί τον αγωγό στο κέντρο του
- β) Το μήκος του αγωγού μετά την τάνυση χωρίς να διαρρέεται από ρεύμα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C
- γ) Το βέλος του αγωγού στο κέντρο της απόστασης.

Για την αλυσοειδή καμπύλη ισχύουν οι σχέσεις

$$s = 2 \frac{H}{p} \sinh\left(\frac{p}{H} L\right) \quad (5.1)$$

$$d = \frac{H}{p} \left(\cosh\left(\frac{p}{H} L\right) - 1 \right) \quad (5.2)$$

$$T = H \cosh\left(\frac{p}{H} L\right) \quad (5.3)$$

όπου

s το μήκος του αγωγού,

H η δύναμη που καταπονεί τον αγωγό στο κέντρο του,

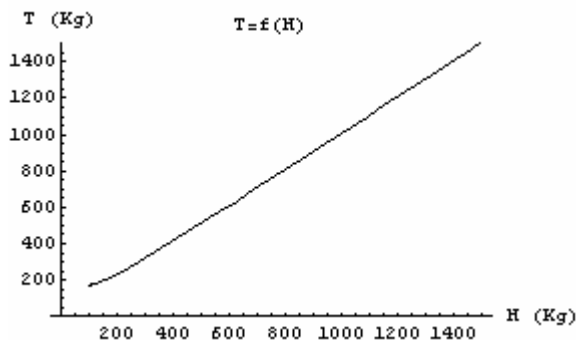
p το βάρος του αγωγού ανά μέτρο,

L το ήμισυ της απόστασης των δύο στύλων,

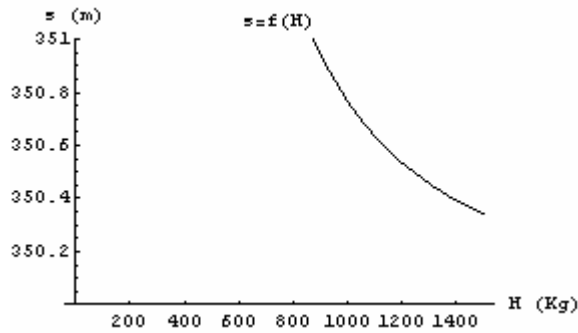
d το βέλος του αγωγού και

T η δύναμη τάνυσης του αγωγού.

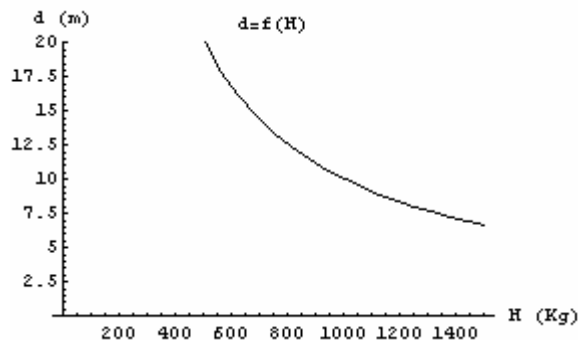
- α) Από τη σχέση (5.3) προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα που δίνει τη δύναμη τάνυσης **T₀** σαν συνάρτηση της δύναμης **H₀** που καταπονεί τον αγωγό στο κέντρο του.



β) Από τη σχέση (5.1) προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα που δίνει το μήκος του αγωγού s_0 μετά την τάνυση χωρίς αυτός να διαρρέεται από ρεύμα, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C, σαν συνάρτηση της δύναμης H_0 που καταπονεί τον αγωγό στο κέντρο του.



γ) Τέλος, από τη σχέση (5.2) προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα που δίνει το βέλος d_0 στο κέντρο του αγωγού μετά την τάνυση χωρίς αυτός να διαρρέεται από ρεύμα, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C, σαν συνάρτηση της δύναμης H_0 .



Από τα διαγράμματα αλλά και από υπολογισμούς με το πρόγραμμα προκύπτουν οι παρακάτω τιμές. Για δύναμη τάνυσης του αγωγού $T_0=1200 \text{ Kg}$ και βάρος του αγωγού ανά μέτρο $p_0=0,655 \text{ Kg}$ (χωρίς αυτός να διαρρέεται από ρεύμα, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C),

α) η δύναμη που καταπονεί τον αγωγό στο κέντρο του είναι $H_0=1194,5 \text{ Kg}$

β) το μήκος του αγωγού είναι $s_0=350,537 \text{ m}$

γ) και το βέλος του αγωγού $d_0=8,403 \text{ m}$

5.3 Το μήκος του αγωγού πριν αναρτηθεί και τανυστεί

Αρχικά γίνεται μια πρώτη εκτίμηση της επιμήκυνσης του αγωγού ως αποτέλεσμα της τάνυσης του.

Οι αγωγοί τύπου ASCR - LINNET ALUMOWED σύμφωνα με τη βιβλιογραφία έχουν μέτρο ελαστικότητας $E=7850 \text{ Kg/mm}^2$. Η πραγματική (φαινόμενη) διατομή του αγωγού είναι $A=198,3 \text{ mm}^2$. Για δύναμη τάνυσης $T_0=1200 \text{ Kg}$, έχουμε τη μέγιστη τάση σ στον αγωγό, στο σημείο ανάρτησης στον πυλώνα ίση προς

$$\sigma = \frac{T_0}{A} = 6,05 \text{ Kg/mm}^2 \quad (5.4)$$

Η ειδική διαμόρφωση

$$\varepsilon = \frac{\Delta s_{0\alpha}}{s_{0\alpha}} \quad (5.5)$$

όπου $s_{0\alpha}$ το αρχικό μήκος του αγωγού και $\Delta s_{0\alpha}$ η επιμήκυνση δίδεται από τη σχέση

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = 7,71 \cdot 10^{-4} \quad (5.6)$$

Άρα η επιμήκυνση του αγωγού θα είναι περίπου

$$\Delta s_{0\alpha} = \varepsilon \cdot s_{0\alpha} = 0,27 \text{ m} \quad (5.7)$$

Η επιμήκυνση που υπολογίστηκε περιλαμβάνεται στο μήκος $s_0=350,537 \text{ m}$ του αγωγού και είναι το αποτέλεσμα της τάνυσης του. Ο αγωγός βρίσκεται στα όρια ελαστικότητας γιατί το όριο θραύσεως του είναι κατά πολύ μεγαλύτερο, ίσο προς **6480 Kg**, από τη δύναμη τάνυσης που είναι **1200 Kg**.

Παρ' όλα αυτά η επιμήκυνση κατά **0,27 m** δεν είναι ένα μέγεθος το οποίο μπορεί να αμεληθεί εάν θέλουμε να υπολογίσουμε το αρχικό μήκος του αγωγού πριν από την ανάρτηση στους πυλώνες και τάνυση του. Έτσι, προχωρούμε στον ακριβή υπολογισμό του αρχικού μήκους του αγωγού, το οποίο θα χρησιμεύσει στη συνέχεια για τον υπολογισμό των αυξημένων φορτίων λόγω της επικάλυψης των αγωγών με πάγο.

Από τις σχέσεις (5.4), (5.5), (5.6) και (5.7) προκύπτει

$$s_0 = \Delta s_{0\alpha} + s_{0\alpha} = s_{0\alpha} (1 + \varepsilon) = s_{0\alpha} \left(1 + \frac{\sigma}{E} \right) = s_{0\alpha} \left(1 + \frac{T_0}{E \cdot A} \right) \quad (5.8)$$

Έτσι, από τις σχέσεις (5.1) και (5.8) έχουμε

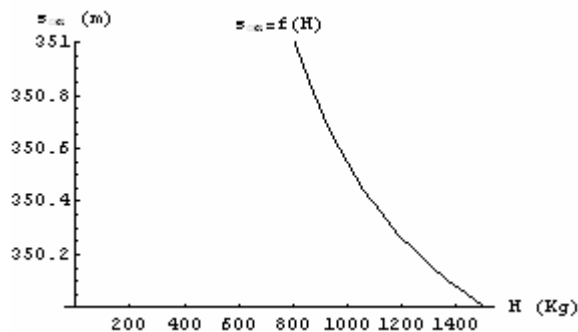
$$s_{0\alpha} \left(1 + \frac{T_0}{E \cdot A} \right) = 2 \frac{H_0}{p_0} \sinh \left(\frac{p_0}{H_0} L \right) \quad (5.9)$$

Δεδομένου ότι $H_0 \cong T_0$ προκύπτει

$$s_{0\alpha} = \frac{2 \frac{H_0}{p_0} \sinh \left(\frac{p_0}{H_0} L \right)}{\left(1 + \frac{H_0}{E \cdot A} \right)} \quad (5.10)$$

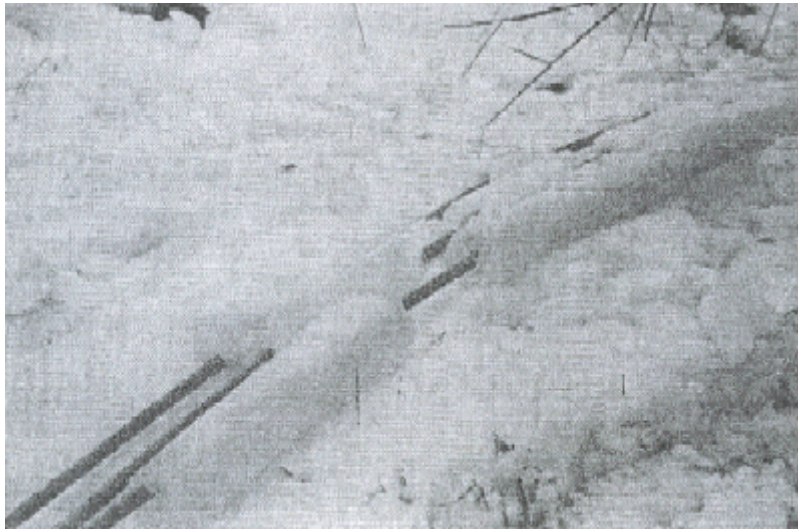
Από τη σχέση (5.10) μπορεί να υπολογιστεί το αρχικό μήκος του αγωγού $s_{0\alpha}$ πριν από την ανάρτηση στους πυλώνες και τάνυση του, οπότε και επιμηκύνθηκε.

Από τη σχέση (5.10) και μέσω του προγράμματος χαράχθηκε το διάγραμμα που ακολουθεί και υπολογίστηκε το μήκος $s_{0\alpha} = 350,269 \text{ m}$



5.4 Υπολογισμοί μετά την επικάλυψη των αγωγών με πάγο και ισχυρό άνεμο

Κατά την πρόσφατη θεομηνία στην Κεφαλονιά οι αγωγοί του δικτύου μεταφοράς των 150 kV καλύφθηκαν από στρώμα πάγου εξωτερικής διαμέτρου περίπου 15 εκατοστών. Η εκτίμηση του στρώματος του πάγου έγινε με βάση τη διάμετρο του αγωγού (που είναι 1,8 cm) από φωτογραφίες, μία εκ των οποίων είναι η ακόλουθη



Στη συνέχεια υπολογίζεται η φόρτιση του αγωγού από τον πάγο.

Ο όγκος του πάγου σε ένα μέτρο αγωγού είναι

$$Q = \frac{\pi}{4} (d_{\pi}^2 - d_{\alpha}^2) \quad (5.11)$$

όπου d_{π} η εξωτερική διάμετρος του πάγου και d_{α} η διάμετρος του αγωγού. Η φόρτιση του αγωγού από τον πάγο ανά μέτρο αγωγού είναι

$$p_{\pi} = Q_{\gamma} = \frac{\pi}{4} (d_{\pi}^2 - d_{\alpha}^2) \gamma \quad (5.12)$$

όπου γ το ειδικό βάρος του πάγου ίσο προς **917 Kg/mm³**.

Το συνολικό βάρος του αγωγού (συμπεριλαμβανομένου του πάγου γύρω από αυτόν) ανά μέτρο μήκους είναι

$$p_1 = p_0 + p_{\pi} \quad (5.13)$$

Από τις προηγούμενες σχέσεις υπολογίζεται ότι για $d_{\pi}=150 \text{ mm}$ και $d_{\alpha}=18,3 \text{ mm}$ είναι $p_{\pi}=15,95 \text{ Kg/m}$ και $p_1=16,61 \text{ Kg/m}$.

Η δυναμική πίεση του ανέμου V επί του αγωγού δίνεται από τις σχέσεις

$$V = z v^2 \quad (5.14)$$

$$z = \frac{C_x \rho}{20} \quad (5.15)$$

όπου C_x συντελεστής εξαρτώμενος από τον αριθμό Reynolds με τιμή περίπου σταθερή για τον αέρα και ίση προς **1,1**, ρ η πυκνότητα του αέρα ίση προς **1,225 Kg/m³** και v η ταχύτητα του πνέοντος ανέμου σε **m/s**.

Από τις σχέσεις (5.14) και (5.15) προκύπτει

$$V = 0,067 v^2 \quad (5.16)$$

Η σχέση (5.16) ταυτίζεται σχεδόν απόλυτα με άλλες που δίνονται στη βιβλιογραφία.

Η δύναμη από την πίεση του ανέμου επί του καλυμμένου από πάγο αγωγού, ανά μέτρο μήκους είναι

$$p_2 = 0,067 d_{\pi} v^2 \quad (5.17)$$

Για ταχύτητα ανέμου ίση προς 25 m/s η τιμή της δύναμης p_2 από την πίεση του ανέμου επί του καλυμμένου από πάγο αγωγού, ανά μέτρο μήκους του ισούται με **6,28 Kg/m**.

Ο συνδυασμός της δύναμης p_2 από την πίεση του ανέμου και του συνολικού βάρους του αγωγού (συμπεριλαμβανομένου του πάγου γύρω από αυτόν) p_1 δίνει συνισταμένη δύναμη

$$p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2} = \sqrt{16,61^2 + 6,28^2} = 17,76 \text{ Kg/m} \quad (5.18)$$

Η γωνία εκτροπής του αγωγού ϕ από το κατακόρυφο επίπεδο λόγω της πίεσης που υφίσταται από τον άνεμο δίνεται από τη σχέση

$$\arctag\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \arctag\left(\frac{6,28}{16,61}\right) = \arctag(0,378) \quad (5.19)$$

και προκύπτει ίση προς 20,7 μοίρες.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η καμπύλη που σχηματίζει ο αγωγός, παρά την εκτροπή του από τον άνεμο, είναι η αλυσοειδής και προφανώς ισχύουν οι εξισώσεις (5.1), (5.2) και (5.3) που τη διέπουν.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η δύναμη τάνυσης του αγωγού με τα νέα δεδομένα δηλαδή, λαμβάνοντας υπ' όψιν την επιφόρτιση του αγωγού από πάγο καθώς και την ισχυρή ανεμοπίεση από θυελλώδη άνεμο.

Το μήκος του αναρτημένου και τανυσμένου αγωγού, κάτω από τις συνθήκες που επικρατούσαν (πάγος και ανεμοπίεση), επηρεάζεται από τα παρακάτω φαινόμενα.

- Λόγω του φαινομένου Joule ο αγωγός είχε αυξημένη θερμοκρασία σε σχέση με αυτή του περιβάλλοντος. Επισημαίνεται παρ' όλα αυτά ότι η θερμοκρασία του αγωγού ήταν κάτω από τους 0 °C, διότι αλλιώς δε θα είχε σχηματιστεί πάγος επάνω σε αυτόν.
- Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του περιβάλλοντος (-5 °C) ο αγωγός είχε συσταλεί σε σχέση με το αρχικό μήκος του στους 20 °C.
- Λόγω του μεγάλου φορτίου από τον πάγο και την ανεμοπίεση ο αγωγός είχε επιμηκυνθεί σύμφωνα με το νόμο του Hook. Επισημαίνεται ότι θα πρέπει να εξεταστεί αν η παραμόρφωση βρισκόταν στην ελαστική περιοχή.

1) Υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου Joule

Από τη βιβλιογραφία (μεταξύ άλλων) είναι γνωστή η σχέση

$$\Delta\Theta = \frac{\rho_{\alpha} I^2}{h \cdot S \cdot F - \alpha \rho_{\alpha} I^2} \quad (5.20)$$

όπου ρ_{α} η ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού, I το ρεύμα που τον διαρρέει, h ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας με συνεπαγωγή, F η περίμετρος του αγωγού, S η διατομή του και α ο θερμικός συντελεστής του υλικού του αγωγού.

Στην περίπτωση των δεδομένων αγωγών ASCR – LINNET ALUMOWED η σχέση (5.20), παραλείποντας τον όρο $-\alpha \rho_{\alpha} I^2$, μπορεί να γραφεί ως εξής

$$\Delta\Theta = \frac{RI^2}{h \cdot F} \quad (5.21)$$

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων από τη σχέση (5.21) είναι γενικά ικανοποιητική. Στην προκειμένη περίπτωση, που πρόκειται για θερμοκρασίες κάτω από τους 0 °C, προφανώς τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι προς το δυσμενέστερον, δηλαδή ελαφρά υψηλότερες θερμοκρασίες.

Ο συντελεστής h γενικά υπολογίζεται εμπειρικά και στη βιβλιογραφία δίνονται πολλοί τρόποι υπολογισμού του που σχεδόν όλοι δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας εξ αυτών που δίδεται σε πρόσφατη δημοσίευση και θα χρησιμοποιηθεί στο παρόν. Σε κάθε περίπτωση ο συντελεστής h δίνεται από την ακόλουθη σχέση, ως συνάρτηση του αριθμού Nusselt :

$$h = Nu \cdot \left(\frac{k}{L} \right) \quad (5.22)$$

όπου k η αγωγιμότητα του ρευστού (Fluid conductivity) και L το χαρακτηριστικό μήκος (Characteristic dimension). Ο αριθμός Nusselt ορίζεται με διαφορετικό τρόπο για κάθε σχήμα αντικειμένου και συνήθως δίνεται ως γινόμενο των δυνάμεων των αριθμών Reynolds (Re) και Prandtl (Pr). Στην προκειμένη περίπτωση ισχύει :

$$Nu = 0,37 \cdot (Re)^{0,6} \quad (5.23)$$

Ο αριθμός Reynolds (Re) ορίζεται με την παρακάτω σχέση :

$$Re = \frac{vL}{\nu} = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (5.24)$$

όπου v η ταχύτητα του ρευστού σε μεγάλη απόσταση από το σώμα, ρ η πυκνότητα και μ το κινηματικό ιξώδες του ρευστού. Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν μόνο στην περίπτωση του αέρα. Για άλλα ρευστά ισχύουν διαφορετικοί τύποι.

Η εφαρμογή των σχέσεων (5.22), (5.23), και (5.24) δίνει την τιμή του h . Στην προκειμένη περίπτωση για ταχύτητα ανέμου ίση προς 25 m/s η τιμή του h ισούται με 240 W/ m² °C.

Οι δεδομένοι αγωγοί τύπου ASCR - LINNET ALUMOWED έχουν, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αντίσταση R ανά μέτρο μήκους ίση προς 0,000306 Ω και περίμετρο $F = \pi d_a = 0,0439$ m. Εάν το φορτίο κατά τη θεομηνία ήταν 25 MVA τότε το ρεύμα θα ήταν επίσης της τάξεως των 100 A. Με αυτά τα δεδομένα από τον τύπο (21) προκύπτει ανύψωση της θερμοκρασίας του αγωγού σε σχέση με αυτή του περιβάλλοντος $\Delta\Theta$ ίση με **0,29 °C**.

Η θέρμανση του αγωγού από το φαινόμενο Joule κατά $0,29\text{ }^{\circ}\text{C}$ δεν ήταν δυνατό να αποτρέψει τη δημιουργία πάγου στην επιφάνεια του έστω και με θερμοκρασία του περιβάλλοντος $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- 2) Υπολογισμός της συστολής του αγωγού λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του περιβάλλοντος ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Εάν ο αγωγός διαστέλλεται γραμμικά ισχύει η σχέση

$$s = s_{0\alpha}(1 - b\Delta\Theta) \quad (5.25)$$

όπου $s_{0\alpha}$ το αρχικό μήκος του αγωγού (υπολογίστηκε ανωτέρω $350,269\text{ m}$), s το συνεσταλμένο μήκος του αγωγού και b ο συντελεστής γραμμικής διαστολής - συστολής του καλωδίου (όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία) ίσος προς $0,000018\text{ }1/^{\circ}\text{C}$.

- 3) Υπολογισμός της επιμήκυνσης του αγωγού (σύμφωνα με το νόμο του Hook) λόγω του φορτίου από τον πάγο και την ανεμοπίεση

Στην περίπτωση αυτή ισχύει η σχέση (5.8)

$$s_1 = s \left(1 + \frac{T}{E \cdot A} \right) \quad (5.26)$$

όπου s το συνεσταλμένο μήκος του αγωγού κατά τα ανωτέρω, s_1 το επιμηκυμένο μήκος του αγωγού, E το μέτρο ελαστικότητας του (7850 Kg/mm^2), A η διατομή του αγωγού και T η δύναμη τάνυσης.

Για να υπολογιστεί η επιμήκυνση του αγωγού πρέπει να είναι γνωστή η δύναμη τάνυσης T , η οποία όμως είναι το ζητούμενο ώστε να υπολογιστεί στη συνέχεια η φόρτιση στον πυλώνα. Συνδυάζοντας τις σχέσεις (5.1), (5.3) και (5.26) προκύπτει

$$s \left(1 + \frac{T}{E \cdot A} \right) = 2 \frac{H}{p} \sinh \left(\frac{p}{H} L \right) \quad (5.27)$$

$$s \left(1 + \frac{H \cosh \left(\frac{p}{H} L \right)}{E \cdot A} \right) = 2 \frac{H}{p} \sinh \left(\frac{p}{H} L \right) \quad (5.28)$$

5.5 Υπολογισμός των δυνάμεων επί του αγωγού

Από τις σχέσεις (5.24) και (5.28) προκύπτει

$$s_{0\alpha} (1 - b\Delta\Theta) \left(1 + \frac{H \cosh\left(\frac{p}{H} L\right)}{E \cdot A} \right) = 2 \frac{H}{p} \sinh\left(\frac{p}{H} L\right) \quad (5.29)$$

Από τη σχέση (5.29) μπορεί να υπολογιστεί η δύναμη **H** που καταπονεί τον αγωγό στο κέντρο του και στη συνέχεια η δύναμη τάνυσης **T**.

$$H = 13316 \text{ Kg}$$

$$T = 13680,6 \text{ Kg}$$

$$s = 353,19 \text{ m}$$

$$d = 20,52 \text{ m}$$

$$T_x' = T_x = H = 13316 \text{ Kg}$$

$$T_y' = ps/2 = 3137,4 \text{ Kg}$$

$$T_y = T_y' \cos(20,7^\circ) = 2934,8 \text{ Kg}$$

$$T_z = T_y' \sin(20,7^\circ) = 1109,0 \text{ Kg}$$

5.6 Συμπεράσματα

Μετά το πέρας της μελέτης που πραγματοποιήθηκε καθίσταται φανερό ότι, λόγω των ασυνήθιστων καιρικών φαινομένων που εμφανίστηκαν, η φόρτιση των αγωγών και συνάμα και των πυλώνων από το σφοδρό αέρα και το παχύ στρώμα πάγου ήταν αδύνατο να μην οδηγήσει σε κατάρρευση για τους συγκεκριμένους τύπους αγωγών και πυλώνων, σύμφωνα πάντα και με τις προδιαγραφές της ΔΕΗ. Συγκεκριμένα, η προκύπτουσα δύναμη τάνυσης, όπως φαίνεται παραπάνω, είναι πολύ μεγαλύτερη από τα δεδομένα όρια μηχανικής αντοχής αγωγών και πυλώνων (όριο θραύσης αγωγού ASCR - LINNET ALUMOWED 6480 Kg - μέγιστα διαμήκη φορτία σε σημεία στήριξης ανά αγωγό για πυλώνα ευθυγραμμίας απλού κυκλώματος ελαφρού τύπου 3350 Kg, μέγιστα κατακόρυφα φορτία 1360 Kg και μέγιστα εγκάρσια φορτία 730 Kg ή μέγιστα εγκάρσια φορτία θραυσμένου αγωγού 380 Kg). Επομένως,

γίνεται πλέον προφανές το γεγονός ότι έχουμε θραύση των αγωγών, καθώς επίσης και κατάρρευση των πυλώνων. Άλλωστε, όσον αφορά τους αγωγούς, αυτό γίνεται, επίσης, φανερό και από το προκύπτων βέλος, το οποίο θεωρητικώς έχει τιμή μεγαλύτερη από το ύψος ανάρτησης των αγωγών φάσης από τον πυλώνα (περί τα 19,95 m σύμφωνα με τις προδιαγραφές), κάτι που οδηγεί στο λογικό συμπέρασμα ότι έχει προηγηθεί θραύση αυτών. Τέλος, χρήζει αναφοράς το ότι η θραύση ενός ή περισσοτέρων αγωγών οδηγεί σε στρέψη των πυλώνων, γεγονός που επιδεινώνει τη φόρτιση και “διευκολύνει” την κατάρρευσή αυτών, επιπρόσθετα από τις τεράστιες δυνάμεις τάνυσης που τους ασκούνται.

Συνεπώς, ύστερα από όλη την ανάλυση που προηγήθηκε, θα μπορούσαμε να πούμε, καταλήγοντας, ότι δικαίως υπήρξε αυτή η καταστροφή των αγωγών και των πυλώνων, μιας και οι καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή μπορούν να θεωρηθούν εξωπραγματικές για τα ελληνικά δεδομένα. Παρ’ όλα αυτά, για την αύξηση της αξιοπιστίας της δεδομένης εναέριας γραμμής μεταφοράς και γενικά σε οποιαδήποτε αντίστοιχη περίπτωση, θα ήταν πρόπον οι νέοι πυλώνες και αγωγοί που θα εγκατασταθούν να έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν μεγαλύτερα φορτία. Σε καμία περίπτωση, όμως, δεν είναι δυνατόν να σχεδιαστεί μια νέα εναέρια γραμμή μεταφοράς ικανή να αντέξει τα φορτία που προέκυψαν λόγω των συγκεκριμένων καιρικών συνθηκών. Κι αυτό, γιατί κάτι τέτοιο θα ήταν εξαιρετικά ασύμφορο, μιας και τέτοια φαινόμενα συμβαίνουν πολύ σπάνια στην Ελλάδα και δεν αντισταθμίζεται, επομένως, το τεράστιο κόστος μιας τέτοιας αναβάθμισης.

Για λόγους πληρότητας παραθέτουμε ακολούθως τους αντίστοιχους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica.

Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

$$p = 0.655$$

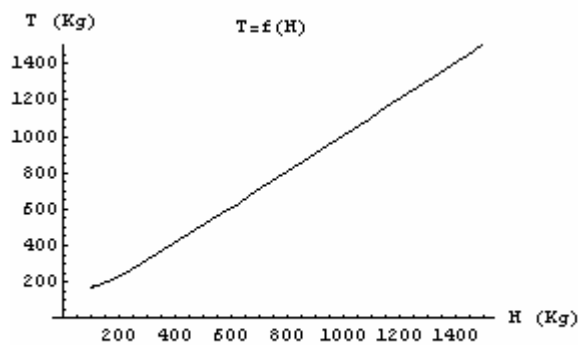
$$0.655$$

$$L = 175$$

$$175$$

$$T := H \left\{ \text{Cosh} \left[\frac{p}{H} L \right] \right\}$$

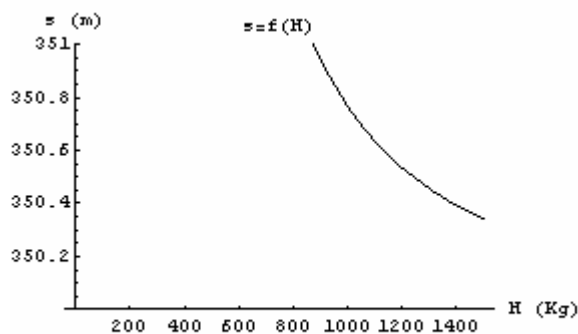
```
Plot[Evaluate[T, {H, 100, 1500}], PlotRange -> {0, 1500},
  AxesLabel -> {"H (Kg)", "T (Kg)"},
  PlotLabel -> "T=f(H)"]]
```



- Graphics -

$$s := 2 \frac{H}{p} \text{Sinh} \left[\frac{p}{H} L \right]$$

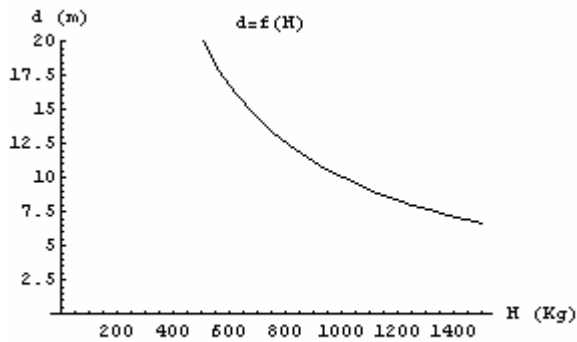
```
Plot[Evaluate[s, {H, 0, 1500}], PlotRange -> {350, 351},
  AxesLabel -> {"H (Kg)", "s (m)"},
  PlotLabel -> "s=f(H)"]]
```



- Graphics -

$$d := \frac{H}{p} \left\{ \text{Cosh} \left[\frac{p}{H} L \right] - 1 \right\}$$

```
Plot[Evaluate[d, {H, 0, 1500}], PlotRange -> {0, 20},
    AxesLabel -> {"H (Kg)", "d (m)"},
    PlotLabel -> "d=f(H)"]]
```



- Graphics -

T = 1200

1200

H = 1194.5

1194.5

T - H {Cosh[$\frac{p}{H} L$]}

{-0.00396656}

H[s]

350.537

H[d]

{8.403}

* Δοκιμάζοντας διάφορες τιμές για το H βρίσκουμε εκείνη την τιμή που μηδενίζει την παράσταση. Εναλλακτικά, θα μπορούσαμε να επιλύσουμε την εξίσωση μέσω του προγράμματος Mathcad ως εξής :

$$f(H) := T - H \cdot \left(\cosh \left(p \cdot \frac{L}{H} \right) \right)$$

$$\text{root}(f(H), H) = 1.194 \times 10^3$$

Μήκος αγωγού πριν αναρτηθεί και τανυστεί

p = 0.655

0.655

L = 175

175

E₀ = 7850000000

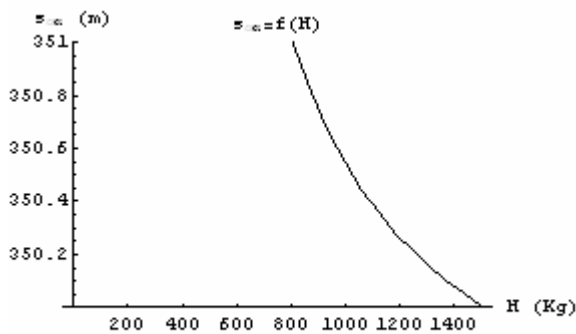
7850000000

A = 0.0001983

0.0001983

$$s_{\alpha\alpha} := \frac{2 \frac{H}{P} \operatorname{Sinh}\left[\frac{P}{H} L\right]}{\left(1 + \frac{H}{E_0 A}\right)}$$

**Plot[Evaluate[s_{αα}, {H, 0, 1500}], PlotRange → {350, 351},
 AxesLabel → {"H (Kg)", "s_{αα} (m)"},
 PlotLabel → "s_{αα}=f(H)"]]**



- Graphics -

H = 1194.5

1194.5

H[s_{αα}]

350.269

Φόρτιση αγωγού από πάγο και αέρα

d_α = N[18.3 / 1000]

0.0183

d_π = N[150 / 1000]

0.15

$$\gamma = 917$$

$$917$$

$$p_{\pi} = \frac{\pi}{4} \{d_{\pi}^2 - d_{\alpha}^2\} \gamma$$

$$\{15.9635\}$$

$$p_0 = 0.655$$

$$0.655$$

$$p_1 = p_0 + p_{\pi}$$

$$\{16.6185\}$$

$$v = 25$$

$$25$$

$$p_2 = 0.067 d_{\pi} v^2$$

$$6.28125$$

$$p = N[\text{Sqrt}[p_1^2 + p_2^2]]$$

$$\{17.766\}$$

$$\text{ArcTan}[p_2 / p_1] * 180 / \pi$$

$$\{20.7049\}$$

Υπολογισμός δυνάμεων επί του αγωγού

$$L\theta = 25$$

$$25$$

$$b = 0.000018$$

$$0.000018$$

$$L = 175$$

$$175$$

$$p = 17.77$$

$$17.77$$

$$E_0 = 7850000000$$

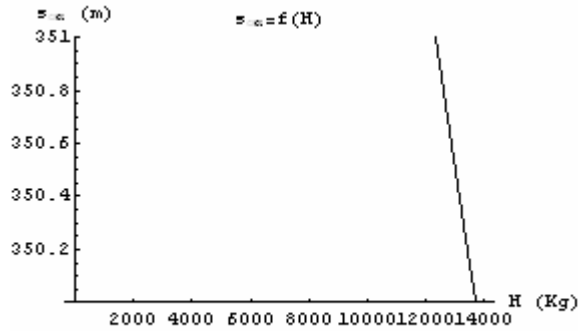
$$7850000000$$

$$A = 0.0001983$$

$$0.0001983$$

$$s_{0\alpha} := \frac{2 \frac{H}{P} \operatorname{Sinh}\left[\frac{P}{H} L\right]}{(1 - b \Delta\theta) \left(1 + \frac{H \left\{\operatorname{Cosh}\left[\frac{P}{H} L\right]\right\}}{E_0 A}\right)}$$

Plot[Evaluate[s_{0α}, {H, 0, 14000}], PlotRange → {350, 351},
 AxesLabel → {"H (Kg)", "s_{0α} (m)"},
 PlotLabel → "s_{0α}=f(H)"]]



- Graphics -

s_{0α} = 350.269

350.269

H = 13316

13316

$$H \left[s_{0\alpha} - \frac{2 \frac{H}{P} \operatorname{Sinh}\left[\frac{P}{H} L\right]}{(1 - b \Delta\theta) \left(1 + \frac{H \left\{\operatorname{Cosh}\left[\frac{P}{H} L\right]\right\}}{E_0 A}\right)} \right]$$

[ισχύει ό,τι αναφέρθηκε και για τον
 υπολογισμό στη μόνιμη κατάσταση]

{-0.00172907}

$$T := H \left\{ \operatorname{Cosh}\left[\frac{P}{H} L\right] \right\}$$

H[T]

{13680.8}

$$d := \frac{H}{P} \left\{ \operatorname{Cosh}\left[\frac{P}{H} L\right] - 1 \right\}$$

H[d]

{20.5273}

$$s := 350.269 (1 - b \Delta\theta) \left(1 + \frac{H \left\{ \operatorname{Cosh}\left[\frac{P}{H} L\right] \right\}}{E_0 A}\right)$$

H[s]

{353.189}

Tx := H

H[Tx]

{13316.}

Ty' := $\frac{ps}{2}$

H[Ty']

{3138.08}

Tz := Ty' Sin[20.7 °]

H[Tz]

{1109.23}

Ty := Ty' Cos[20.7 °]

H[Ty]

{2934.8`}



ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΕΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΓΙΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΠΑΓΟΥ

6.1 Διερεύνηση για μήκος ανοίγματος 350 m

Θεωρούμε, αρχικά, τον ίδιο τύπο αγωγών ASCR - LINNET ALUMOWED και το ίδιο μήκος του ανοίγματος. Συνεπώς, έχουμε ότι ισχύει

$p = 0,655 \text{ Kg/m}$ το βάρος του αγωγού ανά μέτρο,

$L = 350/2 = 175 \text{ m}$ το ήμισυ της απόστασης των δύο στύλων,

$T = 1200 \text{ Kg}$ η δύναμη τάνυσης του αγωγού,

καθώς επίσης και

$E = 7850 \text{ Kg/mm}^2$ το μέτρο ελαστικότητας,

$A = 198,3 \text{ mm}^2$ η πραγματική (φαινόμενη) διατομή του αγωγού.

Σημειώνεται πως το όριο θραύσης του συγκεκριμένου τύπου αγωγού είναι **6480 Kg**. Επίσης, για το συγκεκριμένο τύπο πυλώνα (ευθυγραμμίας απλού κυκλώματος ελαφρού τύπου) τα μέγιστα διαμήκη φορτία σε σημεία στήριξης ανά αγωγό είναι **3350 Kg**, τα μέγιστα εγκάρσια και κατακόρυφα είναι 730 Kg και 1360 Kg αντίστοιχα, ενώ τα μέγιστα εγκάρσια φορτία θραυσμένου αγωγού είναι 380 Kg. Οι προδιαγραφές τόσο των αγωγών όσο και των πυλώνων που μελετώνται παρατίθενται εν συντομία ως παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

Επομένως, έχοντας αυτά τα δεδομένα και εφαρμόζοντας τη διαδικασία που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπολογίζουμε το αρχικό μήκος του αγωγού πριν από την ανάρτηση στους πυλώνες και τάνυση του, οπότε και επιμηκύνθηκε και έχουμε ότι $s_{0\alpha} = 350,269 \text{ m}$

Το αρχικό μήκος αυτό του αγωγού είναι απαραίτητο για την διερεύνηση που ακολουθεί αναφορικά με τη δύναμη τάνυσης του, που προκύπτει για τις διάφορες τιμές των φορτίων λόγω της επικάλυψης των αγωγών με πάγο και της ισχυρής ανεμοπίεσης.

Έτσι, εν συνεχεία, με βάση τα δεδομένα που προηγήθηκαν και εφαρμόζοντας τη διαδικασία που ήδη παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για στρώμα πάγου εξωτερικής διαμέτρου 15 cm και ταχύτητα ανέμου 25 m/s, υπολογίζουμε τη συνισταμένη δύναμη p της δύναμης p_2 από την πίεση του ανέμου και του συνολικού βάρους του αγωγού (συμπεριλαμβανομένου του πάγου γύρω από αυτόν) p_1 , καθώς επίσης και τη γωνία εκτροπής του αγωγού φ από το κατακόρυφο επίπεδο, για κάθε συνδυασμό εξωτερικής διαμέτρου του στρώματος πάγου από 2 cm έως 15cm και ταχύτητας αέρα από 5 m/s έως 30 m/s. Προκύπτουν έτσι οι ακόλουθοι πίνακες.

d_{π} (cm)	p_1 (Kg/m)	$v = 5 \text{ m/s}$			$v = 6 \text{ m/s}$		
		p_2 (Kg/m)	p (Kg/m)	φ (°)	p_2 (Kg/m)	p (Kg/m)	φ (°)
2	0,70	0,03	0,70	2,7	0,05	0,70	3,9
3	1,06	0,05	1,06	2,7	0,07	1,06	3,9
4	1,57	0,07	1,57	2,4	0,10	1,57	3,5
5	2,21	0,08	2,22	2,2	0,12	2,22	3,1
6	3,01	0,10	3,01	1,9	0,14	3,01	2,8
7	3,94	0,12	3,94	1,7	0,17	3,95	2,5
8	5,02	0,13	5,02	1,5	0,19	5,03	2,2
9	6,25	0,15	6,25	1,4	0,22	6,25	2,0
10	7,62	0,17	7,62	1,3	0,24	7,62	1,8
11	9,13	0,18	9,13	1,2	0,27	9,13	1,7
12	10,78	0,20	10,79	1,1	0,29	10,79	1,5
13	12,59	0,22	12,59	1,0	0,31	12,59	1,4
14	14,53	0,23	14,53	0,9	0,34	14,53	1,3
15	16,62	0,25	16,62	0,9	0,36	16,62	1,2

		$v = 7 \text{ m/s}$			$v = 8 \text{ m/s}$		
d_{π} (cm)	p_1 (Kg/m)	p_2 (Kg/m)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	p_2 (Kg/m)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)
2	0,70	0,07	0,70	5,3	0,09	0,71	7,0
3	1,06	0,10	1,07	5,3	0,13	1,07	6,9
4	1,57	0,13	1,57	4,8	0,17	1,58	6,2
5	2,21	0,16	2,22	4,2	0,21	2,22	5,5
6	3,01	0,20	3,01	3,7	0,26	3,02	4,9
7	3,94	0,23	3,95	3,3	0,30	3,95	4,4
8	5,02	0,26	5,03	3,0	0,34	5,03	3,9
9	6,25	0,30	6,25	2,7	0,39	6,26	3,5
10	7,62	0,33	7,62	2,5	0,43	7,63	3,2
11	9,13	0,36	9,14	2,3	0,47	9,14	3,0
12	10,78	0,39	10,79	2,1	0,51	10,80	2,7
13	12,59	0,43	12,59	1,9	0,56	12,60	2,5
14	14,53	0,46	14,54	1,8	0,60	14,54	2,4
15	16,62	0,49	16,63	1,7	0,64	16,63	2,2

		$v = 9 \text{ m/s}$			$v = 10 \text{ m/s}$		
d_{π} (cm)	p_1 (Kg/m)	p_2 (Kg/m)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	p_2 (Kg/m)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)
2	0,70	0,11	0,71	8,8	0,13	0,71	10,8
3	1,06	0,16	1,07	8,7	0,20	1,08	10,7
4	1,57	0,22	1,58	7,9	0,27	1,59	9,7
5	2,21	0,27	2,23	7,0	0,34	2,24	8,6
6	3,01	0,33	3,02	6,2	0,40	3,03	7,6
7	3,94	0,38	3,96	5,5	0,47	3,97	6,8
8	5,02	0,43	5,04	4,9	0,54	5,05	6,1
9	6,25	0,49	6,27	4,5	0,60	6,28	5,5
10	7,62	0,54	7,64	4,1	0,67	7,65	5,0
11	9,13	0,60	9,15	3,7	0,74	9,16	4,6
12	10,78	0,65	10,80	3,5	0,80	10,81	4,3
13	12,59	0,71	12,61	3,2	0,87	12,62	4,0
14	14,53	0,76	14,55	3,0	0,94	14,56	3,7
15	16,62	0,81	16,64	2,8	1,01	16,65	3,5

		v = 11 m/s			v = 12 m/s		
d _π (cm)	p ₁ (Kg/m)	p ₂ (Kg/m)	p (Kg/m)	φ (°)	p ₂ (Kg/m)	p (Kg/m)	φ (°)
2	0,70	0,16	0,72	13,0	0,19	0,73	15,4
3	1,06	0,24	1,09	12,9	0,29	1,10	15,2
4	1,57	0,32	1,60	11,7	0,39	1,61	13,8
5	2,21	0,41	2,25	10,4	0,48	2,27	12,3
6	3,01	0,49	3,05	9,2	0,58	3,06	10,9
7	3,94	0,57	3,98	8,2	0,68	4,00	9,7
8	5,02	0,65	5,06	7,4	0,77	5,08	8,7
9	6,25	0,73	6,29	6,7	0,87	6,31	7,9
10	7,62	0,81	7,66	6,1	0,96	7,68	7,2
11	9,13	0,89	9,17	5,6	1,06	9,19	6,6
12	10,78	0,97	10,83	5,2	1,16	10,85	6,1
13	12,59	1,05	12,63	4,8	1,25	12,65	5,7
14	14,53	1,13	14,57	4,5	1,35	14,59	5,3
15	16,62	1,22	16,66	4,2	1,45	16,68	5,0

		v = 13 m/s			v = 14 m/s		
d _π (cm)	p ₁ (Kg/m)	p ₂ (Kg/m)	p (Kg/m)	φ (°)	p ₂ (Kg/m)	p (Kg/m)	φ (°)
2	0,70	0,23	0,74	17,9	0,26	0,75	20,5
3	1,06	0,34	1,12	17,7	0,39	1,13	20,4
4	1,57	0,45	1,63	16,1	0,53	1,65	18,5
5	2,21	0,57	2,29	14,3	0,66	2,31	16,5
6	3,01	0,68	3,08	12,7	0,79	3,11	14,7
7	3,94	0,79	4,02	11,4	0,92	4,05	13,1
8	5,02	0,91	5,10	10,2	1,05	5,13	11,8
9	6,25	1,02	6,33	9,3	1,18	6,36	10,7
10	7,62	1,13	7,70	8,5	1,31	7,73	9,8
11	9,13	1,25	9,21	7,8	1,44	9,24	9,0
12	10,78	1,36	10,87	7,2	1,58	10,90	8,3
13	12,59	1,47	12,67	6,7	1,71	12,70	7,7
14	14,53	1,59	14,62	6,2	1,84	14,65	7,2
15	16,62	1,70	16,71	5,8	1,97	16,73	6,8

		v = 15 m/s			v = 16 m/s		
d _π (cm)	p ₁ (Kg/m)	p ₂ (Kg/m)	p (Kg/m)	φ (°)	p ₂ (Kg/m)	p (Kg/m)	φ (°)
2	0,70	0,30	0,76	23,2	0,34	0,78	26,0
3	1,06	0,45	1,15	23,1	0,51	1,18	25,9
4	1,57	0,60	1,68	21,1	0,69	1,71	23,7
5	2,21	0,75	2,34	18,8	0,86	2,37	21,2
6	3,01	0,90	3,14	16,7	1,03	3,18	18,9
7	3,94	1,06	4,08	15,0	1,20	4,12	16,9
8	5,02	1,21	5,17	13,5	1,37	5,21	15,3
9	6,25	1,36	6,39	12,3	1,54	6,44	13,9
10	7,62	1,51	7,76	11,2	1,72	7,81	12,7
11	9,13	1,66	9,28	10,3	1,89	9,32	11,7
12	10,78	1,81	10,94	9,5	2,06	10,98	10,8
13	12,59	1,96	12,74	8,9	2,23	12,78	10,0
14	14,53	2,11	14,68	8,3	2,40	14,73	9,4
15	16,62	2,26	16,77	7,7	2,57	16,82	8,8

		v = 17 m/s			v = 18 m/s		
d _π (cm)	p ₁ (Kg/m)	p ₂ (Kg/m)	p (Kg/m)	φ (°)	p ₂ (Kg/m)	p (Kg/m)	φ (°)
2	0,70	0,39	0,80	28,9	0,43	0,83	31,7
3	1,06	0,58	1,21	28,7	0,65	1,25	31,5
4	1,57	0,77	1,75	26,3	0,87	1,79	29,0
5	2,21	0,97	2,42	23,6	1,09	2,47	26,1
6	3,01	1,16	3,22	21,1	1,30	3,28	23,4
7	3,94	1,36	4,17	19,0	1,52	4,23	21,1
8	5,02	1,55	5,26	17,1	1,74	5,31	19,1
9	6,25	1,74	6,49	15,6	1,95	6,55	17,4
10	7,62	1,94	7,86	14,3	2,17	7,92	15,9
11	9,13	2,13	9,37	13,1	2,39	9,44	14,7
12	10,78	2,32	11,03	12,2	2,60	11,09	13,6
13	12,59	2,52	12,83	11,3	2,82	12,90	12,6
14	14,53	2,71	14,78	10,6	3,04	14,84	11,8
15	16,62	2,90	16,87	9,9	3,26	16,93	11,1

		$v = 19 \text{ m/s}$			$v = 20 \text{ m/s}$		
d_{π} (cm)	p_1 (Kg/m)	p_2 (Kg/m)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	p_2 (Kg/m)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)
2	0,70	0,48	0,85	34,6	0,54	0,88	37,4
3	1,06	0,73	1,29	34,3	0,80	1,33	37,1
4	1,57	0,97	1,84	31,7	1,07	1,90	34,4
5	2,21	1,21	2,52	28,6	1,34	2,59	31,2
6	3,01	1,45	3,34	25,8	1,61	3,41	28,1
7	3,94	1,69	4,29	23,2	1,88	4,37	25,4
8	5,02	1,93	5,38	21,1	2,14	5,46	23,1
9	6,25	2,18	6,62	19,2	2,41	6,70	21,1
10	7,62	2,42	7,99	17,6	2,68	8,07	19,4
11	9,13	2,66	9,51	16,2	2,95	9,59	17,9
12	10,78	2,90	11,17	15,1	3,22	11,25	16,6
13	12,59	3,14	12,97	14,0	3,48	13,06	15,5
14	14,53	3,39	14,92	13,1	3,75	15,01	14,5
15	16,62	3,63	17,01	12,3	4,02	17,10	13,6

		$v = 21 \text{ m/s}$			$v = 22 \text{ m/s}$		
d_{π} (cm)	p_1 (Kg/m)	p_2 (Kg/m)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	p_2 (Kg/m)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)
2	0,70	0,59	0,92	40,1	0,65	0,96	42,7
3	1,06	0,89	1,38	39,9	0,97	1,44	42,5
4	1,57	1,18	1,96	37,0	1,30	2,03	39,6
5	2,21	1,48	2,66	33,7	1,62	2,74	36,2
6	3,01	1,77	3,49	30,5	1,95	3,58	32,9
7	3,94	2,07	4,45	27,7	2,27	4,55	29,9
8	5,02	2,36	5,55	25,2	2,59	5,65	27,3
9	6,25	2,66	6,79	23,1	2,92	6,90	25,0
10	7,62	2,95	8,17	21,2	3,24	8,28	23,1
11	9,13	3,25	9,69	19,6	3,57	9,80	21,3
12	10,78	3,55	11,35	18,2	3,89	11,47	19,8
13	12,59	3,84	13,16	17,0	4,22	13,27	18,5
14	14,53	4,14	15,11	15,9	4,54	15,22	17,4
15	16,62	4,43	17,20	14,9	4,86	17,32	16,3

		v = 23 m/s			v = 24 m/s		
d _π (cm)	p ₁ (Kg/m)	p ₂ (Kg/m)	p (Kg/m)	φ (°)	p ₂ (Kg/m)	p (Kg/m)	φ (°)
2	0,70	0,71	1,00	45,3	0,77	1,04	47,7
3	1,06	1,06	1,50	45,0	1,16	1,57	47,5
4	1,57	1,42	2,11	42,2	1,54	2,20	44,6
5	2,21	1,77	2,84	38,7	1,93	2,94	41,1
6	3,01	2,13	3,68	35,3	2,32	3,79	37,6
7	3,94	2,48	4,66	32,2	2,70	4,78	34,4
8	5,02	2,84	5,77	29,4	3,09	5,90	31,6
9	6,25	3,19	7,01	27,0	3,47	7,15	29,1
10	7,62	3,54	8,40	25,0	3,86	8,54	26,9
11	9,13	3,90	9,93	23,1	4,25	10,07	24,9
12	10,78	4,25	11,59	21,5	4,63	11,74	23,2
13	12,59	4,61	13,40	20,1	5,02	13,55	21,7
14	14,53	4,96	15,35	18,9	5,40	15,50	20,4
15	16,62	5,32	17,45	17,7	5,79	17,60	19,2

		v = 25 m/s			v = 26 m/s		
d _π (cm)	p ₁ (Kg/m)	p ₂ (Kg/m)	p (Kg/m)	φ (°)	p ₂ (Kg/m)	p (Kg/m)	φ (°)
2	0,70	0,84	1,09	50,0	0,91	1,15	52,2
3	1,06	1,26	1,64	49,8	1,36	1,72	52,0
4	1,57	1,68	2,29	46,9	1,81	2,39	49,2
5	2,21	2,09	3,05	43,4	2,26	3,17	45,6
6	3,01	2,51	3,92	39,9	2,72	4,05	42,1
7	3,94	2,93	4,91	36,6	3,17	5,06	38,8
8	5,02	3,35	6,04	33,7	3,62	6,19	35,8
9	6,25	3,77	7,30	31,1	4,08	7,46	33,1
10	7,62	4,19	8,69	28,8	4,53	8,86	30,7
11	9,13	4,61	10,22	26,8	4,98	10,40	28,6
12	10,78	5,03	11,90	25,0	5,44	12,08	26,7
13	12,59	5,44	13,71	23,4	5,89	13,89	25,1
14	14,53	5,86	15,67	22,0	6,34	15,85	23,6
15	16,62	6,28	17,77	20,7	6,79	17,95	22,2

		$v = 27 \text{ m/s}$			$v = 28 \text{ m/s}$		
d_{π} (cm)	p_1 (Kg/m)	p_2 (Kg/m)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	p_2 (Kg/m)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)
2	0,70	0,98	1,20	54,3	1,05	1,26	56,3
3	1,06	1,47	1,81	54,1	1,58	1,90	56,0
4	1,57	1,95	2,50	51,3	2,10	2,62	53,3
5	2,21	2,44	3,30	47,8	2,63	3,44	49,9
6	3,01	2,93	4,20	44,3	3,15	4,36	46,3
7	3,94	3,42	5,22	40,9	3,68	5,39	43,0
8	5,02	3,91	6,36	37,9	4,20	6,55	39,9
9	6,25	4,40	7,64	35,1	4,73	7,83	37,1
10	7,62	4,88	9,05	32,7	5,25	9,25	34,6
11	9,13	5,37	10,59	30,5	5,78	10,80	32,3
12	10,78	5,86	12,27	28,5	6,30	12,49	30,3
13	12,59	6,35	14,10	26,8	6,83	14,32	28,5
14	14,53	6,84	16,06	25,2	7,35	16,28	26,8
15	16,62	7,33	18,16	23,8	7,88	18,39	25,4

		$v = 29 \text{ m/s}$			$v = 30 \text{ m/s}$		
d_{π} (cm)	p_1 (Kg/m)	p_2 (Kg/m)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	p_2 (Kg/m)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)
2	0,70	1,13	1,33	58,1	1,21	1,40	59,8
3	1,06	1,69	2,00	57,9	1,81	2,10	59,6
4	1,57	2,25	2,74	55,2	2,41	2,88	57,0
5	2,21	2,82	3,58	51,8	3,02	3,74	53,7
6	3,01	3,38	4,52	48,4	3,62	4,70	50,3
7	3,94	3,94	5,58	45,0	4,22	5,78	47,0
8	5,02	4,51	6,75	41,9	4,82	6,96	43,8
9	6,25	5,07	8,05	39,1	5,43	8,28	41,0
10	7,62	5,63	9,47	36,5	6,03	9,71	38,4
11	9,13	6,20	11,03	34,2	6,63	11,28	36,0
12	10,78	6,76	12,73	32,1	7,24	12,99	33,9
13	12,59	7,33	14,56	30,2	7,84	14,83	31,9
14	14,53	7,89	16,53	28,5	8,44	16,80	30,2
15	16,62	8,45	18,64	27,0	9,05	18,92	28,6

Συνεπώς, είμαστε πλέον σε θέση, για κάθε έναν από τους ανωτέρω συνδυασμούς εξωτερικής διαμέτρου του στρώματος πάγου και ταχύτητας αέρα, να υπολογίσουμε τη δύναμη **H** που καταπονεί τον αγωγό στο κέντρο του και στη συνέχεια τη δύναμη τάνσης T, για θερμοκρασία περιβάλλοντος $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta\Theta=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) και εφαρμόζοντας την υπολογιστική διαδικασία που, ομοίως, παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έχουμε λοιπόν τους πίνακες που ακολουθούν.

v = 5 m/s									
d_π (cm)	p (Kg/m)	φ (^ο)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,70	2,7	1427	1432.3	7.54	350.43	1427	123.0	5.9
3	1,06	2,7	1924	1933.0	8.47	350.55	1924	186.1	8.8
4	1,57	2,4	2533	2547.9	9.49	350.68	2533	274.6	11.7
5	2,22	2,2	3228	3251.3	10.52	350.84	3228	388.4	14.7
6	3,01	1,9	3990	4024.8	11.56	351.02	3990	527.7	17.6
7	3,94	1,7	4808	4857.6	12.58	351.20	4808	692.4	20.6
8	5,02	1,5	5674	5742.3	13.59	351.40	5674	882.6	23.5
9	6,25	1,4	6583	6674.1	14.57	351.61	6583	1098.4	26.5
10	7,62	1,3	7529	7647.3	15.53	351.83	7529	1339.8	29.5
11	9,13	1,2	8511	8661.4	16.47	352.06	8511	1606.9	32.4
12	10,79	1,1	9525	9712.7	17.40	352.30	9525	1899.7	35.4
13	12,59	1,0	10568	10798.4	18.30	352.54	10568	2218.4	38.4
14	14,53	0,9	11638	11917.0	19.20	352.79	11638	2563.0	41.4
15	16,62	0,9	12735	13068.6	20.07	353.05	12735	2933.6	44.4

v = 6 m/s									
d_π (cm)	p (Kg/m)	φ (^ο)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,70	3,9	1428	1433.3	7.55	350.43	1428	123.0	8.5
3	1,06	3,9	1925	1934.0	8.47	350.55	1925	186.1	12.7
4	1,57	3,5	2535	2549.9	9.49	350.68	2535	274.6	16.9
5	2,22	3,1	3229	3252.3	10.53	350.84	3229	388.4	21.2
6	3,01	2,8	3991	4025.8	11.57	351.02	3991	527.7	25.4
7	3,95	2,5	4809	4858.7	12.59	351.20	4809	692.4	29.6
8	5,03	2,2	5675	5743.3	13.59	351.40	5675	882.6	33.9
9	6,25	2,0	6584	6675.1	14.57	351.61	6584	1098.4	38.2
10	7,62	1,8	7531	7649.4	15.53	351.83	7531	1339.8	42.4
11	9,13	1,7	8512	8662.5	16.48	352.06	8512	1606.9	46.7
12	10,79	1,5	9526	9713.7	17.40	352.30	9526	1899.7	51.0
13	12,59	1,4	10569	10799.5	18.31	352.54	10569	2218.4	55.3
14	14,53	1,3	11640	11919.0	19.20	352.79	11640	2563.0	59.6
15	16,62	1,2	12736	13069.7	20.07	353.05	12736	2933.6	63.9

$v = 7 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,70	5,3	1430	1435.3	7.55	350.43	1430	123.0	11.5
3	1,07	5,3	1928	1937.0	8.48	350.55	1928	186.1	17.3
4	1,57	4,8	2538	2552.9	9.49	350.69	2538	274.6	23.0
5	2,22	4,2	3232	3255.4	10.53	350.84	3232	388.4	28.8
6	3,01	3,7	3994	4028.9	11.57	351.02	3994	527.7	34.6
7	3,95	3,3	4812	4861.7	12.59	351.20	4812	692.4	40.4
8	5,03	3,0	5678	5746.4	13.59	351.40	5678	882.6	46.1
9	6,25	2,7	6586	6677.2	14.58	351.61	6586	1098.4	51.9
10	7,62	2,5	7533	7651.4	15.54	351.83	7533	1339.8	57.8
11	9,14	2,3	8514	8664.5	16.48	352.06	8514	1606.9	63.6
12	10,79	2,1	9528	9715.8	17.40	352.30	9528	1899.7	69.4
13	12,59	1,9	10571	10801.5	18.31	352.54	10571	2218.4	75.2
14	14,54	1,8	11641	11920.1	19.20	352.79	11641	2563.0	81.1
15	16,63	1,7	12738	13071.7	20.07	353.05	12738	2933.6	86.9

$v = 8 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,71	7,0	1433	1438.3	7.56	350.43	1433	123.0	15.0
3	1,07	6,9	1932	1941.1	8.49	350.55	1932	186.1	22.5
4	1,58	6,2	2542	2557.0	9.50	350.69	2542	274.6	30.1
5	2,22	5,5	3237	3260.4	10.54	350.84	3237	388.4	37.6
6	3,02	4,9	3998	4032.9	11.57	351.02	3998	527.7	45.2
7	3,95	4,4	4816	4865.8	12.59	351.21	4816	692.4	52.7
8	5,03	3,9	5682	5750.5	13.60	351.40	5682	882.6	60.3
9	6,26	3,5	6590	6681.2	14.58	351.61	6590	1098.4	67.8
10	7,63	3,2	7536	7654.5	15.54	351.83	7536	1339.8	75.4
11	9,14	3,0	8518	8668.6	16.48	352.06	8518	1606.9	83.0
12	10,80	2,7	9531	9718.9	17.40	352.30	9531	1899.7	90.6
13	12,60	2,5	10574	10804.7	18.31	352.54	10574	2218.4	98.3
14	14,54	2,4	11644	11923.2	19.20	352.79	11644	2563.0	105.9
15	16,63	2,2	12741	13074.9	20.07	353.05	12741	2933.6	113.5

$v = 9 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,71	8,8	1438	1443.4	7.57	350.44	1438	123.0	19.0
3	1,07	8,7	1938	1947.1	8.50	350.55	1938	186.1	28.5
4	1,58	7,9	2549	2564.0	9.51	350.69	2549	274.6	38.1
5	2,23	7,0	3243	3266.5	10.55	350.85	3243	388.4	47.6
6	3,02	6,2	4004	4039.0	11.58	351.02	4004	527.7	57.1
7	3,96	5,5	4821	4870.9	12.60	351.21	4821	692.4	66.7
8	5,04	4,9	5687	5755.6	13.60	351.41	5687	882.6	76.3
9	6,27	4,5	6595	6686.4	14.58	351.62	6595	1098.4	85.9
10	7,64	4,1	7541	7659.7	15.54	351.83	7541	1339.8	95.5
11	9,15	3,7	8522	8672.8	16.49	352.06	8522	1606.9	105.1
12	10,80	3,5	9535	9723.1	17.41	352.30	9535	1899.7	114.7
13	12,61	3,2	10578	10808.8	18.31	352.54	10578	2218.4	124.4
14	14,55	3,0	11648	11927.4	19.20	352.79	11648	2563.0	134.0
15	16,64	2,8	12744	13078.1	20.08	353.05	12744	2933.6	143.7

$v = 10 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,71	10,8	1444	1449.4	7.58	350.44	1444	123.0	23.5
3	1,08	10,7	1946	1955.2	8.51	350.55	1946	186.1	35.2
4	1,59	9,7	2557	2572.1	9.52	350.69	2557	274.6	47.0
5	2,24	8,6	3252	3275.6	10.56	350.85	3252	388.4	58.8
6	3,03	7,6	4013	4048.2	11.59	351.02	4013	527.7	70.6
7	3,97	6,8	4829	4879.1	12.61	351.21	4829	692.4	82.4
8	5,05	6,1	5694	5762.8	13.61	351.41	5694	882.6	94.2
9	6,28	5,5	6602	6693.6	14.59	351.62	6602	1098.4	106.0
10	7,65	5,0	7548	7666.9	15.55	351.84	7548	1339.8	117.9
11	9,16	4,6	8529	8680.0	16.49	352.06	8529	1606.9	129.7
12	10,81	4,3	9541	9729.3	17.41	352.30	9541	1899.7	141.6
13	12,62	4,0	10584	10815.1	18.32	352.54	10584	2218.4	153.5
14	14,56	3,7	11654	11933.7	19.21	352.80	11654	2563.0	165.5
15	16,65	3,5	12750	13084.3	20.08	353.05	12750	2933.6	177.4

$v = 11 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,72	13,0	1453	1458.5	7.60	350.44	1453	123.0	28.4
3	1,09	12,9	1957	1966.3	8.53	350.55	1957	186.1	42.6
4	1,60	11,7	2569	2584.3	9.54	350.69	2569	274.6	56.9
5	2,25	10,4	3263	3286.8	10.58	350.85	3263	388.5	71.1
6	3,05	9,2	4024	4059.3	11.61	351.02	4024	527.7	85.4
7	3,98	8,2	4840	4890.3	12.62	351.21	4840	692.4	99.7
8	5,06	7,4	5705	5774.0	13.62	351.41	5705	882.6	114.0
9	6,29	6,7	6612	6703.8	14.60	351.62	6612	1098.4	128.3
10	7,66	6,1	7557	7676.2	15.56	351.84	7557	1339.8	142.6
11	9,17	5,6	8537	8688.3	16.50	352.07	8537	1606.9	157.0
12	10,83	5,2	9550	9738.6	17.42	352.30	9550	1899.8	171.4
13	12,63	4,8	10591	10822.4	18.33	352.55	10591	2218.5	185.8
14	14,57	4,5	11661	11941.0	19.21	352.80	11661	2563.1	200.2
15	16,66	4,2	12757	13091.7	20.09	353.06	12757	2933.6	214.7

$v = 12 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,73	15,	1464	1469.55	7.62	350.4	1464	123.0	33.8
3	1,10	15,	1972	1981.42	8.55	350.5	1972	186.1	50.7
4	1,61	13,	2585	2600.43	9.56	350.7	2585	274.6	67.7
5	2,27	12,	3279	3303.01	10.6	350.8	3279	388.5	84.6
6	3,06	10,	4039	4074.59	11.6	351.0	4039	527.7	101.
7	4,00	9,7	4854	4904.57	12.6	351.2	4854	692.4	118.
8	5,08	8,7	5718	5787.31	13.6	351.4	5718	882.6	135.
9	6,31	7,9	6624	6716.18	14.6	351.6	6624	1098.	152.
10	7,68	7,2	7569	7688.54	15.5	351.8	7569	1339.	169.
11	9,19	6,6	8549	8700.71	16.5	352.0	8549	1606.	186.
12	10,85	6,1	9560	9749.07	17.4	352.3	9560	1899.	203.
13	12,65	5,7	1060	10833.8	18.3	352.5	1060	2218.	221.
14	14,59	5,3	1167	11951.5	19.2	352.8	1167	2563.	238.
15	16,68	5,0	1276	13101.2	20.1	353.0	1276	2933.	255.

$v = 13 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,74	17,9	1478	1483.6	7.65	350.45	1478	123.0	39.7
3	1,12	17,7	1990	1999.6	8.59	350.56	1990	186.1	59.5
4	1,63	16,1	2604	2619.6	9.60	350.70	2604	274.6	79.4
5	2,29	14,3	3298	3322.3	10.62	350.86	3298	388.5	99.3
6	3,08	12,7	4057	4092.9	11.65	351.03	4057	527.7	119.2
7	4,02	11,4	4872	4922.9	12.66	351.22	4872	692.4	139.2
8	5,10	10,2	5735	5804.7	13.66	351.42	5735	882.6	159.2
9	6,33	9,3	6640	6732.6	14.63	351.63	6640	1098.4	179.2
10	7,70	8,5	7584	7704.0	15.59	351.84	7584	1339.8	199.2
11	9,21	7,8	8563	8715.2	16.52	352.07	8563	1606.9	219.3
12	10,87	7,2	9574	9763.6	17.44	352.31	9574	1899.8	239.4
13	12,67	6,7	10615	10847.5	18.35	352.55	10615	2218.5	259.5
14	14,62	6,2	11684	11965.1	19.23	352.80	11684	2563.1	279.6
15	16,71	5,8	12779	13114.8	20.10	353.06	12779	2933.7	299.8

$v = 14 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,75	20,5	1495	1500.8	7.68	350.45	1495	123.0	46.0
3	1,13	20,4	2012	2021.8	8.63	350.57	2012	186.2	69.1
4	1,65	18,5	2628	2643.9	9.63	350.71	2628	274.6	92.1
5	2,31	16,5	3322	3346.6	10.66	350.86	3322	388.5	115.2
6	3,11	14,7	4081	4117.3	11.68	351.04	4081	527.7	138.3
7	4,05	13,1	4894	4945.4	12.69	351.22	4894	692.4	161.4
8	5,13	11,8	5756	5826.2	13.68	351.42	5756	882.6	184.6
9	6,36	10,7	6660	6753.2	14.65	351.63	6660	1098.4	207.8
10	7,73	9,8	7603	7723.6	15.61	351.85	7603	1339.8	231.0
11	9,24	9,0	8581	8733.9	16.54	352.08	8581	1606.9	254.3
12	10,90	8,3	9591	9781.3	17.46	352.31	9591	1899.8	277.6
13	12,70	7,7	10632	10865.2	18.36	352.56	10632	2218.5	300.9
14	14,65	7,2	11700	11981.9	19.24	352.81	11700	2563.1	324.3
15	16,73	6,8	12794	13130.7	20.12	353.06	12794	2933.7	347.7

$v = 15 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,76	23,2	1516	1521.9	7.72	350.45	1516	123.0	52.8
3	1,15	23,1	2040	2050.0	8.67	350.57	2040	186.2	79.3
4	1,68	21,1	2658	2674.2	9.68	350.71	2658	274.6	105.7
5	2,34	18,8	3352	3377.0	10.70	350.87	3352	388.5	132.2
6	3,14	16,7	4109	4145.8	11.72	351.04	4109	527.7	158.8
7	4,08	15,0	4922	4973.9	12.72	351.23	4922	692.4	185.3
8	5,17	13,5	5782	5852.8	13.71	351.43	5782	882.6	211.9
9	6,39	12,3	6685	6778.8	14.68	351.64	6685	1098.4	238.5
10	7,76	11,2	7627	7748.3	15.63	351.85	7627	1339.8	265.2
11	9,28	10,3	8604	8757.6	16.56	352.08	8604	1607.0	291.9
12	10,94	9,5	9613	9804.1	17.48	352.32	9613	1899.8	318.7
13	12,74	8,9	10652	10886.1	18.38	352.56	10652	2218.5	345.5
14	14,68	8,3	11719	12001.8	19.26	352.81	11719	2563.2	372.3
15	16,77	7,7	12813	13150.6	20.13	353.07	12813	2933.7	399.2

$v = 16 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,78	26,0	1541	1547.1	7.77	350.46	1541	123.0	60.1
3	1,18	25,9	2072	2082.3	8.73	350.58	2072	186.2	90.2
4	1,71	23,7	2693	2709.6	9.73	350.72	2693	274.6	120.3
5	2,37	21,2	3387	3412.5	10.75	350.88	3387	388.5	150.5
6	3,18	18,9	4144	4181.4	11.76	351.05	4144	527.7	180.6
7	4,12	16,9	4955	5007.6	12.76	351.24	4955	692.4	210.9
8	5,21	15,3	5814	5885.6	13.74	351.44	5814	882.7	241.1
9	6,44	13,9	6715	6809.7	14.71	351.64	6715	1098.4	271.4
10	7,81	12,7	7655	7777.2	15.66	351.86	7655	1339.9	301.8
11	9,32	11,7	8631	8785.6	16.59	352.09	8631	1607.0	332.1
12	10,98	10,8	9639	9831.1	17.50	352.32	9639	1899.9	362.6
13	12,78	10,0	10677	10912.1	18.40	352.57	10677	2218.6	393.1
14	14,73	9,4	11743	12026.9	19.28	352.82	11743	2563.2	423.6
15	16,82	8,8	12836	13174.8	20.15	353.07	12836	2933.8	454.2

$v = 17 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,80	28,9	1570	1576.3	7.82	350.47	1570	123.0	67.9
3	1,21	28,7	2110	2120.6	8.79	350.59	2110	186.2	101.8
4	1,75	26,3	2734	2751.1	9.80	350.73	2734	274.6	135.8
5	2,42	23,6	3428	3454.1	10.81	350.89	3428	388.5	169.9
6	3,22	21,1	4184	4222.1	11.81	351.06	4184	527.7	203.9
7	4,17	19,0	4994	5047.4	12.81	351.25	4994	692.5	238.0
8	5,26	17,1	5851	5923.5	13.79	351.44	5851	882.7	272.2
9	6,49	15,6	6751	6846.6	14.75	351.65	6751	1098.5	306.4
10	7,86	14,3	7690	7813.3	15.69	351.87	7690	1339.9	340.7
11	9,37	13,1	8664	8819.8	16.62	352.10	8664	1607.0	375.0
12	11,03	12,2	9670	9863.4	17.53	352.33	9670	1899.9	409.3
13	12,83	11,3	10707	10943.4	18.42	352.57	10707	2218.6	443.7
14	14,78	10,6	11772	12057.3	19.30	352.82	11772	2563.2	478.2
15	16,87	9,9	12863	13203.3	20.17	353.08	12863	2933.8	512.8

$v = 18 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,83	31,7	1603	1609.5	7.89	350.47	1603	123.0	76.1
3	1,25	31,5	2153	2164.0	8.87	350.60	2153	186.2	114.2
4	1,79	29,0	2781	2798.7	9.87	350.74	2781	274.7	152.3
5	2,47	26,1	3477	3503.8	10.87	350.90	3477	388.5	190.4
6	3,28	23,4	4232	4270.9	11.87	351.07	4232	527.8	228.6
7	4,23	21,1	5040	5094.3	12.86	351.26	5040	692.5	266.9
8	5,31	19,1	5895	5968.5	13.83	351.45	5895	882.7	305.2
9	6,55	17,4	6793	6889.8	14.79	351.66	6793	1098.5	343.5
10	7,92	15,9	7730	7854.6	15.73	351.88	7730	1339.9	381.9
11	9,44	14,7	8702	8859.1	16.65	352.10	8702	1607.1	420.4
12	11,09	13,6	9707	9901.8	17.56	352.34	9707	1900.0	458.9
13	12,90	12,6	10742	10980.0	18.45	352.58	10742	2218.7	497.5
14	14,84	11,8	11806	12093.0	19.33	352.83	11806	2563.3	536.1
15	16,93	11,1	12896	13238.0	20.20	353.09	12896	2933.9	574.9

$v = 19 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,85	34,6	1641	1647.8	7.96	350.48	1641	123.0	84.8
3	1,29	34,3	2203	2214.5	8.95	350.61	2203	186.2	127.2
4	1,84	31,7	2836	2854.3	9.95	350.75	2836	274.7	169.7
5	2,52	28,6	3532	3559.6	10.95	350.91	3532	388.5	212.2
6	3,34	25,8	4287	4326.9	11.94	351.08	4287	527.8	254.8
7	4,29	23,2	5093	5148.5	12.92	351.27	5093	692.5	297.4
8	5,38	21,1	5947	6021.8	13.89	351.47	5947	882.7	340.0
9	6,62	19,2	6843	6941.2	14.84	351.67	6843	1098.5	382.8
10	7,99	17,6	7777	7903.1	15.78	351.89	7777	1340.0	425.6
11	9,51	16,2	8747	8905.7	16.70	352.11	8747	1607.1	468.4
12	11,17	15,1	9750	9946.6	17.60	352.35	9750	1900.0	511.3
13	12,97	14,0	10784	11023.8	18.49	352.59	10784	2218.7	554.3
14	14,92	13,1	11846	12134.9	19.36	352.84	11846	2563.4	597.4
15	17,01	12,3	12934	13278.1	20.23	353.10	12934	2934.0	640.5

$v = 20 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,88	37,4	1684	1691.1	8.04	350.49	1684	123.0	93.9
3	1,33	37,1	2258	2270.0	9.04	350.62	2258	186.2	141.0
4	1,90	34,4	2897	2916.1	10.04	350.77	2897	274.7	188.0
5	2,59	31,2	3595	3623.6	11.04	350.93	3595	388.5	235.1
6	3,41	28,1	4349	4390.0	12.02	351.10	4349	527.8	282.3
7	4,37	25,4	5154	5210.7	13.00	351.28	5154	692.5	329.5
8	5,46	23,1	6006	6082.2	13.95	351.48	6006	882.8	376.8
9	6,70	21,1	6899	6998.8	14.90	351.69	6899	1098.6	424.1
10	8,07	19,4	7832	7959.8	15.83	351.90	7832	1340.0	471.5
11	9,59	17,9	8800	8960.6	16.74	352.13	8800	1607.2	519.0
12	11,25	16,6	9801	9999.5	17.64	352.36	9801	1900.1	566.6
13	13,06	15,5	10832	11074.0	18.53	352.60	10832	2218.8	614.2
14	15,01	14,5	11892	12183.1	19.40	352.85	11892	2563.5	661.9
15	17,10	13,6	12979	13325.4	20.26	353.11	12979	2934.1	709.7

$v = 21 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,92	40,1	1731	1738.5	8.12	350.50	1731	123.0	103.6
3	1,38	39,9	2319	2331.6	9.14	350.64	2319	186.2	155.4
4	1,96	37,0	2965	2984.9	10.14	350.78	2965	274.7	207.3
5	2,66	33,7	3666	3695.6	11.13	350.94	3666	388.6	259.2
6	3,49	30,5	4420	4462.3	12.11	351.12	4420	527.8	311.2
7	4,45	27,7	5224	5282.2	13.07	351.30	5224	692.6	363.3
8	5,55	25,2	6073	6150.9	14.03	351.49	6073	882.8	415.4
9	6,79	23,1	6964	7065.6	14.97	351.70	6964	1098.6	467.6
10	8,17	21,2	7894	8023.8	15.89	351.92	7894	1340.1	519.9
11	9,69	19,6	8860	9022.8	16.80	352.14	8860	1607.2	572.3
12	11,35	18,2	9858	10058.9	17.69	352.37	9858	1900.1	624.7
13	13,16	17,0	10888	11132.4	18.57	352.62	10888	2218.9	677.2
14	15,11	15,9	11946	12239.7	19.44	352.86	11946	2563.5	729.8
15	17,20	14,9	13031	13380.2	20.30	353.12	13031	2934.2	782.5

$v = 22 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	0,96	42,7	1782	1789.9	8.22	350.51	1782	123.0	113.7
3	1,44	42,5	2386	2399.3	9.25	350.65	2386	186.2	170.6
4	2,03	39,6	3040	3060.9	10.25	350.80	3040	274.7	227.5
5	2,74	36,2	3744	3774.8	11.24	350.96	3744	388.6	284.5
6	3,58	32,9	4499	4542.7	12.21	351.13	4499	527.9	341.6
7	4,55	29,9	5301	5360.9	13.17	351.32	5301	692.6	398.7
8	5,65	27,3	6149	6228.8	14.11	351.51	6149	882.9	456.0
9	6,90	25,0	7038	7141.7	15.04	351.72	7038	1098.7	513.2
10	8,28	23,1	7965	8097.1	15.96	351.93	7965	1340.1	570.6
11	9,80	21,3	8928	9093.2	16.86	352.16	8928	1607.3	628.1
12	11,47	19,8	9924	10127.5	17.75	352.39	9924	1900.2	685.6
13	13,27	18,5	10951	11198.2	18.63	352.63	10951	2219.0	743.3
14	15,22	17,4	12007	12303.7	19.49	352.88	12007	2563.7	801.0
15	17,32	16,3	13090	13442.3	20.35	353.13	13090	2934.3	858.9

$v = 23 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	1,00	45,3	1838	1846.3	8.32	350.53	1838	123.0	124.2
3	1,50	45,0	2459	2473.1	9.37	350.67	2459	186.2	186.4
4	2,11	42,2	3122	3143.9	10.37	350.82	3122	274.7	248.7
5	2,84	38,7	3831	3863.2	11.35	350.98	3831	388.6	311.0
6	3,68	35,3	4586	4631.4	12.32	351.15	4586	527.9	373.4
7	4,66	32,2	5388	5449.8	13.26	351.34	5388	692.6	435.8
8	5,77	29,4	6233	6314.9	14.20	351.53	6233	882.9	498.4
9	7,01	27,0	7120	7226.1	15.12	351.74	7120	1098.7	561.0
10	8,40	25,0	8045	8179.7	16.03	351.95	8045	1340.2	623.7
11	9,93	23,1	9005	9173.1	16.93	352.17	9005	1607.4	686.5
12	11,59	21,5	9999	10205.5	17.81	352.41	9999	1900.3	749.4
13	13,40	20,1	11023	11273.5	18.69	352.65	11023	2219.1	812.4
14	15,35	18,9	12076	12376.2	19.55	352.89	12076	2563.8	875.5
15	17,45	17,7	13157	13512.9	20.40	353.15	13157	2934.4	938.8

$v = 24 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	1,04	47,7	1898	1906.8	8.42	350.54	1898	123.0	135.3
3	1,57	47,5	2537	2551.9	9.49	350.69	2537	186.2	203.0
4	2,20	44,6	3211	3234.1	10.50	350.84	3211	274.7	270.8
5	2,94	41,1	3924	3957.7	11.48	351.00	3924	388.6	338.6
6	3,79	37,6	4682	4729.2	12.43	351.18	4682	527.9	406.6
7	4,78	34,4	5483	5546.9	13.37	351.36	5483	692.7	474.6
8	5,90	31,6	6327	6411.3	14.30	351.55	6327	883.0	542.7
9	7,15	29,1	7212	7320.8	15.21	351.76	7212	1098.8	610.9
10	8,54	26,9	8134	8271.6	16.12	351.97	8134	1340.3	679.2
11	10,07	24,9	9091	9262.2	17.01	352.19	9091	1607.5	747.6
12	11,74	23,2	10082	10292.0	17.89	352.43	10082	1900.4	816.0
13	13,55	21,7	11104	11358.1	18.75	352.67	11104	2219.2	884.7
14	15,50	20,4	12154	12458.0	19.61	352.91	12154	2563.9	953.4
15	17,60	19,2	13232	13592.0	20.46	353.17	13232	2934.6	1022.2

$v = 25 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	1,09	50,0	1962	1971.3	8.54	350.55	1962	122.6	147.2
3	1,64	49,8	2621	2636.8	9.62	350.70	2621	185.8	220.6
4	2,29	46,9	3306	3330.4	10.63	350.86	3306	274.9	293.7
5	3,05	43,4	4026	4061.4	11.61	351.02	4026	388.6	367.5
6	3,92	39,9	4786	4835.2	12.56	351.20	4786	528.4	440.6
7	4,91	36,6	5587	5653.3	13.49	351.38	5587	692.7	515.1
8	6,04	33,7	6430	6517.0	14.41	351.58	6430	882.8	589.1
9	7,30	31,1	7313	7424.8	15.32	351.78	7313	1098.9	662.9
10	8,69	28,8	8232	8372.9	16.21	351.99	8232	1340.4	737.0
11	10,22	26,8	9187	9361.8	17.10	352.22	9187	1607.4	811.6
12	11,90	25,0	10175	10388.8	17.97	352.45	10175	1900.1	886.6
13	13,71	23,4	11194	11452.2	18.83	352.69	11194	2219.7	959.1
14	15,67	22,0	12241	12549.4	19.68	352.93	12241	2566.0	1029.6
15	17,77	20,7	13316	13680.6	20.52	353.19	13316	2934.8	1109.0

$v = 26 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	1,15	52,2	2029	2038.9	8.66	350.57	2029	123.0	158.8
3	1,72	52,0	2709	2725.8	9.76	350.72	2709	186.2	238.3
4	2,39	49,2	3407	3432.8	10.78	350.88	3407	274.8	317.8
5	3,17	45,6	4134	4171.2	11.75	351.05	4134	388.7	397.5
6	4,05	42,1	4898	4949.4	12.69	351.22	4898	528.0	477.2
7	5,06	38,8	5700	5768.9	13.62	351.41	5700	692.8	557.1
8	6,19	35,8	6543	6633.0	14.53	351.60	6543	883.1	637.0
9	7,46	33,1	7423	7538.1	15.43	351.81	7423	1099.0	717.0
10	8,86	30,7	8341	8485.6	16.31	352.02	8341	1340.5	797.2
11	10,40	28,6	9293	9471.8	17.19	352.24	9293	1607.7	877.5
12	12,08	26,7	10278	10496.1	18.06	352.47	10278	1900.7	957.8
13	13,89	25,1	11293	11555.8	18.91	352.71	11293	2219.5	1038.4
14	15,85	23,6	12338	12651.2	19.76	352.96	12338	2564.2	1119.0
15	17,95	22,2	13410	13779.7	20.59	353.21	13410	2934.9	1199.8

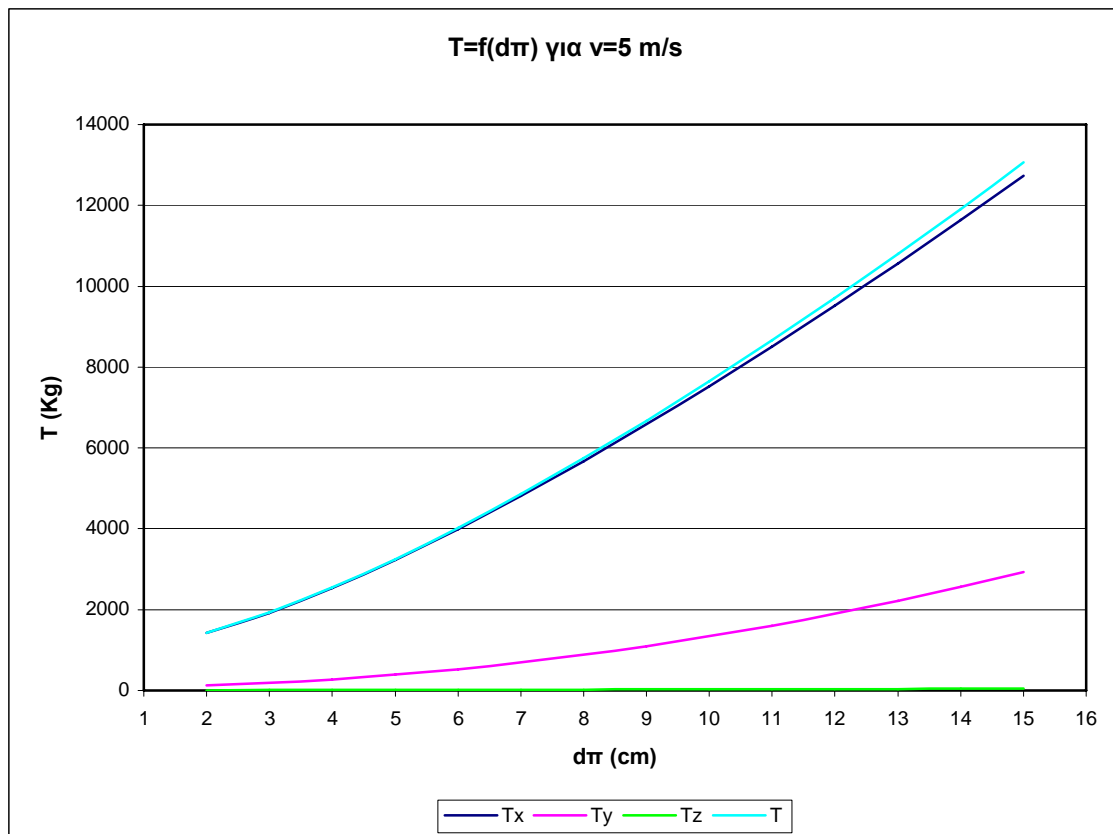
$v = 27 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	1,20	54,3	2100	2110.6	8.78	350.59	2100	123.0	171.2
3	1,81	54,1	2802	2819.9	9.90	350.75	2802	186.2	257.0
4	2,50	51,3	3514	3541.4	10.93	350.91	3514	274.8	342.8
5	3,30	47,8	4250	4289.2	11.90	351.08	4250	388.7	428.7
6	4,20	44,3	5018	5071.9	12.83	351.25	5018	528.0	514.7
7	5,22	40,9	5822	5893.8	13.75	351.44	5822	692.8	600.8
8	6,36	37,9	6664	6757.3	14.66	351.63	6664	883.1	687.0
9	7,64	35,1	7544	7662.8	15.55	351.83	7544	1099.0	773.3
10	9,05	32,7	8459	8607.6	16.43	352.05	8459	1340.6	859.8
11	10,59	30,5	9408	9591.2	17.30	352.27	9408	1607.8	946.3
12	12,27	28,5	10390	10612.8	18.15	352.50	10390	1900.8	1033.0
13	14,10	26,8	11403	11670.9	19.00	352.74	11403	2219.7	1119.9
14	16,06	25,2	12445	12763.6	19.84	352.98	12445	2564.4	1206.8
15	18,16	23,8	13514	13889.5	20.67	353.24	13514	2935.1	1294.0

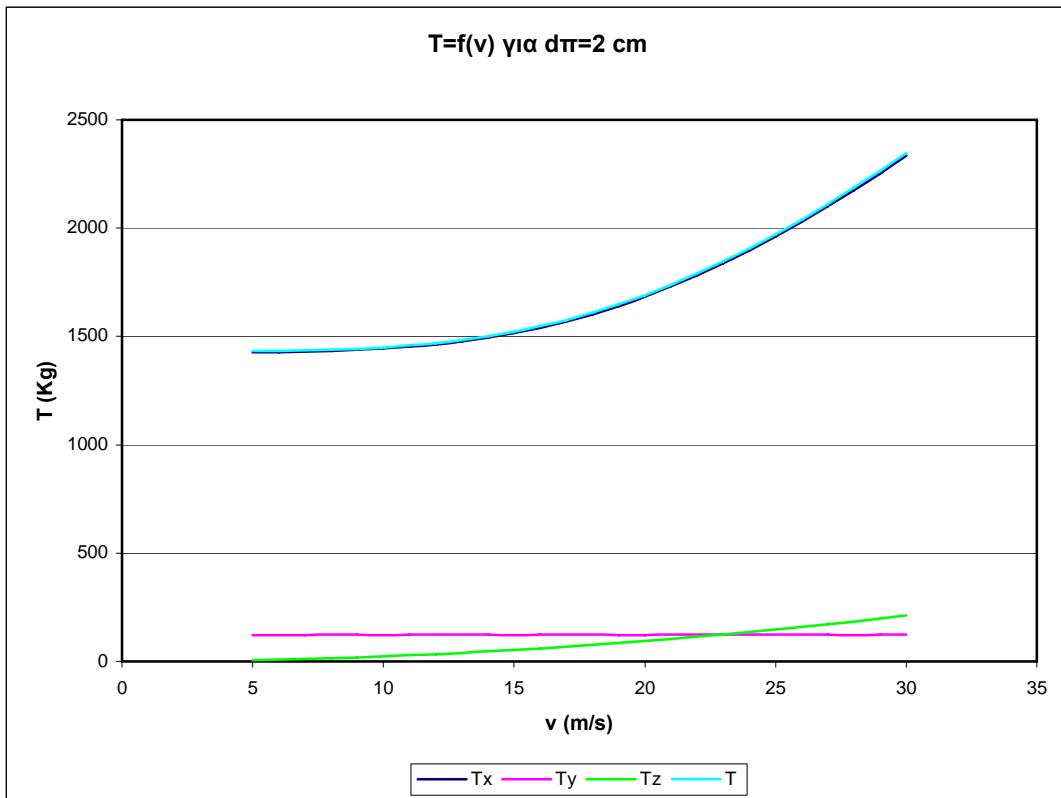
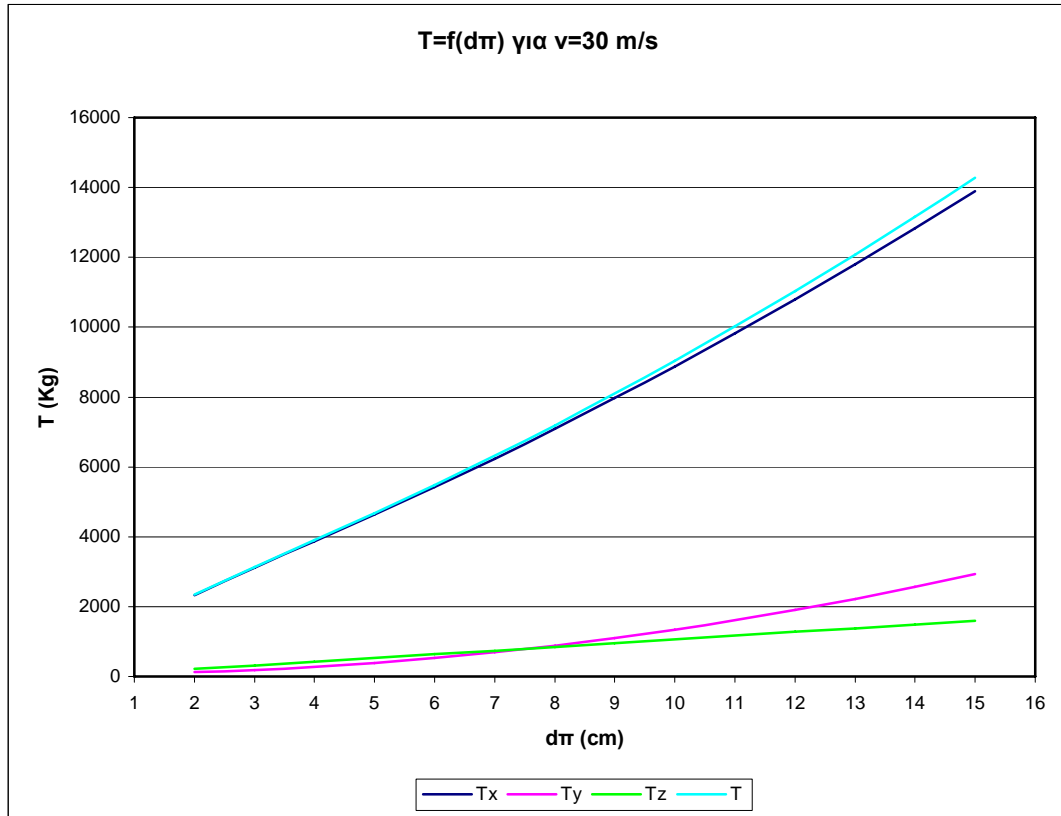
$v = 28 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	1,26	56,3	2175	2186.2	8.90	350.60	2175	123.0	184.2
3	1,90	56,0	2900	2919.1	10.04	350.77	2900	186.3	276.4
4	2,62	53,3	3627	3656.0	11.08	350.93	3627	274.8	368.7
5	3,44	49,9	4372	4413.4	12.05	351.10	4372	388.7	461.1
6	4,36	46,3	5146	5202.6	12.98	351.28	5146	528.1	553.6
7	5,39	43,0	5953	6027.9	13.90	351.47	5953	692.9	646.2
8	6,55	39,9	6796	6892.9	14.79	351.66	6796	883.2	738.9
9	7,83	37,1	7674	7796.8	15.67	351.86	7674	1099.1	831.7
10	9,25	34,6	8587	8740.1	16.55	352.08	8587	1340.7	924.7
11	10,80	32,3	9534	9722.1	17.41	352.30	9534	1607.9	1017.8
12	12,49	30,3	10514	10742.1	18.26	352.53	10514	1901.0	1111.1
13	14,32	28,5	11524	11797.5	19.10	352.76	11524	2219.8	1204.5
14	16,28	26,8	12562	12886.7	19.94	353.01	12562	2564.6	1298.0
15	18,39	25,4	13629	14010.8	20.76	353.26	13629	2935.4	1391.7

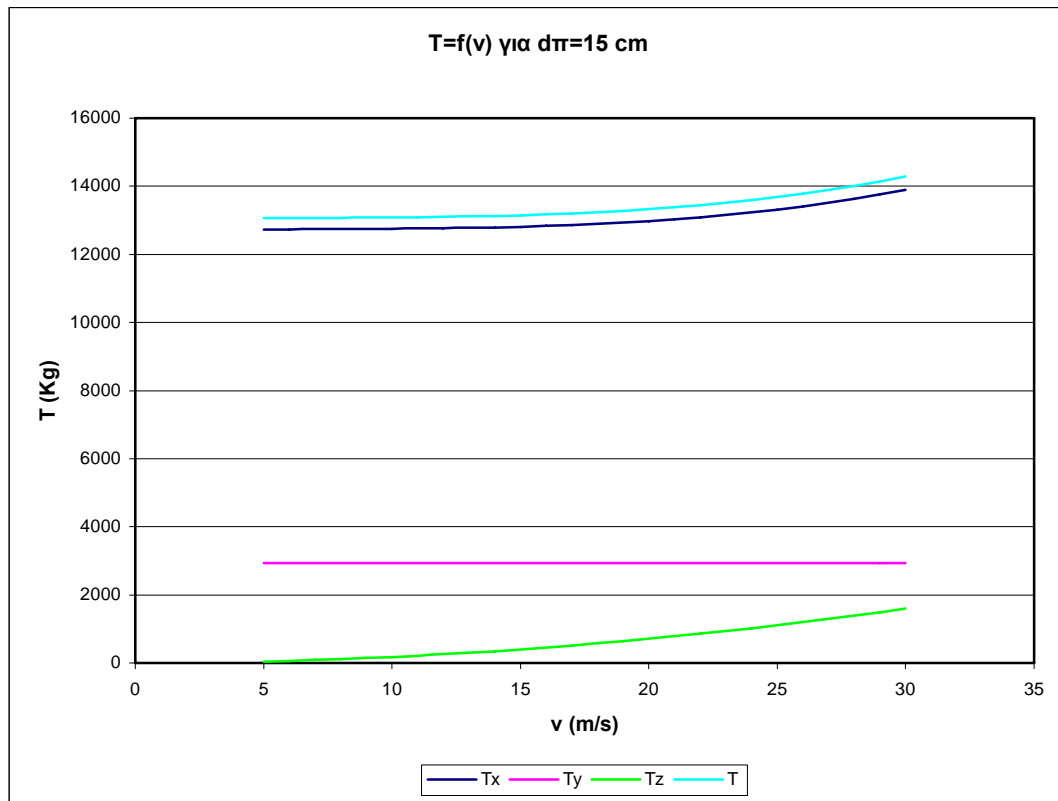
$v = 29 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	1,33	58,1	2253	2265.0	9.03	350.62	2253	123.0	197.6
3	2,00	57,9	3001	3021.4	10.20	350.79	3001	186.3	296.5
4	2,74	55,2	3745	3775.8	11.24	350.96	3745	274.8	395.5
5	3,58	51,8	4501	4544.8	12.21	351.13	4501	388.8	494.6
6	4,52	48,4	5281	5340.5	13.14	351.31	5281	528.1	593.9
7	5,58	45,0	6092	6170.3	14.05	351.50	6092	693.0	693.2
8	6,75	41,9	6936	7036.8	14.94	351.69	6936	883.3	792.7
9	8,05	39,1	7814	7941.2	15.81	351.90	7814	1099.2	892.3
10	9,47	36,5	8726	8884.0	16.67	352.11	8726	1340.8	992.0
11	11,03	34,2	9671	9864.4	17.53	352.33	9671	1608.1	1091.9
12	12,73	32,1	10648	10881.9	18.37	352.56	10648	1901.1	1191.9
13	14,56	30,2	11655	11934.7	19.21	352.80	11655	2220.0	1292.1
14	16,53	28,5	12690	13021.3	20.04	353.04	12690	2564.8	1392.5
15	18,64	27,0	13754	14142.8	20.85	353.29	13754	2935.6	1493.0

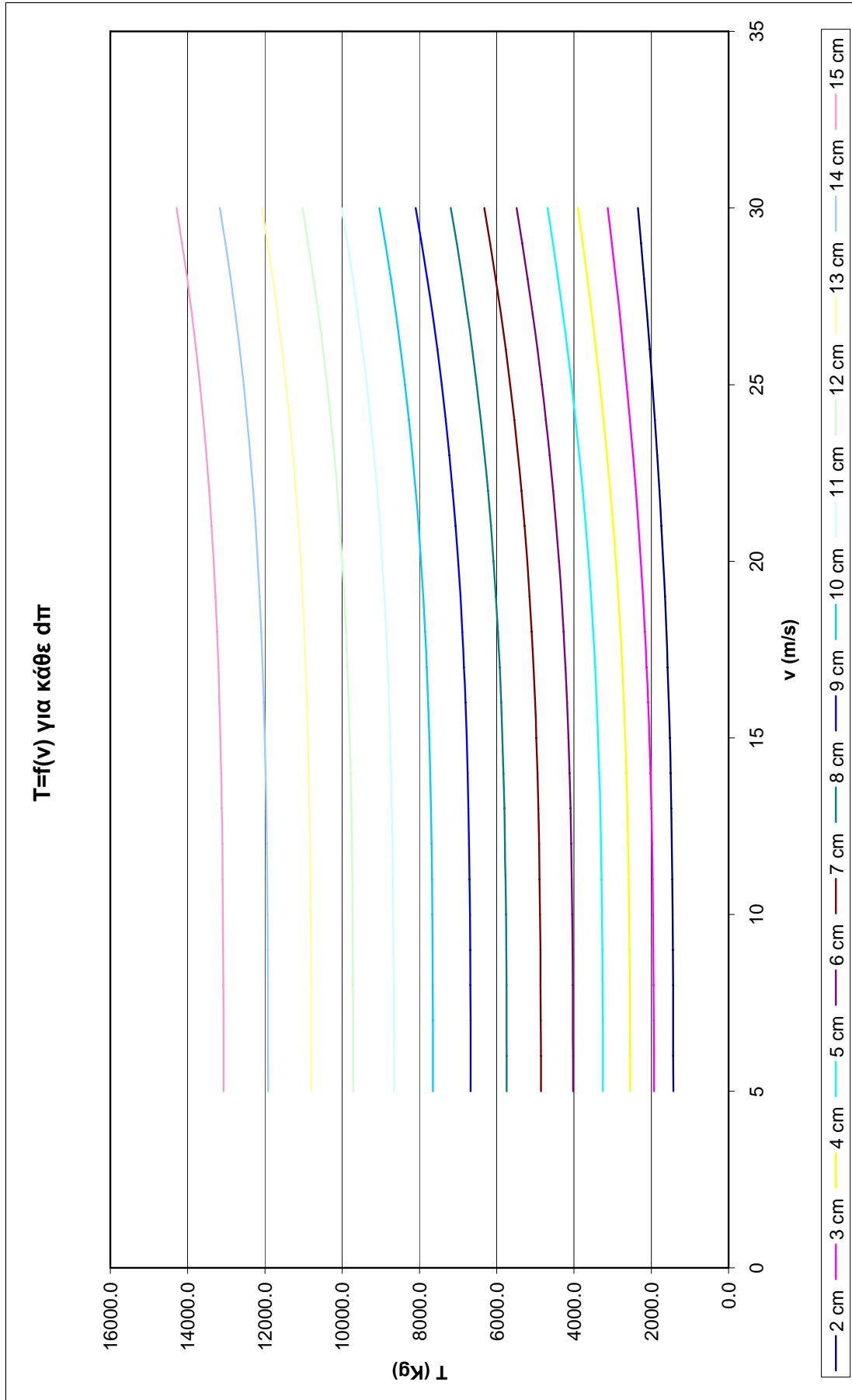
$v = 30 \text{ m/s}$									
d_{π} (cm)	p (Kg/m)	φ ($^{\circ}$)	H (Kg)	T (Kg)	d (m)	s (m)	T_x (Kg)	T_y (Kg)	T_z (Kg)
2	1,40	59,8	2334	2346.8	9.16	350.64	2334	123.1	211.4
3	2,10	59,6	3107	3128.7	10.35	350.82	3107	186.3	317.3
4	2,88	57,0	3868	3900.8	11.40	350.99	3868	274.8	423.3
5	3,74	53,7	4636	4682.3	12.38	351.16	4636	388.8	529.4
6	4,70	50,3	5424	5486.6	13.31	351.35	5424	528.2	635.6
7	5,78	47,0	6239	6321.1	14.21	351.53	6239	693.0	741.9
8	6,96	43,8	7085	7190.1	15.09	351.73	7085	883.4	848.4
9	8,28	41,0	7964	8096.0	15.96	351.93	7964	1099.4	955.0
10	9,71	38,4	8875	9038.3	16.81	352.14	8875	1340.9	1061.7
11	11,28	36,0	9818	10017.2	17.66	352.36	9818	1608.3	1168.6
12	12,99	33,9	10792	11032.2	18.50	352.59	10792	1901.3	1275.7
13	14,83	31,9	11797	12083.5	19.32	352.83	11797	2220.2	1382.9
14	16,80	30,2	12829	13167.5	20.15	353.07	12829	2565.1	1490.3
15	18,92	28,6	13889	14285.6	20.96	353.32	13889	2935.9	1597.9

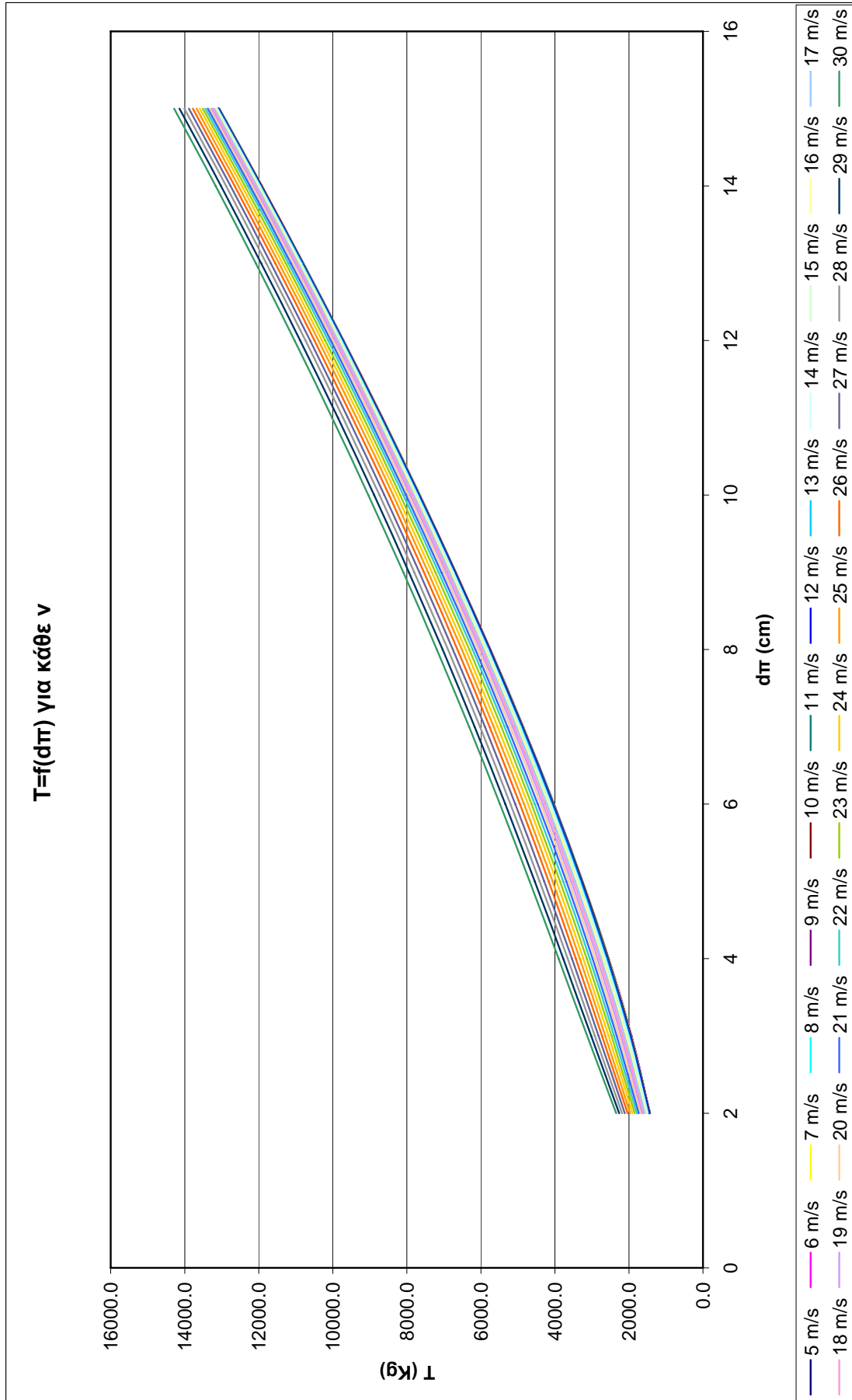
Για την καλύτερη αξιολόγηση των παραπάνω αποτελεσμάτων απεικονίζουμε γραφικά τη μεταβολή της δύναμης τάνυσης του αγωγού και των συνιστωσών αυτής (διαμήκης – εγκάρσια – κατακόρυφη) συναρτήσει της εξωτερικής διαμέτρου του στρώματος πάγου τόσο για την ελάχιστη (5 m/s) όσο και για τη μέγιστη (30 m/s) ταχύτητα αέρα, καθώς επίσης και συναρτήσει της ταχύτητας του αέρα για την ελάχιστη (2 cm) και μέγιστη (15 cm) εξωτερική διάμετρο του στρώματος του πάγου. Επίσης, για λόγους πληρότητας, παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μεταβολής της δύναμης τάνυσης του αγωγού σε συνάρτηση με την εξωτερική διάμετρο του στρώματος πάγου για όλες τις ταχύτητες αέρα, καθώς και σε συνάρτηση με την ταχύτητα αέρα για όλες τις τιμές της εξωτερικής διαμέτρου του στρώματος πάγου. Τα διαγράμματα που προέκυψαν παρατίθενται και σχολιάζονται ακολούθως.







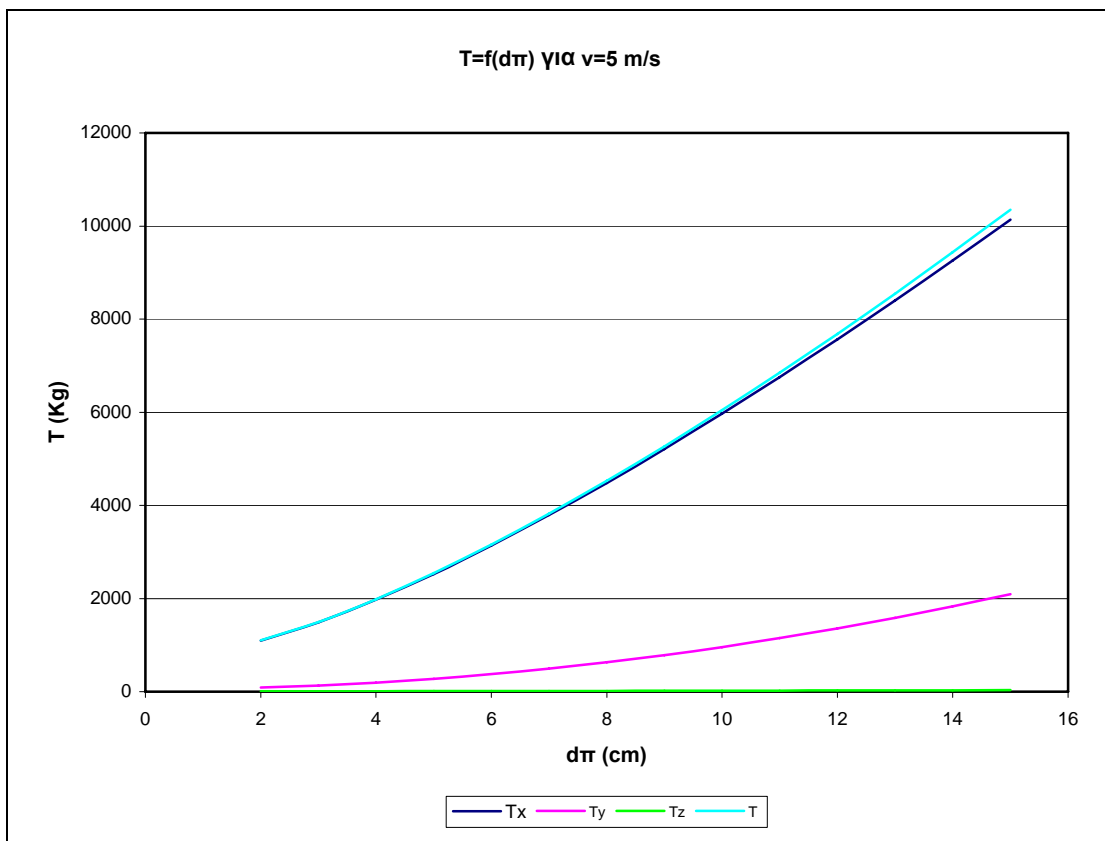


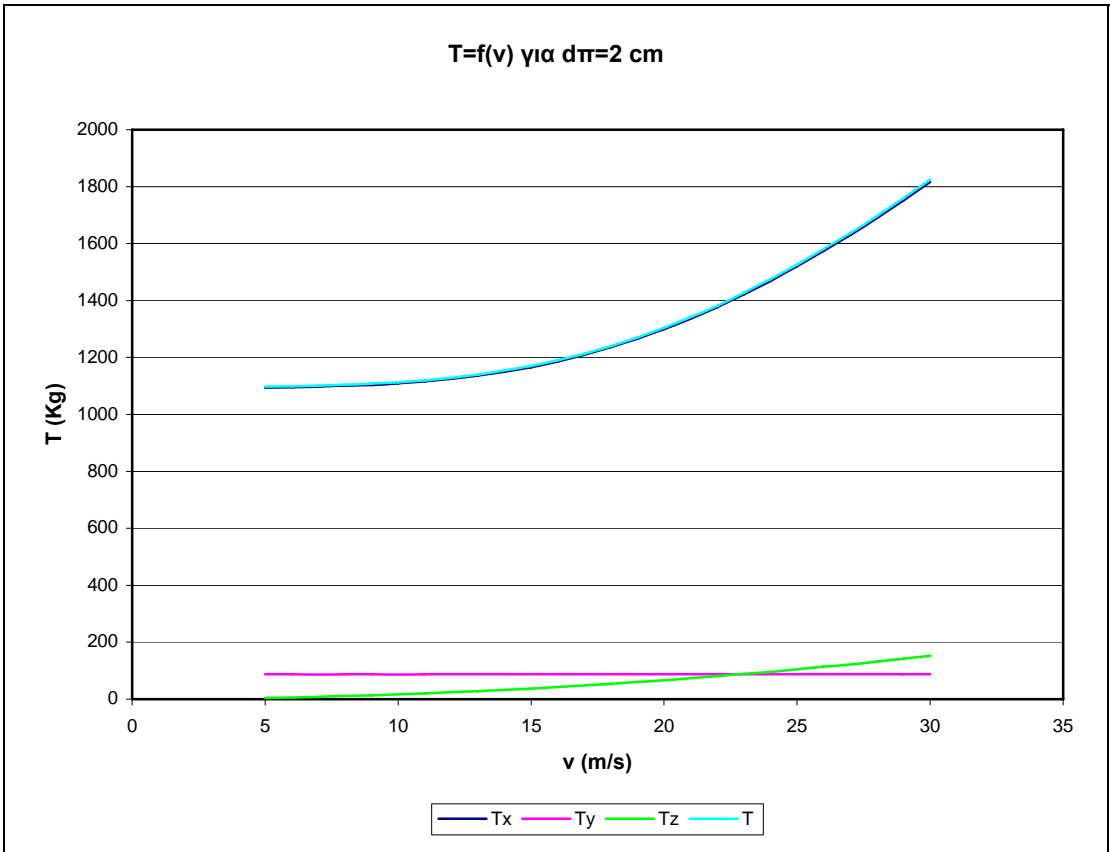
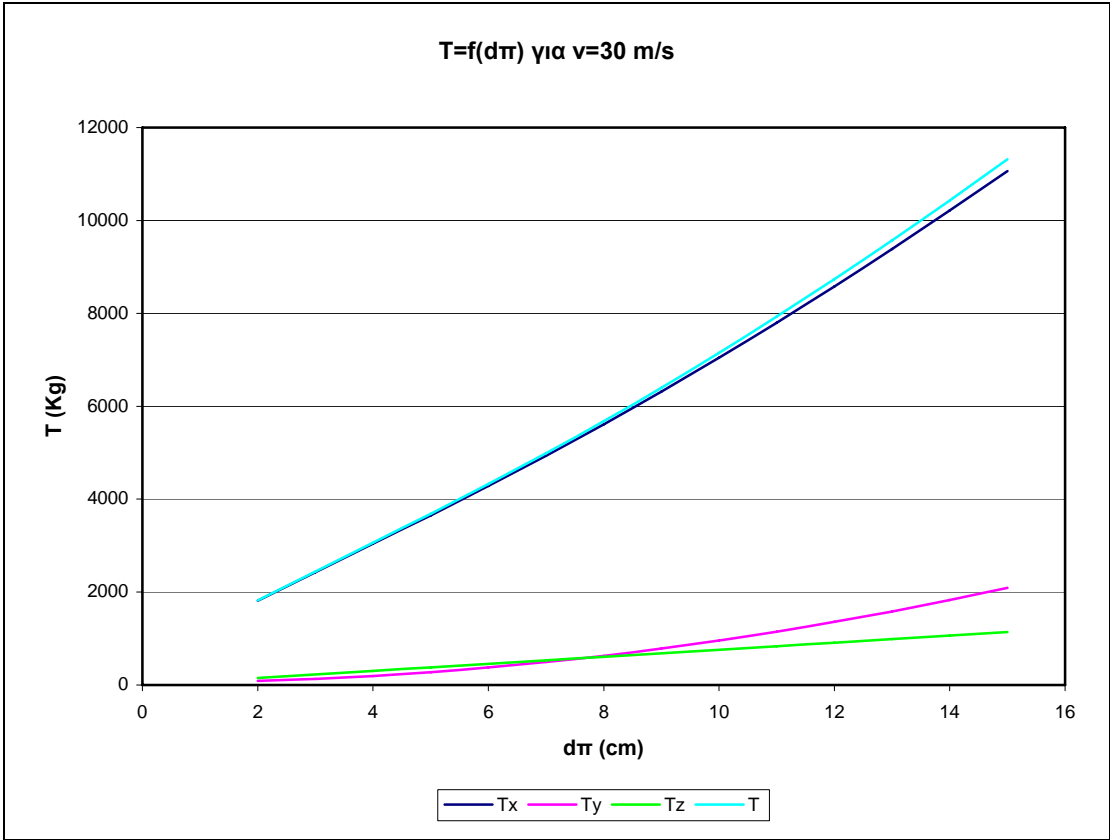


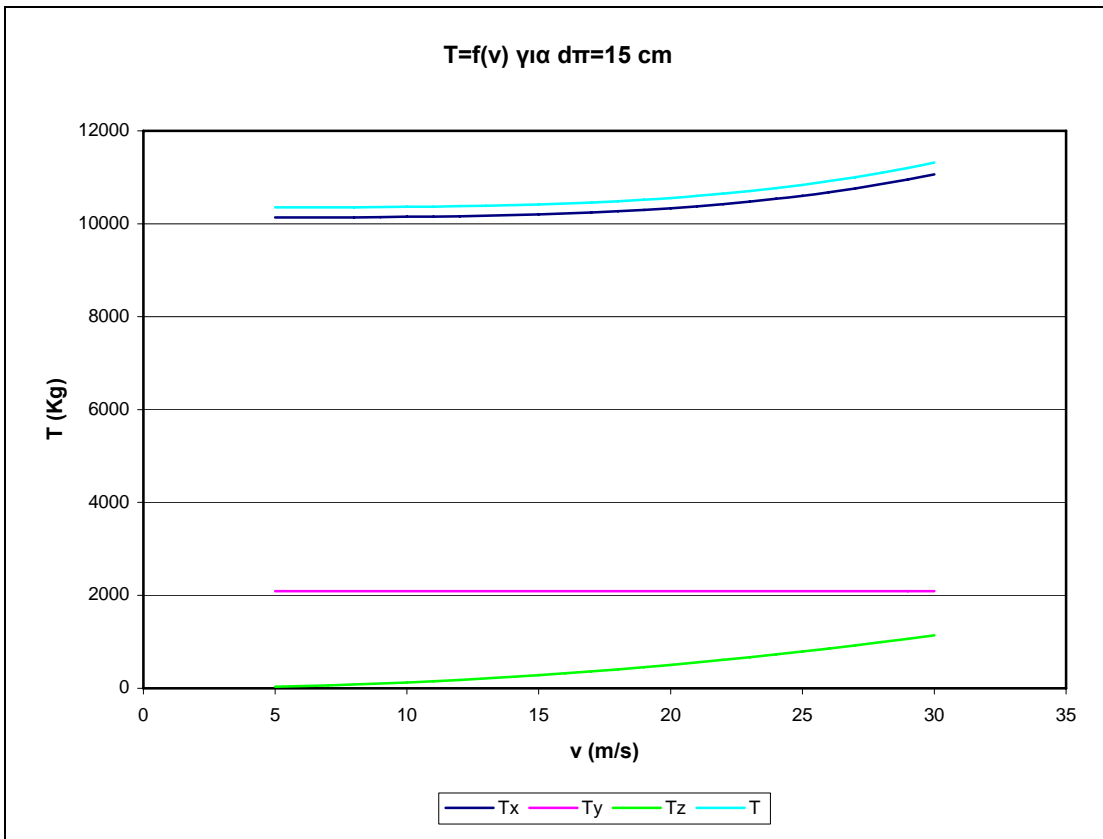
6.2 Διερεύνηση για μήκος ανοίγματος 250 m

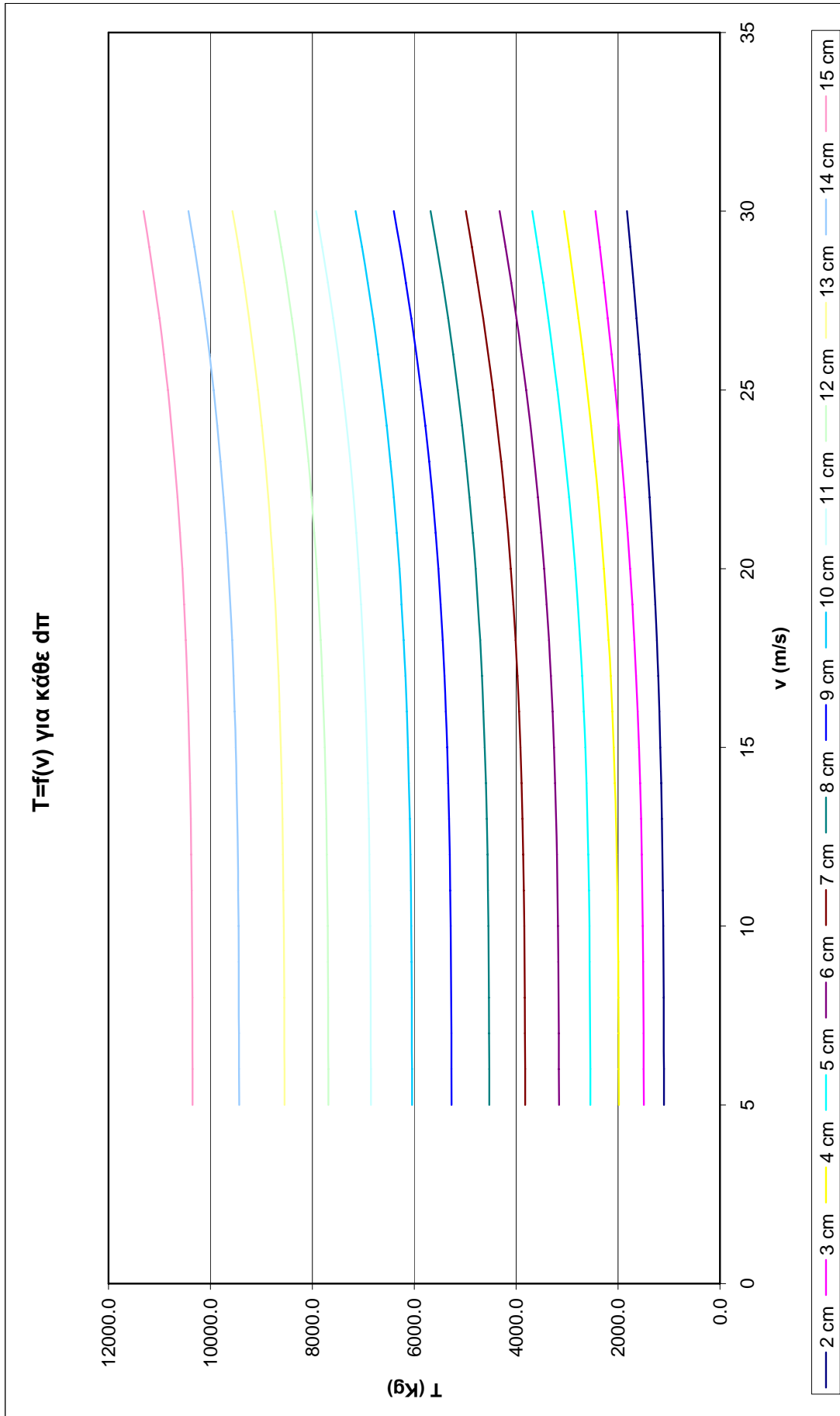
Ακολουθώς, παραθέτουμε για λόγους πληρότητας τα αντίστοιχα διαγράμματα, που προκύπτουν, όμως, για άνοιγμα των πυλώνων 250 m και ενδεικτική δύναμη τάνυσης των αγωγών κατά την τοποθέτησή τους 900 Kg, θέλοντας μ' αυτό τον τρόπο να δείξουμε πώς μεταβάλλονται στην περίπτωση αυτή οι δυνάμεις τάνυσης των αγωγών υπό την επίδραση των ιδίων συνδυασμών των φορτίων του αέρα και του πάγου.

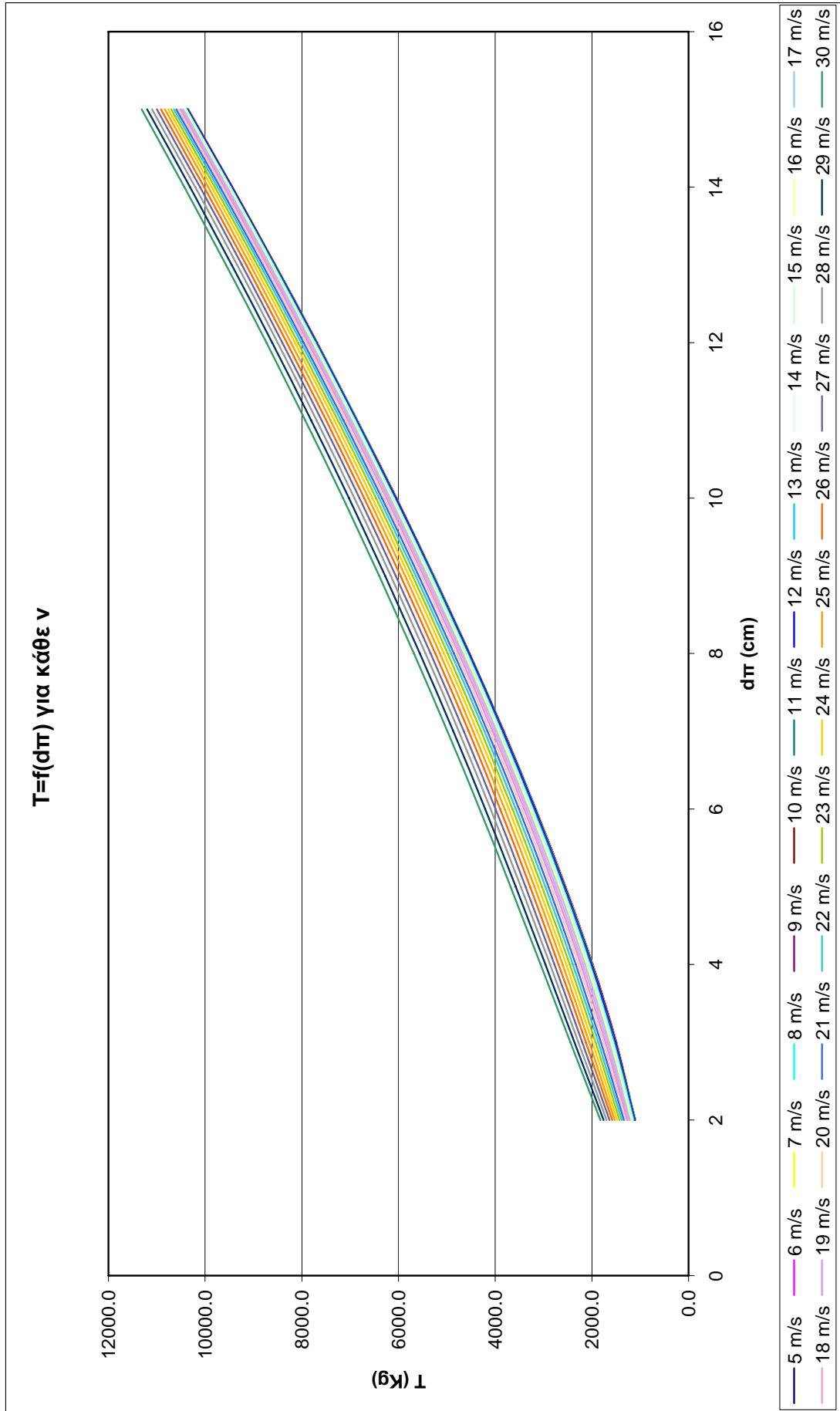
Σημειώνεται ότι τα κάτωθι διαγράμματα προέκυψαν έχοντας εφαρμόσει όλη την προηγούμενη διαδικασία και κάνει τους απαραίτητους υπολογισμούς, καθώς επίσης και ότι για το μήκος του αγωγού πριν αναρτηθεί και τανυστεί, με βάση τους υπολογισμούς της παραγράφου 5.3, ισχύει ότι $s_{0\alpha} = 250,204 \text{ m}$.











6.3 Γενικά συμπεράσματα

Έπειτα από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε για τους διάφορους συνδυασμούς των φορτίων του πάγου και του αέρα και τη γραφική απεικόνιση αυτής, τόσο για άνοιγμα πυλώνων 350 m όσο και για άνοιγμα 250 m, καταλήγουμε αφηρητικά στο, προφανές από το προηγούμενο κεφάλαιο, συμπέρασμα ότι ο συνδυασμός των μέγιστων ληφθέντων φορτίων πάγου και αέρα οδηγεί σε δυνάμεις τάνυσης του αγωγού μεγαλύτερες από το όριο θραύσης αυτού, καθώς επίσης και σε φόρτιση του πυλώνα στο σημείο στήριξης πολύ μεγαλύτερη από αυτή που δύναται να αντέξει. Συνεπώς στην περίπτωση αυτή οδηγούμαστε σε θραύση του αγωγού και κατάρρευση του πυλώνα.

Πιο συγκεκριμένα, είναι εμφανές από τα παραπάνω αποτελέσματα και διαγράμματα ότι ο παράγοντας που έχει μεγαλύτερη σημασία και οδηγεί σε σημαντικότερα φορτία είναι ο πάγος με τον οποίο επικαλύπτονται οι αγωγοί. Έτσι, παρατηρούμε ότι η επίδραση των φορτίων του αέρα για δεδομένη εξωτερική διάμετρο του στρώματος πάγου αυξάνει μεν τη δύναμη τάνυσης του αγωγού αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό. Μάλιστα, η αύξηση αυτή δείχνει αμελητέα για μεγάλα φορτία πάγου, ενώ γίνεται περισσότερο αισθητή για επικάλυψη των αγωγών με στρώματα πάγου μικρής εξωτερικής διαμέτρου. Απεναντίας, μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει πως η δύναμη τάνυσης του αγωγού αυξάνεται σημαντικά για κάθε επιπρόσθετο φορτίο πάγου, καθιστώντας την ταχύτητα του αέρα παράγοντα που απλώς επιδεινώνει την ήδη διαμορφωμένη κατάσταση φόρτισης.

Με βάση τις δεδομένες τιμές των ορίων θραύσης του αγωγού και των μέγιστων φορτίων που μπορεί να αντέξει ο πυλώνας στο σημείο στήριξης και σε συνδυασμό με μια πιο λεπτομερή παρατήρηση των πινάκων και των διαγραμμάτων, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η ομαλή λειτουργία της συγκεκριμένης εναέριας γραμμής μεταφοράς διασφαλίζεται για το συνδυασμό πολύ χαμηλών τιμών εξωτερικής διαμέτρου του στρώματος πάγου και ταχύτητας αέρα σε σχέση με αυτές που ελήφθησαν κατά το προηγούμενο κεφάλαιο. Ειδικότερα, σύμφωνα πάντα με τα αποτελέσματα της διερεύνησης, επισημαίνουμε τα ακόλουθα :

- Άνοιγμα πυλώνων 350 m

Για ταχύτητες του αέρα από 5 m/s έως 14 m/s η μέγιστη ανεκτή τιμή της εξωτερικής διαμέτρου του στρώματος πάγου, έτσι ώστε να μην οδηγηθεί σε κατάρρευση ο πυλώνας, είναι μεταξύ 5 cm και 6 cm, ενώ για ταχύτητες αέρα από 15 m/s έως 25 m/s η αντίστοιχη τιμή είναι μεταξύ 4 cm και 5 cm. Για πολύ μεγάλες ταχύτητες αέρα, δηλαδή πάνω από 25 m/s, στρώμα πάγου εξωτερικής διαμέτρου μεταξύ 3 cm και 4 cm αποτελεί το μέγιστο όριο για τη διασφάλιση της μηχανικής αντοχής των πυλώνων.

- Άνοιγμα πυλώνων 250 m

Για ταχύτητες του αέρα από 5 m/s έως 17 m/s η μέγιστη ανεκτή τιμή της εξωτερικής διαμέτρου του στρώματος πάγου, έτσι ώστε να μην οδηγηθεί σε κατάρρευση ο πυλώνας, είναι μεταξύ 6 cm και 7 cm, ενώ για ταχύτητες αέρα από 15 m/s έως 26 m/s η αντίστοιχη τιμή είναι μεταξύ 5 cm και 6 cm. Για ταχύτητες αέρα από 27 m/s και πάνω, στρώμα πάγου εξωτερικής διαμέτρου μεταξύ 4 cm και 5 cm αποτελεί το μέγιστο όριο για τη διασφάλιση της μηχανικής αντοχής των πυλώνων.

Σημειώνεται ότι για τις προαναφερθείσες φορτίσεις οι προκύπτουσες δυνάμεις τάνυσης δεν οδηγούν σε θραύση των αγωγών, εφόσον δεν ξεπερνούν το όριο θραύσης αυτών.

Συνεπώς, μπορούμε πλέον με κάθε βεβαιότητα να υποστηρίξουμε ότι ο συνδυασμός της ταχύτητας του αέρα (25 m/s) και του στρώματος του πάγου (15 cm) που οδήγησαν στη θραύση των αγωγών και την κατάρρευση των πυλώνων, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελεί καιρικό φαινόμενο εξαιρετικά ακραίο και εύλογα είχε τα καταστροφικά αυτά αποτελέσματα, μιας και οι πυλώνες, καθώς και οι αγωγοί, είχαν σχεδιαστεί, με βάση και το δεδομένο άνοιγμα, να αντέχουν πολύ μικρότερες καταπονήσεις, όπως δείχθηκε παραπάνω.

Παρ' όλα αυτά, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση για διαφορετικό άνοιγμα των πυλώνων, πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η μείωση αυτή της απόστασης μεταξύ των πυλώνων αυξάνει τα μέγιστα όρια φόρτισης που μπορούν αυτοί να αντέξουν, χωρίς να οδηγηθούν σε κατάρρευση. Βέβαια, η αύξηση αυτή δεν είναι ικανή να προστατέψει τη γραμμή μεταφοράς από ένα τέτοιο καιρικό φαινόμενο. Μπορεί να συμβάλει, όμως, στην πιο αξιόπιστη σχεδίαση αυτής,

σε συνδυασμό και με τη γενικότερη ενίσχυση της μηχανικής αντοχής πυλώνων και αγωγών. Άλλωστε, όπως ήδη αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η σπανιότητα τέτοιων καιρικών φαινομένων στη χώρα μας αποτελεί τροχοπέδη για τη δημιουργία γραμμών εξαιρετικά υψηλής μηχανικής αντοχής, ικανών να αντέξουν τόσο μεγάλες φορτίσεις, λόγω του τεράστιου κόστους μιας τέτοιας επένδυσης, αναλογικά πάντα με τα οφέλη αυτής.



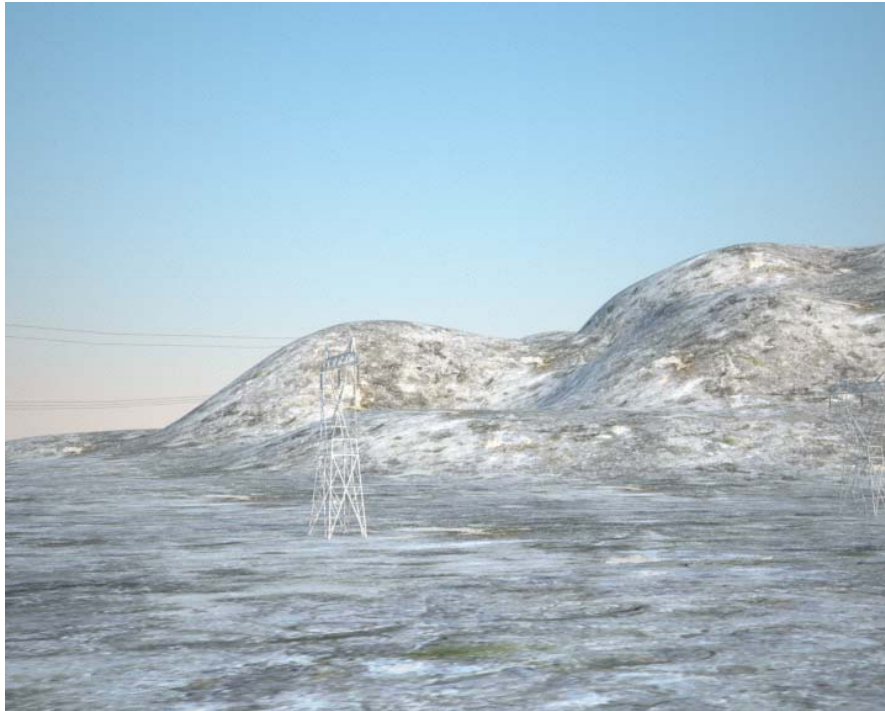
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ - ANIMATION ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΠΥΛΩΝΑ

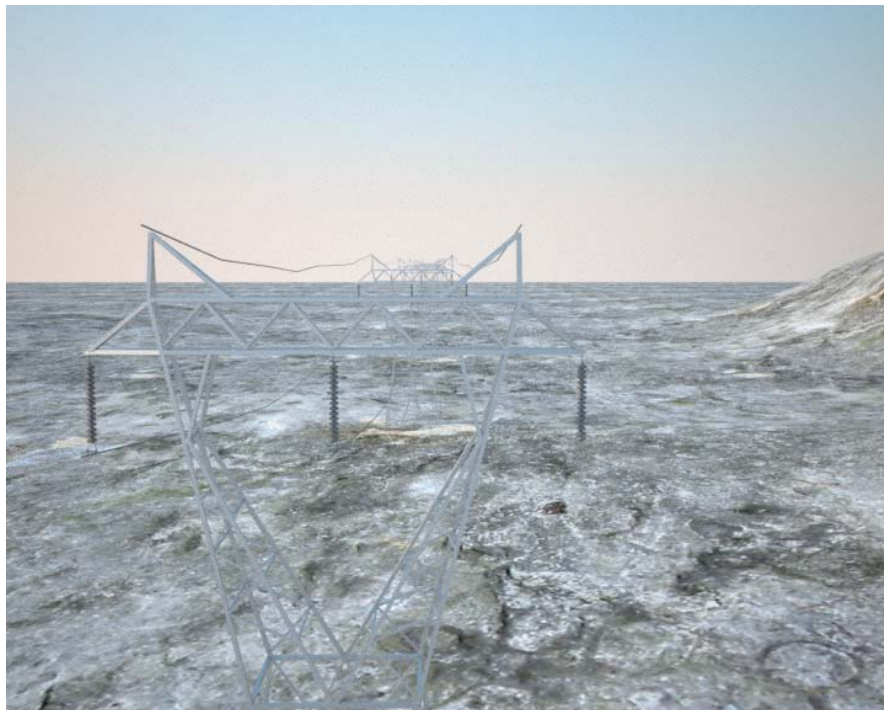
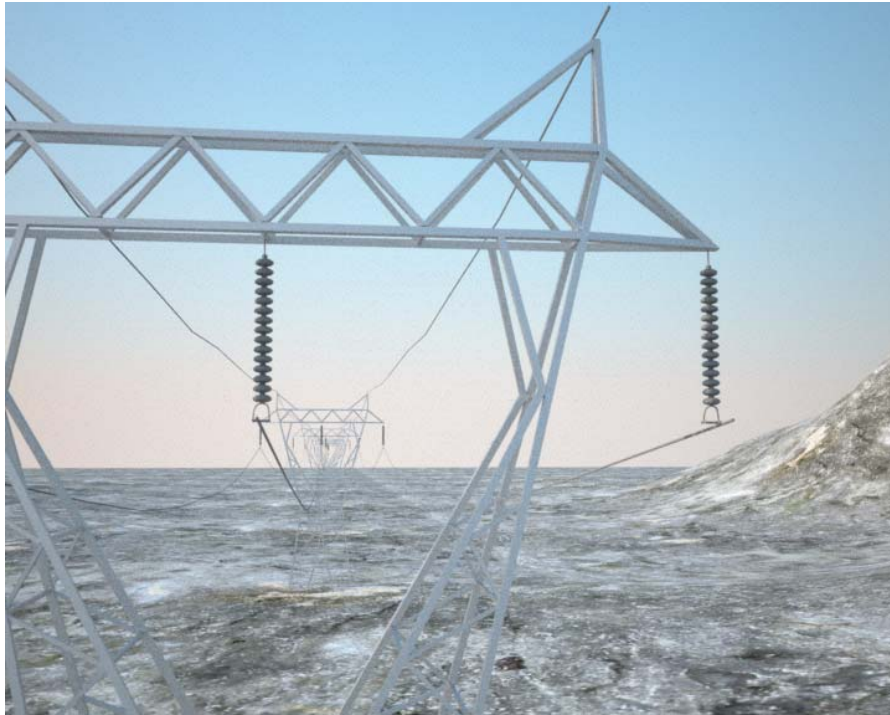
Σε συνδυασμό με την υπόλοιπη εργασία, παρατίθεται σε ψηφιακή μορφή το animation προσομοίωσης της κατάρρευσης πυλώνα υπό συνθήκες ακραίου φορτίου πάγου και αέρα. Η γραφική αυτή προσομοίωση αποσκοπεί στην όσο το δυνατόν πιστότερη αναπαράσταση ενός τέτοιου γεγονότος. Στα πλαίσια αυτά, παρουσιάζονται ακολούθως ενδεικτικά κάποιες εικόνες από την προσομοίωση αυτή. Σημειώνεται ότι η πτώση χιονιού και ο ισχυρός άνεμος είναι φαινόμενα δυναμικά κατά τη δημιουργία του animation και, επομένως, δεν είναι δυνατό να παρασταθούν στις παρακάτω στατικές εικόνες, παρά μόνο στο animation αυτό καθεαυτό. Χρήζει, επίσης, αναφοράς το γεγονός ότι στην ψηφιακή μορφή της εργασίας συμπεριλαμβάνεται και ο κατάλληλος αποκωδικοποιητής (codec) για την αναπαραγωγή του animation.

Αρχική κατάσταση εναέριας γραμμής μεταφοράς

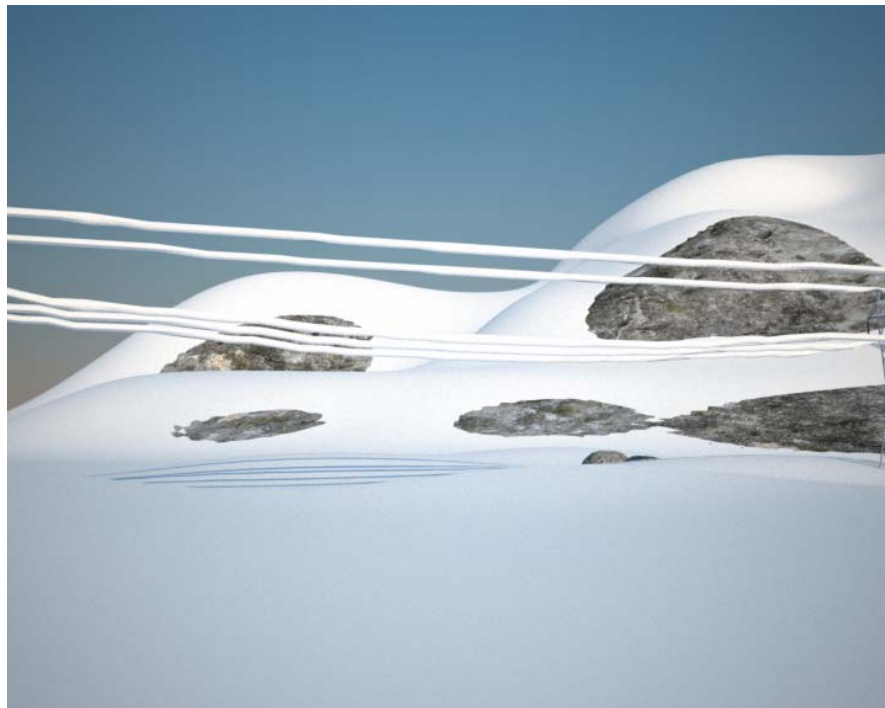


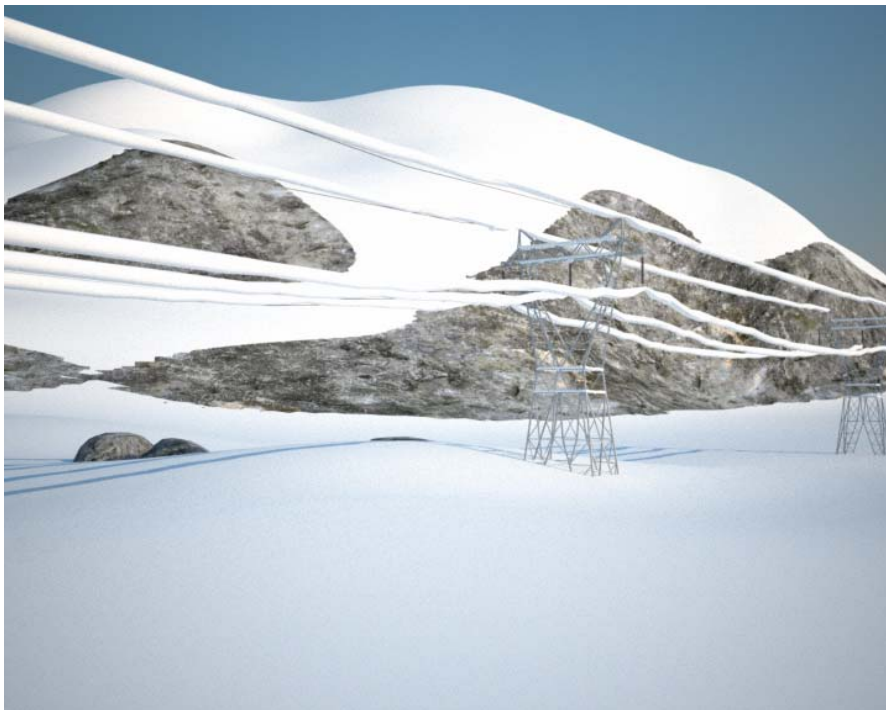
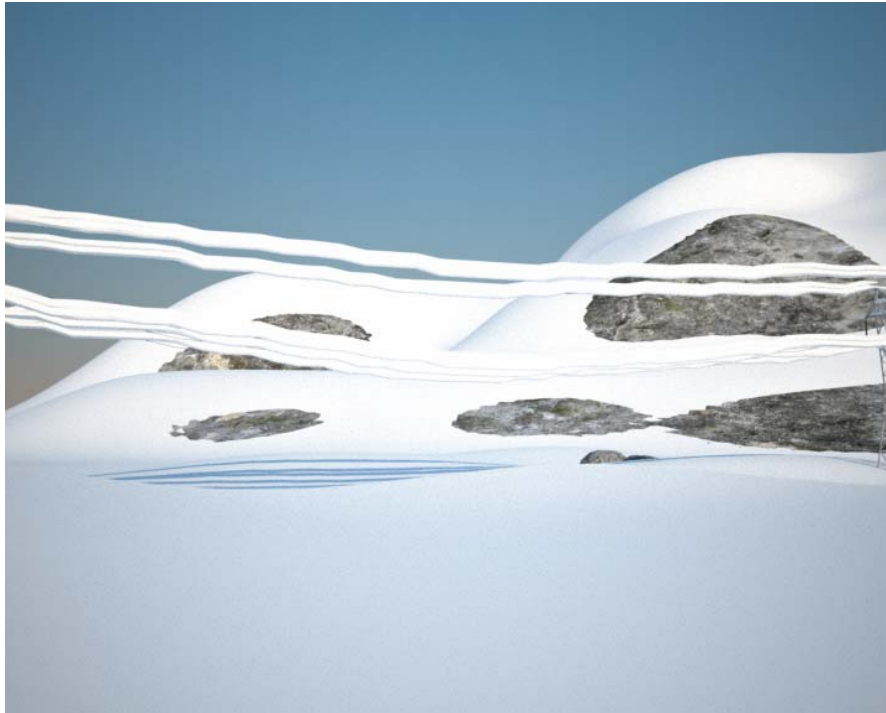






Κατάρρευση πυλώνα υπό ακραίο φορτίο πάγου και ισχυρή ανεμοπίεση













ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παράρτημα που ακολουθεί παρατίθενται εν συντομία οι προδιαγραφές ως προς τις συνθήκες φόρτισης των αγωγών και των πυλώνων, οι οποίοι ελήφθησαν υπ' όψιν για τη διεξαγωγή της μελέτης.

ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Υπάρχουν τέσσερις τύποι πύργων για κάθε μία από τις τρεις κατηγορίες γραμμών.

<u>Κατηγορία</u>	E	B	2B
<u>Τύπος πύργου</u>	Απλό κύκλωμα ελαφρού τύπου	Απλό κύκλωμα βαρέος τύπου	Διπλό κύκλωμα βαρέος τύπου
Ευθυγραμμίας	S2	S3	S4
μικρής γωνίας	R2	R3	R4
γωνίας 45°	T2	T3	T4
γωνίας 75° ή τέρματος	Z2	Z3	Z4

Τα γενικά χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς για την κατηγορία που μας ενδιαφέρει εν προκειμένω (E) είναι:

	Απλό κύκλωμα (κατηγορίες E και B)
<u>Πολική τάση</u>	150 kV
<u>Κυκλώματα</u>	ένα τριφασικό
<u>Διάταξη κυκλωμάτων</u>	οριζόντια
<u>Αριθμός και διάταξη αγωγών προστασίας</u>	Δύο αγωγοί προστασίας πάνω από τους αγωγούς φάσεων και συμμετρικά τοποθετημένοι ως προς τον άξονα των πύργων

- Αγωγοί φάσεων : Αγωγός ACSR - LINNET 336.400 CM.
Εξωτερική διάμετρος 18,3 mm, μοναδιαίο βάρος 0,7
kg /m (χρησιμοποιείται στην απλή ελαφρά γραμμή κατηγορία
E).
- Αγωγοί προστασίας : Επτάκλωνος χαλύβδινος επιψευδαργυρωμένος.
Εξωτερική διάμετρος 9,5 mm, μοναδιαίο βάρος 0,44 kg/m.
- Μονωτήρες : Δισκοειδείς βήματος 5 3/4 in και διαμέτρου
10 in κανονικού τύπου ή τύπου ομίχλης, πορσελάνης ή
γυάλινοι.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Έχουμε τις ακόλουθες συνθήκες φόρτισης για τους πυλώνες υψηλής και υπερύψηλης τάσης, σύμφωνα πάντα με τις προδιαγραφές TR-8 για τους χαλύβδινους πύργους δικτυωτού τύπου.

Συνθήκες φόρτισης I:

1. Κατακόρυφα φορτία που προκύπτουν από τους αγωγούς και τους μονωτήρες.
2. Εγκάρσια φορτία που προκύπτουν από την εγκάρσια πίεση του ανέμου 45 kg/m^2 επί τον αγωγό και των μονωτήρων.
3. Εγκάρσια φορτία που προκύπτουν από την έλξη των αγωγών στην περίπτωση γωνιά γραμμής (μέγιστη τάνυση).
4. Εγκάρσια φορτία που προκύπτουν από την εγκάρσια πίεση του ανέμου 70 kg/m^2 επί της πραγματικής επιφανείας της μιας όψης του πύργου επαυξημένη κατά 50%.

Συνθήκες φόρτισης II:

1. Κατακόρυφα φορτία που προκύπτουν από το βάρος των αγωγών περιβεβλημένα από πάγο κυλινδρικού πάχους 6,50 mm και του βάρους των αλύσων μονωτήρων.
2. Εγκάρσια φορτία που προκύπτουν από την εγκάρσια πίεση του ανέμου 20 kg/m^2 επί των αγωγών περιβεβλημένα από πάγο κυλινδρικού πάχους 6,50 mm και του βάρους των αλύσων μονωτήρων.

3. Εγκάρσια φορτία που προκύπτουν από την έλξη των αγωγών στην περίπτωση γωνιά γραμμής (μέγιστη τάνυση).
4. Εγκάρσια φορτία που προκύπτουν από την εγκάρσια πίεση του ανέμου 70kg/m^2 επί της πραγματικής επιφανείας της μιας όψης του πύργου επαυξημένη κατά 50%.
5. Διαμήκη φορτία που προκύπτουν στην περίπτωση θραυσμένων ή τερματιζόμενων αγωγών .Ως διαμήκεις φορτίο θραυσμένου ή τερματιζόμενου αγωγού θα λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη τάνυση του αγωγού και όχι η προκύπτουσα, στην περίπτωση γωνιά γραμμής, διαμήκης συνιστώσα. Για τον υπολογισμό των μέγιστων δυνάμεων για τα μέλη του πύργου και τις θεμελιώσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι περιπτώσεις δυνατών συνδυασμών των θραυσμένων αγωγών.

Συντελεστές ασφάλειας:

Τα “ φορτία μελέτης Α” περιλαμβάνουν τους κάτωθι συντελεστές ασφαλείας :

▪ Κατακόρυφα φορτία	1,65
▪ Εγκάρσια φορτία λόγω ανέμου	2,55
▪ Εγκάρσια φορτία λόγω έλξεως των αγωγών	1,65
▪ Διαμήκη φορτία θραυσμένων αγωγών	1,30
▪ Διαμήκη φορτία τερματιζόμενων αγωγών	1,65

ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΓΩΝ

Τύπος S: Χρησιμοποιείται ,όπως αναφέραμε, ως πύργος ευθυγραμμίας :

Για κατακόρυφο άνοιγμα 650 m και οριζόντιο άνοιγμα 450 m. Εφαρμογή συνθήκης I, εφαρμογή συνθήκης II χωρίς θραυσμένο αγωγό και συνθήκη II με ένα θραυσμένο αγωγό υπό την μέγιστη τάνυση.

Τύπος R: Χρησιμοποιούμενος μόνο για μικρή γωνιά της γραμμής :

Για κατακόρυφο άνοιγμα 850 m με γωνιά γραμμής 120 και οριζόντιο άνοιγμα 350 m. Εφαρμογή συνθήκης I, συνθήκης II χωρίς θραυσμένο αγωγό και συνθήκη II με έναν θραυσμένο αγωγό υπό την μέγιστη τάνυση.

Τύπος T: Χρησιμοποιούμενος μόνο για γωνιά 450 της γραμμής :

Για κατακόρυφο άνοιγμα 1100 m με γωνιά 450 και οριζόντιο άνοιγμα 350 m. Εφαρμογή συνθήκης I, συνθήκης II χωρίς θραυσμένο αγωγό και συνθήκη II με δυο θραυσμένους αγωγούς υπό την μέγιστη τάνυση και από τις δύο πλευρές.

Τα ακρογεφύρια του εν λόγω πύργου είναι τριγωνικής μορφής και θα είναι εξοπλισμένα με θέση στηρίξεως και αντίστοιχη διχάλα για την ανάρτηση του γεφυρωτού που συνδέει τα δυο τέρματα του αγωγού φάσεως.

Τύπος Z: Χρησιμοποιούμενος μόνο για γωνιά 750 ή ως πύργος τέρματος της γραμμής :

1. Για κατακόρυφο άνοιγμα 850 m με γωνιά 750 και οριζόντιο άνοιγμα 350 m. Εφαρμογή συνθήκης I, συνθήκης II χωρίς θραυσμένο αγωγό και συνθήκης II με τρεις θραυσμένους αγωγούς υπό την μέγιστη τάνυση και από τις δύο πλευρές.
2. Ως πύργος τέρματος για κατακόρυφο άνοιγμα 850 m και οριζόντιο άνοιγμα 350 m. Εφαρμογή συνθήκης II. Άπαντες οι αγωγοί υπό την μέγιστη τάνυση αυτών θα τερματίζονται στον πύργο σε μια κατεύθυνση και υπό γωνιά 600 ως προς τον εγκάρσιο άξονα του πύργου.

Τα ακρογεφύρια του εν λόγω πύργου είναι ορθογώνιας μορφής και θα είναι εξοπλισμένα με θέση στηρίξεως και αντίστοιχη διχάλα για την ανάρτηση του γεφυρωτού που συνδέει τα δυο τέρματα του αγωγού φάσεως.

ΦΟΡΤΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ (kg)

Ακολουθούν πίνακες με τα φορτία μελέτης του κάθε τύπου πυλώνα.

ΠΥΡΓΟΣ ΤΥΠΟΥ S2

ΦΟΡΤΙΑ		Φορτία σε σημείο στηρίξεως ανά:			
		Αγωγοί φάσεως		Αγωγοί προστασίας	
		A	B	A	B
Συνθήκη I	(α) Εγκάρσια	955	415	700	300
	(β) Κατακόρυφα	1360	825	820	500
Συνθήκη II Αριθμός θραυσμέ- νων αγωγών : (0) ή (1)	(α) Εγκάρσια	730	340	500	235
	(β) Κατακόρυφα	1360	825	820	500
	(γ) Διαμήκη θραυσμένου αγωγού	3350	2575	2550	1950
	* (δ) Εγκάρσια θραυσμένου αγωγού	380	180	250	120
Συνθήκη Αριθμός τερματιζ- όντων αγωγών	(α) Εγκάρσια				
	(β) Κατακόρυφα				
	(γ) Διαμήκη τερματιζ. αγωγού				

Πρόσθετα εγκάρσια φορτία ανέμου επί πύργου.

Για οποιαδήποτε ανωτέρω συνθήκες	Φορτία σε σημείο στήριξης					Φορτία οριζόντιου πλαίσιου άνω σκελών πύργου κανονικού ύψους
	Αγωγών φάσεων				Αγωγών προστασίας	
	Οριζοντίου Διατάξεως	Άνω γέφυρα	Μεσαία γέφυρας	Κάτω γέφυρας		
A	250				65	1300
B	100				25	510

- A= Φορτία συμπεριλαμβανομένου και συντελεστές ασφαλείας .
- B= Φορτία μη συμπεριλαμβανομένου συντελεστές ασφαλείας.
- Ο όρος αγωγός αναφέρεται στον αγωγό φάσεως ή και τον αγωγό προστασίας .
- Τα ανώτερα φορτία δεν περιλαμβάνουν το βάρος του πύργου.
- *Στις θέσεις που λαμβάνονται φορτία διαμήκη σε θραυσμένο αγωγό θα λαμβάνονται αντί των εγκάρσιων φορτίων (α) τα εγκάρσια φορτία (δ).

ΠΥΡΓΟΣ ΤΥΠΟΥ R2

ΦΟΡΤΙΑ		Φορτία σε σημείο στηρίξεως ανά:			
		Αγωγοί φάσεως		Αγωγοί προστασίας	
		A	B	A	B
Συνθήκη I	(α) Εγκάρσια	1465	730	1060	520
	(β) Κατακόρυφα	1790	1085	1150	700
Συνθήκη II Αριθμός θραυσμέ νων αγωγών : (0) ή (1)	(α) Εγκάρσια	1465	765	1060	560
	(β) Κατακόρυφα	1790	1085	1150	700
	(γ) Διαμήκη θραυσμένου αγωγού	3350	2575	2550	1950
	* (δ) Εγκάρσια θραυσμένου αγωγού	750	390	530	280
Συνθήκη Αριθμός τερματιζ όντων αγωγών	(α) Εγκάρσια				
	(β) Κατακόρυφα				
	(γ) Διαμήκη τερματιζ. αγωγού				

Πρόσθετα εγκάρσια φορτία ανέμου επί πύργου.

Για οποιαδήποτε ανωτέρω συνθήκες	Φορτία σε σημείο στήριξης					Φορτία οριζόντιου πλαisiού άνω σκελών πύργου κανονικού ύψους
	Αγωγών φάσεων				Αγωγών προστασίας	
	Οριζοντίου Διατάξεως	Άνω γέφυρα	Μεσαία γέφυρας	Κάτω γέφυρας		
A	320				75	1500
B	125				30	590

- A= Φορτία συμπεριλαμβανομένου και συντελεστές ασφαλείας .
- B= Φορτία μη συμπεριλαμβανομένου συντελεστές ασφαλείας.
- Ο όρος αγωγός αναφέρεται στον αγωγό φάσεως ή και τον αγωγό προστασίας .
- Τα ανώτερα φορτία δεν περιλαμβάνουν το βάρος του πύργου.
- *Στις θέσεις που λαμβάνονται φορτία διαμήκη σε θραυσμένο αγωγό θα λαμβάνονται αντί των εγκάρσιων φορτίων (α) τα εγκάρσια φορτία (δ).

ΠΥΡΓΟΣ ΤΥΠΟΥ T2

ΦΟΡΤΙΑ		Φορτία σε σημείο στηρίξεως ανά:			
		Αγωγοί φάσεως		Αγωγοί προστασίας	
		A	B	A	B
Συνθήκη I	(α) Εγκάρσια	Άπαντα τα φορτία μικρότερα της συνθήκης II			
	(β) Κατακόρυφα				
Συνθήκη II Αριθμός θραυσμένων αγωγών : (0) ή (2)	(α) Εγκάρσια	3950	2255	2850	1645
	(β) Κατακόρυφα	2590	1595	1450	880
	(γ) Διαμήκη θραυσμένου αγωγού	33550	2575	2550	1950
	* (δ) Εγκάρσια θραυσμένου αγωγού	2050	1165	1425	825
Συνθήκη Αριθμός τερματιζόντων αγωγών	(α) Εγκάρσια				
	(β) Κατακόρυφα				
	(γ) Διαμήκη τερματιζ. αγωγού				

Πρόσθετα εγκάρσια φορτία ανέμου επί πύργου.

Για οποιαδήποτε ανωτέρω συνθήκες	Φορτία σε σημείο στήριξης					Φορτία οριζόντιου πλαισίου άνω σκελών πύργου κανονικού ύψους
	Αγωγών φάσεων				Αγωγών προστασίας	
	Οριζοντίου Διατάξεως	Άνω γέφυρα	Μεσαία γέφυρας	Κάτω γέφυρας		
A	440				125	1700
B	175				50	670

- A= Φορτία συμπεριλαμβανομένου και συντελεστές ασφαλείας .
- B= Φορτία μη συμπεριλαμβανομένου συντελεστές ασφαλείας.
- Ο όρος αγωγός αναφέρεται στον αγωγό φάσεως ή και τον αγωγό προστασίας .
- Τα ανώτερα φορτία δεν περιλαμβάνουν το βάρος του πύργου.
- *Στις θέσεις που λαμβάνονται φορτία διαμήκη σε θραυσμένο αγωγό θα λαμβάνονται αντί των εγκάρσιων φορτίων (α) τα εγκάρσια φορτία (δ).

ΠΥΡΓΟΣ ΤΥΠΟΥ Z2

ΦΟΡΤΙΑ		Φορτία σε σημείο στηρίξεως ανά:			
		Αγωγοί φάσεως		Αγωγοί προστασίας	
		A	B	A	B
Συνθήκη I	(α) Εγκάρσια	Άπαντα τα φορτία μικρότερα της συνθήκης II			
	(β) Κατακόρυφα				
Συνθήκη II Αριθμός θραυσμένων αγωγών : (0) ή (3)	(α) Εγκάρσια	5870	3420	4300	2550
	(β) Κατακόρυφα	2215	1340	1150	700
	(γ) Διαμήκη θραυσμένου αγωγού	3350	2575	2550	1950
	* (δ) Εγκάρσια θραυσμένου αγωγού	3010	1745	2150	1265
Συνθήκη Αριθμός τερματιζόντων αγωγών (5)	(α) Εγκάρσια	2820	1570	2000	1130
	(β) Κατακόρυφα	2215	1340	1150	700
	(γ) Διαμήκη τερματιζ. αγωγού	4250	2575	3220	1950

Πρόσθετα εγκάρσια φορτία ανέμου επί πύργου.

Για οποιασδήποτε ανωτέρω συνθήκες	Φορτία σε σημείο στήριξης					Φορτία οριζόντιου πλαισίου άνω σκελών πύργου κανονικού ύψους
	Αγωγών φάσεων				Αγωγών προστασίας	
	Οριζοντίου Διατάξεως	Ανω γέφυρα	Μεσαία γέφυρας	Κάτω γέφυρας		
A	480				140	1900
B	190				55	745

- A= Φορτία συμπεριλαμβανομένου και συντελεστές ασφαλείας .
- B= Φορτία μη συμπεριλαμβανομένου συντελεστές ασφαλείας.
- Ο όρος αγωγός αναφέρεται στον αγωγό φάσεως ή και τον αγωγό προστασίας .
- Τα ανώτερα φορτία δεν περιλαμβάνουν το βάρος του πύργου.
- *Στις θέσεις που λαμβάνονται φορτία διαμήκη σε θραυσμένο αγωγό θα λαμβάνονται αντί των εγκάρσιων φορτίων (α) τα εγκάρσια φορτία (δ).

Τέλος, συνάπτονται οι ακόλουθοι πίνακες :

1. Πίνακας κατασκευαστικών σχεδίων απλού και διπλού κυκλώματος (ΤΜΕΓΜ 682Γ)
2. Πίνακας μοναδιαίων βαρών τμημάτων πύργων (ΤΜΓΜ 681 Δ)
3. Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών αγωγών ACSR και AACSR (ALMELEC) των γραμμών μεταφοράς

ΔΕΗ Α.Ε. / ΔΝΕΜΙ / ΤΟΜΕΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΣΧΕΔΙΩΝ ΠΥΡΓΩΝ 150 KV														
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΓΡΑΜΜΗΣ	ΕΛΑΦΡΑ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ					ΒΑΡΙΑ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ					ΒΑΡΙΑ ΔΙΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ			
	S2	R2	T2	Z2	S3	R3	T3	Z3	S4	R4	T4	Z4		
ΤΥΠΟΣ ΠΥΡΓΟΥ	25124												25124	
Γενικός αριθμός σχεδίου	25263												25124	
Άνω τμήμα κορμού	119 g	124h	129h	133j	169d	174d	179d	183	19d	24d	29c	33c		
Άνω τμήμα κορμού			129/b	133/a			179/f	183/e						
Κάτω τμήμα κορμού	120 g	125d	130c	134b	170c	175b	180a	184b	20c	25d	30d	34d		
Σκέλη κασωνικού Πύργου	121 g	126e	131c	135g	171d	176e	181b	185c	21d	26d	31h	35h		
Σκέλη επιηκυσσόμενου Πύργου	122 e	127d	132d	136e	172d	177d	182c	186c	22d	27c	32g	36g		
Σκέλη +4,5 επιμήνου Πύργου ΤΜΕΓΜ	1346/1	1346/2	1346/3	1346/4	1347/1	1347/2	1347/3	1347/4	1348/1	1348/2	1348/3	1348/4		
Κομμάτια καν. & επιμ. Πύργου ΤΜΕΓΜ					1345/1	1345/2	1345/3	1345/4	1342/1	1342/2	1342/3	1342/4		
Ανάρτηση Αγωγού Φάσεως	137b	138c			187	188/			37	38/				
Ανάρτηση Αγωγού Προστασίας	139b	139b			189	189			39a	39a				
Πρόσδεση τέρματος Αγωγών			140	140			190	190			40a	40a		
Ανάρτηση Γεφρωτού			141	141			191	191			41	41		
Αντίαναρρητικό Πλέγμα	142	142	142	142	192	192	192	192	42b	42b	42b	42b		
Ράβδος Γείωσης			143	143			193	193			43	43		
Πινακίδα Κινδύνου	144	144	144	144	194	194	194	194	44b	44b	44b	44b		
Σύνολο Σχεδίων	30					34					32			

ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΣΧΕΔΙΩΝ ΠΥΡΓΩΝ 2, 3 ΚΑΙ 4 [ΤΜΕΓΜ 682 Γ]

ΔΕΗ Α.Ε. / ΔΝΕΜ / ΤΟΜΕΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΑΡΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΠΥΡΓΩΝ 150 KV														
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΓΡΑΜΜΗΣ	ΕΛΑΦΡΑ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ					ΒΑΡΙΑ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ					ΒΑΡΙΑ ΔΙΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ			
	S2	R2	T2	Z2	S3	R3	T3	Z3	S4	R4	T4	Z4		
ΤΥΠΟΣ ΠΥΡΓΟΥ														
Κορμός με εξαρτήματα	2277	2755	3590	4643	2675	3130	4036	5260	3234	4095	5257	7030		
Πλάισιο κορμού	127	127	144	183	143	143	187	220	247	300	285	407		
Σκέλος -1,5 Κανονικού πύργου	42	47	108	110	60	69	85	112	92	119	153	218		
Σκέλος -1,0 Κανονικού πύργου	48	53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Σκέλος N Κανονικού πύργου	66	72	146	178	93	110	126	175	144	188	229	308		
Σκέλος +1,5 Κανονικού πύργου	116	126	211	241	145	159	194	243	205	251	307	399		
Σκέλος +3,0 Κανονικού πύργου	148	172	275	319	192	210	256	315	264	320	394	502		
Επιμήκυνση κορμού +4,5 με οριζ. Πλάισιο	610	654	1096	1222	797	900	1283	1462	972	1202	1613	2270		
Σκέλος -1,5 Επιμήκυνσιμένου πύργου	48	53	114	103	78	85	97	123	115	140	172	239		
Σκέλος -1,0 Επιμήκυνσιμένου πύργου	53	59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Σκέλος N Επιμήκυνσιμένου πύργου	73	81	142	169	106	117	152	186	168	209	248	341		
Σκέλος +1,5 Επιμήκυνσιμένου πύργου	127	135	201	236	155	169	217	258	224	279	315	442		
Σκέλος +3,0 Επιμήκυνσιμένου πύργου	164	179	267	317	212	230	287	345	287	346	406	556		
Σκέλος +4,5 Επιμήκυνσιμένου πύργου	236	247	340	421	266	294	376	444	370	451	534	692		
Σκέλος +6,0 Επιμήκυνσιμένου πύργου	274	291	400	501	324	351	455	533	415	526	643	823		
Επιμήκυνση για θεμελίωση PAD (P)	19	27	51	77	25	36	63	105	44	70	102	158		
Επιμήκυνση για θεμελίωση Auger (A1)	10	13	23	38	13	14	28	54	22	30	52	79		
Επιμήκυνση για θεμελίωση Auger (A2)	13	17	30	52	17	20	36	71	28	39	71	104		
Επιμήκυνση για θεμελίωση Auger (A3)	17	22	37	67	22	26	44	88	34	47	89	129		
Επιμήκυνση για θεμελίωση Auger (A4)	20	26	44	—	26	32	52	—	39	56	—	—		
Επιμήκυνση για θεμελίωση Auger (A5)	24	30	—	—	30	38	59	—	45	65	—	—		

Προδιαγραφή TR-2

III-4.1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΓΩΓΩΝ ACSR ΚΑΙ AACSR (ALMELEC) ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ									
ΕΙΔΟΣ ΑΓΩΓΟΥ		ACSR							
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ Γ.Μ		66/150 KV		150 KV		400 KV		66/150 KV	
ΚΩΔΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΑΓΩΓΟΥ		LINNET	LINNET ALUMOWED	GROSEBK	GROSEBK ALUMOWED	GARDINAL	LINNET	LINNET	GROSEBK
ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΑΓΩΓΟΥ	[mm]	18,31	18,31	25,15	25,15	30,42	18,31	18,31	25,15
ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΓΩΓΟΥ	[mm ²]	198,19	198,19	374,77	374,77	546,06	198,19	198,19	374,77
ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	[CM] [mm ²]	336,400	336,400	636,000	636,000	954,000	336,400	336,400	636,000
		170,45	170,45	322,26	322,26	483,42	170,45	170,45	322,26
ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΧΑΛΚΟΥ	[mm ²]	107,48	107,48	199,40	199,40	296,00	107,48	107,48	199,40
ΣΥΡΜΑΤΙΔΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ [ΑΝΤΟΧΗ 15Kg/mm ²]		26	26	26	26	54	-	-	-
ΣΥΡΜΑΤΙΔΙΑ ALMELEC [ΑΝΤΟΧΗ 15Kg/mm ²]		-	-	-	-	-	26	26	26
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΥΡΜΑΤΙΔΙΩΝ [mm]		2,89	2,89	3,97	3,97	3,38	2,89	2,89	3,97
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΧΑΛΥΒΑ [mm]		6,75	6,75	9,27	9,27	10,13	6,75	6,75	9,27
ΔΙΑΤΟΜΗ ΧΑΛΥΒΑ [mm ²]		27,74	27,74	52,51	52,51	62,64	27,74	27,74	52,51
ΣΥΡΜΑΤΙΔΙΑ ΧΑΛΥΒΑ (N=117,6 Kg/mm ² , R=156,8 Kg/mm ²)		7/N	7	7/N	7	7/N	7/R	7/R	7/R
ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΣΥΡΜΑΤΙΔΙΩΝ		Zn	Al	Zn	Al	Zn	Zn	Zn	Zn
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΥΡΜΑΤΙΔΙΩΝ [mm]		2,25	2,25	3,09	3,09	3,38	2,25	2,25	3,09
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ ΘΡΑΥΣΗΣ [Kg]		6,050	6,480	10,315	11,900	15,550	6,200	6,200	17,070
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΒΑΡΟΣ [Kg/km]		700	660	1,300	1,240	1,840	700	700	1,300
ΒΑΡΟΣ ΔΙΠΛΑΝΤΙΚΟΥ [Kg/km]		-	7,7-14,3	-	14-26	-	-	-	-
ΑΥΤΟΤΕΛΕΣ ΜΗΚΟΣ ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ [m]		1,500	1,500	1,200	1,200	2,600	1,500	1,500	1,200
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ DC ΣΤΟΥΣ 20 °C [Ω/km]		0,16400	0,16400	0,08640	0,08640	0,05988	0,16400	0,16400	0,08640
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΡΕΥΜΑ I _{nc} (Δθ=40°C & T _{περ} =40°C) [A]		346	346	539	539	713	346	346	539
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΡΕΥΜΑ I _{pc} (Δθ=40°C & T _{περ} =40°C, v=0,61m/s)		483	483	735	735	959	483	483	735
ΜΕΓ. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΥΝΕΧ. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ [°C]		80	80	80	80	80	80	80	80
ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ΛΕΗ: TR-2									
ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣΤΕΣ ΠΡΟΜΗΘΕΥΤΕΣ ΔΕΗ: ΕΛΩΣ, FULGOR, ΒΙΟΧΑΛΚΟ, USSR.									
ΔΗΜΟΣΙΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ Α.Ε.									

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. F. Kiessling, P. Nefzger, J. F. Nolasco, U. Kaintzyk, “Overhead Power Lines”, Springer, 2002
- [2]. Βασίλειος Κ. Παπαδιάς, “Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας”, Συμμετρία, Αθήνα 1999
- [3]. Πέτρος Κατωπόδης, “Μηχανική και διηλεκτρική αντοχή των πυλώνων υψηλής τάσης”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2006
- [4]. Richard C. Dorf, “The electrical engineering handbook”, CRC Press, 2000
- [5]. Ιωάννης Α. Σταθόπουλος, “Υψηλές τάσεις Ι”, Συμμετρία
- [6]. Φίλιππος Ι. Δημόπουλος, Παναγιώτης Τσαραμιάδης, “Δίκτυα σταθμοί : παραγωγή, μεταφορά, διανομή ηλεκτρικής ενέργειας”, Εκδόσεις Ήβος
- [7]. F. Magidin, “Construction of power transmission lines and substations”, MIR Publishers, Μόσχα 1986
- [8]. H. M. Ryan, “High voltage engineering and testing”, Peter Peregrinus, Stevenage 1994
- [9]. Σ. Τσαγκάρης, “Μηχανική των ρευστών”, Συμμετρία, Αθήνα 1995
- [10]. Εμμανουήλ Ε. Γδούτος, “Θεωρία ελαστικότητας”, Αδελφοί Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη 1999
- [11]. Βασίλειος Κ. Παπαδιάς, “Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας – Τόμος Ι Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας”, Αθήνα 1993
- [12]. Κανονισμοί της Δ.Ε.Η. , προδιαγραφή TR-8 και TR-2 σχετικά με τους πυλώνες υψηλής τάσης και τους αγωγούς, Αθήνα 1965