



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

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ν. ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων : Παναγιώτης Τσαραμπάρης

Λέκτορας Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2011





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

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ν. ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΣ

**Επιβλέπων :** Παναγιώτης Τσαραμπάρης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16<sup>η</sup> Μαΐου 2011.

.....  
Παναγιώτης Τσαραμπάρης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....  
Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Μάιος 2011

.....

Κωνσταντίνος Νικ. Ηλιόπουλος

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

Copyright © Κωνσταντίνος Ηλιόπουλος, 2011.

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.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον υπεύθυνο για την εκπόνηση της διπλωματικής, τον Λέκτορα κ. Τσαραμπάρη, για την ανάθεση αυτής και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την περάτωσή της. Θέλω επίσης να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς και τα αδέρφια μου για την διαρκή τους στήριξη και την αμέριστη συμπαράστασή, που επέτρεψε την επιτυχή διεκπεραίωση των σπουδών μου.



1.4.4.2 Επιπρόσθετα στοιχεία της εγκατάστασης των συστημάτων E.T.H.....	28
1.4.4.2-1 Καθορισμός σημείων σύνδεσης.....	28
1.4.4.2-2 Παράλληλη εγκατάσταση στους σωλήνες.....	28
1.4.4.2-3 Διαφορετικές διαμέτροι σωλήνων και διαχωρισμός σε διαφορετικά κυκλώματα θέρμανσης.....	28
1.4.4.2-4 Ειδική μέριμνα για τις ηλεκτρικές παραμέτρους της εγκατάστασης.....	29
1.4.4.2-5 Έλεγχος του συστήματος E.T.H.....	29
1.4.4.2-6 Πτώση τάσης κατά μήκος των καλωδιώσεων σύνδεσης του μετ/στη με τα θερμικά καλώδια.....	30
1.4.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ELECTRICAL TRACE HEATING (E.T.H).....	30
1.4.5.1 Θέρμανση σωληνώσεων εξόρυξης πετρελαίου.....	31
1.4.5.2 Εφαρμογές σε παράκτιες εγκαταστάσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου.....	31
1.4.5.3 Θέρμανση δεξαμενών.....	32
1.4.5.4 Εμπορικές και οικιακές εφαρμογές.....	33
1.4.5.5 Λοιπές εφαρμογές.....	34
<b>1.5 ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΑ.....</b>	<b>35</b>
1.5.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΚΑΛΩΔΙΩΝ.....	35
1.5.1.1 Αυτορυθμιζόμενα θερμικά καλώδια.....	35
1.5.1.2 Συμβατικά θερμικά καλώδια με σταθερή και συνεχή θερμική παροχή ανά μονάδα μήκους.....	39
1.5.1.2-1 Θερμικά καλώδια σταθερής ισχύος κυκλώματος σειράς ( <i>Series</i> <i>circuit heating cables</i> ).....	40
1.5.1.2-2 Θερμικά καλώδια σταθερής ισχύος παράλληλου κυκλώματος ή παράλληλη ζώνης ( <i>Parallel circuit heating cables</i> ).....	41
1.5.1.3 Θερμικά καλώδια ορυκτής μόνωσης ( <i>Mineral insulated heating cables</i> - <i>M.I.</i> ).....	43
1.5.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ – ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ.....	46
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....</b>	<b>53</b>
<b>2.1 Η ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....</b>	<b>53</b>
<b>2.2 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....</b>	<b>54</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....</b>	<b>55</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΩΝ     ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....</b>	<b>68</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>90</b>

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς δειγμάτων ηλεκτρικών θερμικών καλωδίων τα οποία αποτελούν το κύριο συστατικό στοιχείο των εγκαταστάσεων συστημάτων ηλεκτρικής θερμικής ιχνηλάτησης που βρίσκουν εφαρμογή σε πολυάριθμες βιομηχανικές, εμπορικές και οικιακές εφαρμογές.

Στην εισαγωγή δίνονται χρήσιμα στοιχεία για τα συστήματα ηλεκτρικής θερμικής ιχνηλάτησης τη σύγχρονη περίοδο. Γίνεται εκτενής αναφορά στη δομή τέτοιων συστημάτων, στα επιμέρους στοιχεία που τα απαρτίζουν και στα πεδία εφαρμογής τους. Επίσης παρουσιάζονται τα σημαντικότερα είδη θερμικών καλωδίων και οι χαρακτηριστικές τους ιδιότητες και δίνονται κατευθυντήριες γραμμές για την σωστή επιλογή τους σύμφωνα με κατάλληλα κριτήρια επιλογής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της διάταξης και της διαδικασίας που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίνονται όλες οι τιμές που προέκυψαν από τις μετρήσεις σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφηκε στο δεύτερο κεφάλαιο.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και αντίστοιχα διαγράμματα και γίνεται μία προσπάθεια για την εξήγησή τους και την εξαγωγή συμπερασμάτων.



## **ABSTRACT**

The purpose of this thesis concerns in the study of properties of electrical heating cable samples, which are the main components of electrical heat tracing systems that are applied in numerous industrial, commercial and residential installations.

In the introduction general aspects of the contemporary use of electrical heat tracing systems are given. A comprehensive report to the structure of such systems, their individual components and their fields of application is attempted. Furthermore, the most important types of heating cables and their properties are presented and are given instructions for the right selection according to the appropriate selection criteria.

In the second chapter the layout and the procedure of the measurements is described.

In the third chapter are given all the data obtained from the measurements according to the procedure described in the second chapter.

In the last chapter the results of the measurements and the corresponding diagrams are presented and is attempted an effort for their explanation and the export of conclusions.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Στην πρώτη αυτή ενότητα ορίζονται μερικά σημαντικά μεγέθη της θερμοδυναμικής, των οποίων η κατανόηση είναι αναγκαία για τη διατύπωση και την επίλυση κάθε θερμικού προβλήματος.

### 1.1.1 ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Είναι γνωστό πως όταν έρχονται σε επαφή δύο σώματα με διαφορετικές θερμοκρασίες, τότε η θερμοκρασία του θερμότερου σώματος μειώνεται και η θερμοκρασία του ψυχρότερου αυξάνεται. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, μάλιστα, οι δύο θερμοκρασίες αποκτούν την ίδια τιμή, οπότε επέρχεται θερμική ισορροπία. Η τιμή αυτή βρίσκεται ανάμεσα στις δύο αρχικές θερμοκρασίες. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να πει κανείς πως πραγματοποιείται μετάδοση θερμότητας από το θερμό στο ψυχρό σώμα.

Η **θερμότητα Q** (heat) ορίζεται ως ενέργεια που μεταδίδεται λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς. Μεταδίδεται κανονικά από περιοχές υψηλότερης σε περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας, ενώ το αντίθετο μπορεί να συμβεί μόνο στην περίπτωση τεχνητής άντλησης θερμότητας. Μονάδα μέτρησης της θερμότητας στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων είναι το Joule. Στις περιπτώσεις που ως μονάδα του Q χρησιμοποιείται το Watt, υπονοείται η **θερμική ισχύς P** (power) της μεταδιδόμενης θερμότητας.

Η **θερμοκρασία T** (temperature), το μέγεθος που εκφράζει πόσο ζεστό ή πόσο κρύο είναι ένα αντικείμενο και μετριέται σε C ή K, είναι το φυσικό μέγεθος που καθορίζει την κατεύθυνση θερμικής ροής μεταξύ δύο περιοχών. Με τον όρο **θερμική ροή q** (heat flux) εννοείται ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας ανά μονάδα εμβαδού. Μονάδα μέτρησης της θερμικής ροής είναι το  $W / m^2$ .

### 1.1.2 ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Ένα άλλο σημαντικό μέγεθος στη θερμοδυναμική είναι η **θερμοχωρητικότητα C** (heat capacity), η οποία ορίζεται ως ο λόγος της θερμότητας που προσφέρεται σε ένα σώμα σε σχέση με την ανύψωση της θερμοκρασίας του.

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (1.1)$$

όπου Q η προσφερόμενη θερμότητα σε J και T η θερμοκρασία του σώματος σε K. Η θερμοχωρητικότητα ενός αντικειμένου είναι ανάλογη με τη μάζα του. Είναι λοιπόν χρήσιμο να ορισθεί η θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα μάζας ενός υλικού. Η ποσότητα αυτή ονομάζεται **ειδική θερμότητα c** (specific heat capacity).

$$c = \frac{C}{m} \quad (1.2)$$

όπου C η θερμοχωρητικότητα σε  $J / K$  και m η μάζα του αντικειμένου σε kg. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούμε τον όρο θερμοχωρητικότητα αντί για ειδική θερμότητα. Έτσι ως μονάδες θερμοχωρητικότητας θεωρούμε το  $J / kgK$ . Γενικά η θερμοχωρητικότητα μιας ουσίας εξαρτάται από την πίεση και τον όγκο της και μεταβάλλεται ελαφρώς συναρτήσει της θερμοκρασίας.

### 1.1.3 ΘΕΡΜΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

Αντίστοιχα προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία φανερώνει πόσο εύκολα διέρχεται το ρεύμα μέσα από ένα υλικό, ορίζεται στη θερμοδυναμική η **θερμική αγωγιμότητα  $k$**  (thermal conductivity). Η θερμική αγωγιμότητα αποτελεί την ιδιότητα των υλικών που δείχνει την ικανότητά τους να άγουν τη θερμότητα και μετριέται σε  $W / m \cdot K$ .

Επιπλέον αναφέρουμε τον **συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $h$**  (heat transfer coefficient), ο οποίος εκφράζει την ικανότητα ενός ρευστού να απάγει θερμότητα από μία θερμή επιφάνεια με την οποία βρίσκεται σε επαφή. Μονάδα του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας είναι το  $W / m^2 \cdot K$ .

## 1.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Εν συνεχεία γίνεται κατηγοριοποίηση της μετάδοσης θερμότητας και δίνονται οι εξισώσεις που περιγράφουν τη μετάδοση αυτή σε κάθε περίπτωση. Γενικά όλοι οι μηχανισμοί μετάδοσης της θερμότητας είναι παρόντες σε κάποιο βαθμό σε πραγματικά φυσικά προβλήματα. Το σημαντικό σε τέτοια προβλήματα είναι να διακρίνει κανείς τους τρόπους μετάδοσης οι οποίοι παίζουν τον κυρίαρχο ρόλο από τους λιγότερο σημαντικούς, τους οποίους μπορεί να αγνοήσει.

Η θερμότητα διαδίδεται από τα θερμότερα σώματα προς τα ψυχρότερα, με τρεις μηχανισμούς:

- Με αγωγή
- Με μεταφορά
- Με ακτινοβολία

### 1.2.1 Διάδοση Θερμότητας με Αγωγή

Η μετάδοση της θερμότητας με **αγωγή** (heat conduction) στηρίζεται στη ροή θερμικής ενέργειας, μέσω των μορίων του υλικού σώματος, η οποία προκαλείται λόγω διαφοράς θερμοκρασίας και δεν συνοδεύεται από μετακίνηση της ύλης. Η μορφή αυτή μετάδοσης εξαρτάται λοιπόν σε μεγάλο βαθμό από της ιδιότητες του μέσου και συμβαίνει σε στερεά, υγρά και αέρια, αρκεί να υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας.

Έστω ότι εξετάζουμε μια μεταλλική ράβδο μήκους  $L$  και διατομής εμβαδού  $S$ , της οποίας τα δύο άκρα βρίσκονται σε σταθερές θερμοκρασίες  $T_1$  και  $T_2$  και ισχύει  $T_1 > T_2$ . Από το θερμότερο άκρο  $T_1$  διαδίδεται θερμότητα προς το ψυχρότερο άκρο  $T_2$ , η οποία είναι ανάλογη: του εμβαδού  $S$  της διατομής της ράβδου, της θερμικής αγωγιμότητας  $k$ , της θερμοκρασιακής διαφοράς  $T_1 - T_2$  των δύο άκρων της ράβδου και αντιστρόφως ανάλογη του μήκους της ράβδου,  $L$ .

Συνεπώς η ισχύς της μεταφερόμενης θερμότητας, είναι:

$$Q = k \cdot S \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (1.3)$$

Η θερμική αγωγιμότητα είναι ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει το υλικό στο οποίο γίνεται η αγωγή. Στη γενική περίπτωση δεν έχει σταθερή τιμή, αλλά εξαρτάται από τη

θερμοκρασία και τη θέση στο μέσο μετάδοσης. Ευτυχώς τα περισσότερα υλικά είναι ομοιογενή. Έτσι θεωρούμε πως τελικά η θερμική αγωγιμότητα επηρεάζεται μόνο από τη θερμοκρασία. Τιμές θερμικής αγωγιμότητας για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας βρίσκουμε σε πίνακες με ιδιότητες υλικών.

Τα υλικά με μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας καλούνται καλοί αγωγοί της θερμότητας (π.χ. τα μέταλλα), ενώ τα υλικά με μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας καλούνται κακοί αγωγοί της θερμότητας π.χ. αμίαντος, γυαλί, ρητίνες. Πολύ κακοί αγωγοί της θερμότητας είναι και τα αέρια, λόγω του χαμηλού αριθμού ατόμων ανά μονάδα όγκου. Τα υγρά (εκτός από τον υδράργυρο) και τα αέρια (εκτός από το υδρογόνο) έχουν μικρή θερμική αγωγιμότητα. Την μεγαλύτερη αγωγιμότητα όλων των στερεών εμφανίζουν τα μέταλλα, λόγω της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων τους.

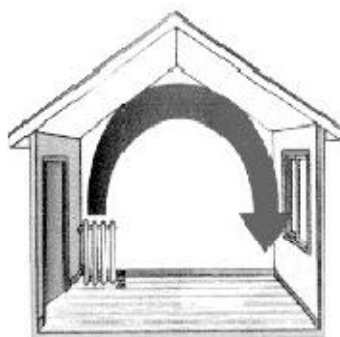
### 1.2.2 Διάδοση Θερμότητας με Μεταφορά

Στα υγρά και αέρια σώματα τα μόρια έχουν μεγάλη ελευθερία κίνησης. Κατά την κίνησή τους από μια θερμή σε μία ψυχρότερη περιοχή, μεταφέρουν ενέργεια μαζί τους.

Η μετάδοση θερμότητας από μία περιοχή σε μία άλλη, εξαιτίας μιας τέτοιας μακροσκοπικής κίνησης μέσα σε ένα υγρό ή αέριο καλείται μετάδοση με **μεταφορά** (heat convection).

Ο μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας στα υγρά και στα αέρια είναι ο ακόλουθος. Ο αέρας που περιβάλλει ένα θερμό σώμα θερμαίνεται και κατά συνέπεια διαστέλλεται.

Αυτό συμβαίνει διότι για μια δεδομένη μάζα αέρα, σύμφωνα με το νόμο των ιδανικών αερίων, το πηλίκο του όγκου προς τη θερμοκρασία της παραμένει σταθερό. Συνεπώς αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί ευθέως ανάλογη αύξηση του όγκου του αέρα. Η διαστολή αυτή προκαλεί τη μείωση της πυκνότητάς του, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη του όγκου του αερίου για δεδομένη μάζα. Λόγω της μειωμένης πυκνότητάς του, ο θερμός διεσταλμένος αέρας κινείται προς τα πάνω και αντικαθίσταται από πιο ψυχρό αέρα (σχήμα 1.2-1α). Μαζί του μεταφέρει και θερμική ενέργεια. Έτσι λοιπόν συμπεραίνουμε πως ο αέρας που περιβάλλει ένα θερμό σώμα προκαλεί την απομάκρυνση θερμότητας από το σώμα. Ομοίως το θερμό νερό είναι λιγότερο πυκνό από το κρύο, έτσι λοιπόν κινείται προς τα πάνω, προκαλώντας ρεύματα τα οποία μεταφέρουν ενέργεια (σχήμα 1.2-1β).



(α)



(β)

*Σχήμα 1.2-1: (α) Το καλοριφέρ δημιουργεί ρεύματα μεταφοράς. (β) Μεταφορά θερμότητας λόγω ρευμάτων νερού.*

Η μεταφορά διακρίνεται σε ελεύθερη και εξαναγκασμένη. Οι δύο τρόποι μεταφοράς μπορεί να συνυπάρξουν. Όταν το ρευστό βρίσκεται αρχικά σε ηρεμία έχουμε ελεύθερη μεταφορά και η κίνηση του είναι αποτέλεσμα ανωστικών δυνάμεων που δημιουργούνται λόγω διαφοράς πυκνότητας η οποία οφείλεται στην αύξηση ή τη μείωση της θερμοκρασίας του. Όταν το ρευστό έχει κάποια ταχύτητα έχουμε εξαναγκασμένη μεταφορά. Σε αυτή την περίπτωση το ρευστό οφείλει την κίνησή του σε εξωτερικές δυνάμεις (π.χ. αντλία). Στην εξαναγκασμένη μεταφορά έχουμε μεγαλύτερο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από ότι στην ελεύθερη μεταφορά λόγω αύξησης του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $h$ .

### 1.2.3 Διάδοση Θερμότητας με Ακτινοβολία

Όλα τα σώματα εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Η μετάδοση με **ακτινοβολία** (heat radiation) είναι ο μόνος μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας ο οποίος δεν απαιτεί την παρουσία υλικού μέσου. Στην πραγματικότητα μάλιστα η μετάδοση είναι πιο έντονη στο κενό. Γνωστό παράδειγμα στη φύση είναι η θέρμανση της γης από τον ήλιο, όπου δεν υπάρχει μέσο διάδοσης. Η θερμική ενέργεια εκπέμπεται από τις επιφάνειες των σωμάτων και διαδίδεται με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όταν τα κύματα αυτά συναντούν την επιφάνεια άλλου σώματος, ένα μέρος της ενέργειας ανακλάται, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται.

Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία θεωρείται συνήθως αμελητέα σε χαμηλές θερμοκρασίες σε σύγκριση με τους δύο άλλους τρόπους διάδοσης της θερμότητας και έτσι δεν λαμβάνεται υπόψιν.

Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία περιγράφεται από το **νόμο των Stefan-Boltzmann** (Stefan-Boltzmann law). Σύμφωνα με αυτόν η θερμική ροή η οποία εκπέμπεται από ένα σώμα είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της θερμοκρασίας του σώματος. Για έναν ιδανικό εκπομπό θερμότητας ή αλλιώς μέλαν σώμα ο νόμος γράφεται:

$$q = \sigma \cdot T^4 \quad (1.4)$$

όπου  $q$  η θερμική ροή σε  $W / m^2$ ,

$\sigma$  η σταθερά Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5.669 \cdot 10^{-8} W / m^2 K^4$ ) και  $T$  η θερμοκρασία της εκπέμπουσας επιφάνειας σε  $^{\circ}K$ .

## 1.3 ΘΕΡΜΑΝΣΗ

Με τον όρο **θέρμανση** χαρακτηρίζεται η παροχή θερμότητας από μια συσκευή που οδηγεί ένα άλλο σώμα ή αντικείμενο να αποκτήσει μεγαλύτερη θερμοκρασία από αυτήν που αρχικά είχε. Τα συστήματα που εκτελούν αυτή τη λειτουργία είναι τα **συστήματα θέρμανσης**.

Π.χ στην οικοκυρική, οι θερμάστρες είναι συστήματα θέρμανσης σκοπός των οποίων είναι η παραγωγή θερμότητας (δηλαδή η θέρμανση). Τα συστήματα θέρμανσης υπάρχουν για όλες τις καταστάσεις της ύλης, συμπεριλαμβανομένων των στερεών, υγρών και αερίων.

Το εγκατεστημένο σύστημα θέρμανσης και τα θερμικά χαρακτηριστικά του γύρω περιβάλλοντος πρέπει να συντείνουν στην επικράτηση των τιμών εκείνων των θερμοκρασιών που επιτρέπουν στον άνθρωπο να αποδίδει με κάποιον από τους μηχανισμούς μετάδοσης της θερμότητας, που περιγράφηκαν παραπάνω, τις αναγκαίες ποσότητες θερμότητας.

Τα **συμβατικά συστήματα θέρμανσης** (θερμάστρες πετρελαίου και στερεών καυσίμων, φυσικό αέριο, κ.τ.λ.) χρησιμοποιούν καύσιμο υλικό για την παραγωγή θερμότητας όπως πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακα κ.α.

Η **ηλεκτρική θέρμανση** χαρακτηρίζεται ως η καθαρότερη μορφή ενέργειας, χωρίς αποθήκευση καυσίμων. Τα ηλεκτρικά θερμαντικά σώματα (θερμάστρες, αερόθερμα, ηλεκτρικά καλοριφέρ, κ.α.) βασίζονται στην αρχή λειτουργίας τους σε ηλεκτρικές αντιστάσεις. Η θερμότητα που παράγεται μεταδίδεται κυρίως με φυσική κυκλοφορία και επαφή-μεταφορά του αέρα και σε μικρότερο ποσοστό με ακτινοβολία.

Τυπικά οι ηλεκτρικές μονάδες θέρμανσης που λειτουργούν με την θέρμανση μιας αντίστασης θεωρείται ότι έχουν 100% απόδοση, γιατί το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται μετατρέπεται σε θερμότητα και δεν υπάρχουν απώλειες. Ωστόσο ο ισχυρισμός αυτός δεν λαμβάνει υπόψη τις απώλειες κατά την παραγωγή του ηλεκτρισμού και τη μεταφορά του από το σημείο παραγωγής μέχρι το σημείο χρήσης. Εξάλλου η θερμική απόδοση του λιγνίτη είναι μικρή και κυμαίνεται γύρω στο 40%.

Από την άλλη μεριά η δημιουργία ηλεκτρικών πεδίων, επιβλαβών για τον ανθρώπινο οργανισμό σχετίζεται στενά με τις ηλεκτρικές θερμάνσεις.

Από τα χαρακτηριστικά όλων των ειδών συστημάτων θέρμανσης, τα οποία μπορούν να μετρηθούν αντικειμενικά, τα περισσότερα είναι οικονομικής φύσης. Αυτά περιλαμβάνουν το αρχικό κόστος κεφαλαίου, την ισχύ, τις απαιτήσεις του χώρου ή της εφαρμογής, την κατανάλωση ενέργειας και άλλα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, που εξαρτώνται από το κάθε σύστημα. Χαρακτηριστικά που μπορούν να θεωρηθούν ως ιστορικά περιλαμβάνουν τα έξοδα συντήρησης, το χρόνο ζωής του συστήματος και των συσκευών και τον αναμενόμενο χρόνο παλαίωσης.

## **1.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΙΧΝΗΛΑΤΗΣΗ (ELECTRICAL TRACE HEATING – E.T.H.)**

### **1.4.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Η αξιόπιστη προστασία από τον παγετό, η συντήρηση συγκεκριμένων θερμοκρασιακών ορίων σε επιμέρους διαδικασίες και η ελεγχόμενη θέρμανση με ακριβή τρόπο είναι ουσιαστικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση του κόστους και τη βελτίωση της αποδοτικότητας σε πολλούς κλάδους της βιομηχανίας. Κάθε εφαρμογή απαιτεί μια ειδικά προσαρμοσμένη προσέγγιση γι' αυτό και τα συστήματα θέρμανσης που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό, σχεδιάζονται για να ανταποκρίνονται στις διαφορετικές θερμοκρασιακές απαιτήσεις των εκάστοτε διαφορετικών βιομηχανιών - πετρελαίου και φυσικού αερίου, παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πετροχημικών, ειδικών χημικών, χαρτοπολτού και χαρτιού, φαρμακευτικών προϊόντων, γεωργίας, χαλυβουργίας και εμπορικών κατασκευών.

Αρχικά αναπτύχθηκαν τα κοινά συμβατικά συστήματα θέρμανσης, τα οποία χρησιμοποιούνταν στις περισσότερες εφαρμογές ανάγκης παροχής θερμότητας. Ως πηγή ενέργειας χρησιμοποιούσαν καύσιμα υλικά. Ωστόσο το πρόβλημα σε αυτήν την τεχνική εντοπιζόταν κυρίως στην αδυναμία να επιτευχθεί ομοιομορφία της κατανομής θερμότητας στο χώρο με αποτέλεσμα το προϊόν να μην διατηρείται σε μια ενιαία θερμοκρασία. Για παράδειγμα στην περίπτωση εφαρμογής τους σε σωλήνες στους οποίους ρέει κάποιο υγρό μέσο, ελλοχεύει ο κίνδυνος να χαθεί ποσότητα θερμότητας σε κάποιο σημείο του σωλήνα, η οποία είναι ικανή να σταματήσει τη ροή

του υγρού. Αποτέλεσμα αυτού είναι σε πολλές περιπτώσεις η άντλησή του υγρού να γίνεται με μεγάλη δυσκολία ή και να είναι ανέφικτη. Επιπλέον αυτά τα συστήματα απαιτούν μεγάλη απορρόφηση ενέργειας και προκαλούν μεγάλη κατανάλωση. Ακόμα και σήμερα παρόλα αυτά, χρησιμοποιούνται συμβατικά συστήματα θέρμανσης τα οποία τοποθετούνται σε διακριτά σημεία του συστήματος κατά μήκος σωληνώσεων για να αναπληρώσουν τις απώλειες.

Τα επόμενα χρόνια για να αντιμετωπιστεί κυρίως το πρόβλημα της ανομοιομορφής κατανομής θερμότητας, ειδικά σε περιπτώσεις που αυτό είχε πρωτεύουσα σημασία (π.χ συστήματα σωληνώσεων στα οποία έρρεε κάποιο υγρό όπως το πετρέλαιο και έπρεπε να διατηρούνται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία) αναπτύχθηκαν συστήματα θέρμανσης τα οποία χρησιμοποιούσαν αποκλειστικά ατμό, ως πηγή ενέργειας για την παροχή θερμότητας. Αυτή η τεχνική παροχής θερμότητας ονομάζεται θερμική ιχνηλάτηση με ατμό (steam tracing). Αποτελείται από σωλήνες στους οποίους διοχετεύεται κορεσμένος ατμός και τοποθετούνται επάνω στο σύστημα σωληνώσεων της βιομηχανικής εφαρμογής με στόχο να παρέχουν θερμότητα και να αναπληρώνουν τις απώλειες.

Το 1930 εμφανίστηκαν για πρώτη φορά ηλεκτρικοί θερμαντήρες σωληνώσεων σε μορφή καλωδίων επενδυμένων εξωτερικά με μόλυβδο. Η πεντηκονταετία που ακολούθησε οδήγησε στην ανάπτυξη μιας αφθονίας διαφορετικών τύπων ηλεκτρικών θερμικών καλωδίων για την κάλυψη μιας πληθώρας εφαρμογών που έχει προκύψει από ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών. Η διαδικασία παροχής θερμότητας με αυτήν την τεχνική που πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρικών θερμικών καλωδίων, τα οποία τοποθετούνται κατά μήκος συστημάτων σωληνώσεων και γενικότερα στον εξοπλισμό που ενδιαφέρει (δεξαμενές, δοχεία, κ.α.) είναι αυτό που κοινώς ονομάζεται ηλεκτρική θερμική ιχνηλάτηση (Electrical Heat Tracing – E.T.H.).



*Σχήμα 1.4-1: Θέρμανση σωληνώσεων: Από μεγάλου μήκους, ευθείες γραμμές μεταφοράς μέχρι πολύπλοκες σωληνώσεις επεξεργασίας υγρών μέσων.*



*Σχήμα 1.4-2: Θέρμανση επιφανειών: Εφαρμογή σε δεξαμενές, δοχεία και βαρέλια αποθήκευσης.*

Το E.T.H. είναι ένα σύστημα θέρμανσης το οποίο εφαρμόζεται για αντιπαγωγική προστασία ή για τη διατήρηση (ή αύξηση) της θερμοκρασίας σε σωλήνες, λέβητες, δεξαμενές, αντλίες και λοιπό εξοπλισμό βιομηχανικών διαδικασιών και εφαρμογών. Με λίγα λόγια η χρήση των συστημάτων αυτών στις εφαρμογές που απαιτούν παροχή θερμότητας γίνεται με στόχο να εκτελέσει δύο βασικές λειτουργίες,

- Την εξισορρόπηση των απωλειών θερμότητας
- Την αύξηση της θερμοκρασίας

Το E.T.H. ήταν ένα μικρό μέρος των συνολικών εφαρμογών θερμικής ιχνηλάτησης μέχρι και τις αρχές του 1970. Αυτό ίσχυε μέχρι που εισήχθησαν στην βιομηχανία τα αυτορυθμιζόμενα καλώδια και τα θερμικά καλώδια παράλληλης ζώνης, τα οποία έδιναν την δυνατότητα να κόβονται στο επιθυμητό μήκος της εφαρμογής. Πριν από αυτά υπήρχαν κάποια καλώδια που έδιναν τη δυνατότητα αυτή, αλλά η πλειοψηφία της χρήσης ήταν καλώδια ορυκτής μόνωσης τα οποία μέχρι και σήμερα δεν δίνουν αυτή τη δυνατότητα. Ωστόσο από μόνο του αυτό το πλεονέκτημα δεν ήταν αρκετό για να αναδείξει αυτή τη τεχνική ως την πιο ιδανική λύση και γι' αυτό το 1970 εκτιμάται ότι το 98% των νέων εγκατεστημένων συστημάτων θερμικής ιχνηλάτησης ήταν συστήματα με ατμό.

Τα θερμικά καλώδια του E.T.H. αποτέλεσαν αρχικά μια εναλλακτική λύση της θέρμανσης με ατμό. Στην πορεία έγινε αντιληπτό ότι το E.T.H. έχει μεταξύ άλλων ένα σαφές πλεονέκτημα σε σχέση με την θερμική ιχνηλάτηση ατμού όσον αφορά τη σχετική οικονομία που παρείχε για τις περισσότερες εφαρμογές. Τα συστήματα E.T.H. αποτελούν επιπλέον μια πιο προσιτή λύση για τον μηχανικό από τα συστήματα ατμού, όσον αφορά τον σχεδιασμό και την εφαρμογή τους, ενώ τόσο το κόστος εγκατάστασης όσο και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της εγκατάστασης είναι αμφότερα χαμηλότερα σε σχέση με την εφαρμογή ατμού για παροχή θερμότητας σε αντίστοιχες περιπτώσεις.

Με τα χρόνια, το E.T.H. έχει υποστεί δραματικές αλλαγές, με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός μεγάλου φάσματος ηλεκτρικών θερμικών καλωδίων και εξελιγμένων συσκευών ελέγχου και παρακολούθησης που έχουν γίνει διαθέσιμες για τους σχεδιαστές αυτών των εγκαταστάσεων. Η πορεία και η εξέλιξη του στο πέρας των χρόνων μπορεί να χωριστεί σε τρία συστατικά στοιχεία: το θερμικό καλώδιο και τα επιμέρους τμήματα αυτού, το σχέδιο του μηχανικού και την εγκατάσταση. Ο βαθμός ποιότητας ενός συστήματος θερμικής ιχνηλάτησης μπορεί να γίνει αντιληπτός συνδυάζοντας την ποιότητα του θερμικού καλωδίου με την ποιότητα του σχεδιασμού και της εγκατάστασης, συμπεριλαμβανομένης και της θερμομόνωσης του συστήματος σωληνώσεων.

Διαφόρων ειδών καλώδια, όπως παράλληλης αντίστασης, συνεχούς (ή σταθερής) ισχύος και αυτορυθμιζόμενα θερμικά καλώδια έχουν σχεδιαστεί τα προηγούμενα χρόνια για θέρμανση πολύπλοκων σωληνώσεων εντός εγκαταστάσεων εργοστασίων, ενώ θερμικά καλώδια αντίστασης σε σειρά και συστήματα εκμετάλλευσης επιδερμικού φαινομένου σε αγωγό (skin effect tracing) έχουν αναπτυχθεί για τη θέρμανση αγωγών μεγάλου μήκους σε εξωτερικά περιβάλλοντα. Ταυτόχρονα, εξελιγμένος ηλεκτρονικός έλεγχος και συσκευές παρακολούθησης συνδυάζονται και δημιουργούν συστήματα που προσφέρουν υψηλότερα επίπεδα αποτελεσματικότητας και ασφάλειας από ό, τι είναι δυνατόν με ατμό ή άλλες πηγές ενέργειας. Η ανάγκη για ασφαλή εξοπλισμό έχει ενταθεί τον τελευταίο καιρό με τον συνεχώς αυξανόμενο



αριθμό των εφαρμογών που βρίσκονται σε επικίνδυνα περιβάλλοντα, όπως εργοστάσια πετροχημικών, παράκτιων πλατφόρμων, κλπ.

Τα τελευταία χρόνια ολοένα και περισσότεροι μηχανικοί στρέφονται στα Ε.Τ.Η. συστήματα εξαιτίας των πολλαπλών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν. Τα πλεονεκτήματα αυτά συνοψίζονται στα εξής: πιο ακριβής έλεγχος, χαμηλότερο αρχικό κεφάλαιο από τον αγοραστή, χαμηλά έξοδα συντήρησης και λειτουργίας, καλύτερη απόδοση, μεγαλύτερη ασφάλεια της εγκατάστασης, και αυξημένη διάρκεια ζωής των εγκαταστάσεων. Επιπλέον με τα θερμικά καλώδια η εγκατεστημένη ισχύς είναι μικρότερη, η οποία μετατρέπεται 100% σε εκμεταλλεύσιμη και ελεγχόμενη θέρμανση. Σε συνδυασμό με την άμεση μετάδοση της θερμότητας, την ομοιομορφία της θέρμανσης και την τέλεια αυτονομία, τα συστήματα αυτά προσφέρουν 25% τουλάχιστον οικονομία στην κατανάλωση συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης. Είναι σαφές ότι όπως και σε κάθε εφαρμογή έτσι και εδώ υπάρχουν κίνδυνοι που ελλοχεύουν για τους οποίους πρέπει να λαμβάνεται ειδική μέριμνα και θα παρουσιαστούν στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου.

Σήμερα, κατά το σχεδιασμό των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων θέρμανσης, η ποικιλομορφία των καλωδίων που διατίθενται επιτρέπει στον μηχανικό να επιλέξει ένα συγκεκριμένο είδος ή ένα συνδυασμό από καλώδια που να ταιριάζει απόλυτα στις παραμέτρους της μονάδας εγκατάστασης, με στόχο την εξισορρόπηση της βέλτιστης απόδοσης και της απαιτούμενης ασφάλειας του συστήματος.

Τα συστήματα Ε.Τ.Η. έχουν μια σημαντική συμβολή στην ομαλή πορεία των διεργασιών σε διυλιστήρια, στις χημικές και πετροχημικές βιομηχανίες και στη μηχανολογία.

Χρησιμοποιούνται στη χημική βιομηχανία και τις βιομηχανίες πετροχημικών, στην κατασκευή μηχανημάτων και στην παραγωγική διαδικασία. Στην υπεράκτια παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, χρησιμοποιούνται αντιεκρηκτικά συστήματα θέρμανσης με σκοπό τη βελτίωση της ρευστότητας (υπερβολικά υψηλό ιξώδες σε χαμηλές θερμοκρασίες) ή τη διατήρηση μιας σταθερής θερμοκρασίας είτε στις δεξαμενές είτε στον υπόλοιπο εξοπλισμό. Επιπλέον τώρα με τη γενική αποδοχή της υπερθέρμανσης του πλανήτη, όλο και σε περισσότερες χώρες με πολύ ψυχρά κλίματα, οι εφαρμογές αυτές έχουν επεκταθεί σε προστασία από παγετό οικιακών σωληνώσεων, λιώσιμο χιονιού και πρόληψη σχηματισμού πάγου.



*Σχήμα 1.4-3 : Αντιπαγοτική προστασία, συντήρηση θερμοκρασίας και θέρμανση σε διυλιστήρια και εγκαταστάσεις πετροχημικών και χημικών.*



*Σχήμα 1.4-4 : Συντήρηση θερμοκρασίας σε εργοστάσια φαρμακευτικών και τροφίμων.*

#### Θέρμανση για διατήρηση της ροής υγρών μέσων

Παραδοσιακές εφαρμογές του Ε.Τ.Η. περιλαμβάνουν πέρα από την αντιπαγωγική προστασία, τη διατήρηση ή αύξηση της θερμοκρασίας σωλήνων, εξαρτημάτων σωληνώσεων και δεξαμενών για υγρά μέσα, όπως το νερό, τα λάδια, το πετρέλαιο και η παραφίνη. Ορισμένα μέσα θερμαίνονται για τη μείωση του ιξώδους τους, το οποίο αυξάνει σε χαμηλές θερμοκρασίες, με σκοπό να διευκολυνθεί η άντληση τους. Άλλα πάλι έχουν την τάση να κρυσταλλώνουν ή να συμπυκνώνονται, εάν οι σωλήνες και οι δεξαμενές δεν θερμαίνονται στη κατάλληλη θερμοκρασία.

Όταν ένα υγρό υλικό μεταφέρεται μέσα σε σωλήνες σε θερμοκρασία υψηλότερη από το περιβάλλον του, αυτό έχει σαν συνέπεια την απώλεια θερμότητας. Είναι συχνά αρκετό να αντισταθμιστούν αυτές οι απώλειες θερμότητας, οι οποίες προκαλούνται από αυτή τη διαφορά θερμοκρασίας που πρέπει να διατηρηθεί μεταξύ του υλικού και της ελάχιστης θερμοκρασίας του αέρα στο γύρω περιβάλλον, με την τοποθέτηση ενός συγκεκριμένου πάχους και είδους θερμομονωτικού υλικού. Η μόνωση όμως συνήθως επιβραδύνει αυτή την απώλεια θερμότητας, αλλά δεν την εμποδίζει εξ' ολοκλήρου να συμβεί. Η θερμοκρασία μπορεί να διατηρηθεί με την κατάλληλη παροχή θερμότητας, η οποία θα είναι ικανή να αναπληρώσει τις απώλειες. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση κατάλληλων θερμικών καλωδίων.



*Σχήμα 1.4-5 : Τοποθέτηση θερμικών καλωδίων για αξιόπιστη διατήρηση της θερμοκρασίας σε αγωγούς μεταφοράς πετρελαίου.*

Προκειμένου να καταλήξει κανείς στη σωστή επιλογή, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στις ιδιότητες του υγρού μέσου της διαδικασίας σε συνδυασμό με τη διάταξη των σωληνώσεων και των απαιτήσεων θερμοκρασίας του συστήματος.

### **1.4.2 ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

Τα επιμέρους στοιχεία που συνθέτουν συνήθως την δομή ενός Ε.Τ.Η. συστήματος είναι τα εξής:

- **Θερμικό καλώδιο:** Είναι το βασικό στοιχείο ενός συστήματος. Τροφοδοτείται από κατάλληλη παροχή και παράγει την απαιτούμενη θερμότητα για να εκπληρώσει τον στόχο του Ε.Τ.Η. Σε επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα τα διαφορετικά είδη θερμικών καλωδίων.
- **Αισθητήρες θερμοκρασίας:** Είναι οι αισθητήρες που καταγράφουν την θερμοκρασία του θερμαινόμενου μέσου και στέλνουν το κατάλληλο σήμα στον ελεγκτή της θερμοκρασίας. Συνήθως τοποθετούνται σε κατάλληλα σημεία ώστε να είναι σε άμεση επαφή με το μέσο και η θερμοκρασία που καταγράφουν να είναι αντιπροσωπευτική του συστήματος.
- **Ελεγκτής θερμοκρασίας:** Λαμβάνει την τιμή της θερμοκρασίας από τους αισθητήρες, τη συγκρίνει με την επιθυμητή τιμή και προσαρμόζει την τιμή ισχύος εξόδου του ελεγκτή ισχύος (power controller) για να διατηρηθεί η επιθυμητή θερμοκρασία στην εφαρμογή και να αποφευχθεί η υπέρβαση μιας προκαθορισμένης τιμής θερμοκρασίας. Λειτουργούν κατά κύριο λόγο με επαφές οι οποίες ανοίγουν και κλείνουν συναρτήσει της θερμοκρασίας που ανιχνεύεται από τους αισθητήρες.
- **Περιοριστής θερμοκρασίας:** Συσκευή που παρέχει προστασία κατά της υπερβολικής θερμικής φόρτισης, καθώς και τη διαβεβαίωση ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας που προδιαγράφεται για μια δεδομένη περιοχή ταξινόμησης (βλ. παρ. 1.4.3.1) θα διατηρηθεί.
- **Ελεγκτής ισχύος (Power controller):** Με τη βοήθεια ηλεκτρομηχανικών επαφών ή ρελέ ελέγχει την θερμική ισχύ εξόδου του θερμικού καλωδίου σύμφωνα με το σήμα που λαμβάνεται από τον ελεγκτή θερμοκρασίας.
- **Κιβώτιο σύνδεσης (Junction box):** Μετά την εγκατάσταση των θερμικών καλωδίων χρησιμοποιείται το κιβώτιο σύνδεσης για να γίνει η ηλεκτρική σύνδεση του συστήματος. Χρησιμοποιούνται γι' αυτό τον σκοπό συνήθως κατάλληλες είσοδοι καλωδίων που εφαρμόζουν στα θερμικά καλώδια και τα συνδέουν στο κιβώτιο σύνδεσης. Συνήθως τα κιβώτια αυτά είναι τύπου αυξημένης ασφαλείας για αντικρηκτική προστασία.

#### Μέσα προστασίας

- **Μικροαυτόματοι διακόπτες ελέγχου σφάλματος ως προς γη και έλεγχος μόνωσης:** Συσκευές που χρησιμοποιούνται για να περιοριστεί η αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται από ανωμαλίες στο σύστημα γείωσης ή από ενδεχόμενη διαρροή ρεύματος προς τη γη.

### **1.4.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

Η επιλογή του Ε.Τ.Η. συχνά καθορίζεται από την πολυπλοκότητα των σωληνώσεων, την κατηγορία του χώρου εγκατάστασης (Area Classification), τις προτιμήσεις του χρήστη και το ποσό της θερμότητας που πρέπει να παρέχεται στους αγωγούς των σωληνώσεων όπου αυτό θα εφαρμοστεί. Για τους λόγους αυτούς, ο σχεδιασμός του συστήματος θέρμανσης είναι εξαιρετικά σημαντικός, ακόμα και αν υπάρχουν φαινομενικά μικρές λεπτομέρειες οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη λειτουργία του συστήματος.

Επιπλέον, όπως συμβαίνει με κάθε στοιχείο ηλεκτρολογικού εξοπλισμού ή εγκατάσταση καλωδιώσεων που συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο παροχής τάσεως, οποιαδήποτε ζημιά ή κακή εγκατάσταση των θερμικών καλωδίων και των συστατικών στοιχείων αυτών που επιτρέπει τη διείσδυση της υγρασίας ή σκόνης μπορεί να οδηγήσει σε δυσλειτουργία του καλωδίου αυτού. Τα συστήματα θέρμανσης τέτοιου είδους εξαιτίας των διαφόρων εφαρμογών, θα πρέπει να πληρούν τις σχετικές απαιτήσεις ασφάλειας. Οι σημαντικότερες εξ' αυτών είναι οι εξής:

#### **1.4.3.1 Αντιεκρηκτική προστασία**

Καθώς η χρήση των θερμικών καλωδίων για βιομηχανικές και οικοδομικές εφαρμογές αυξάνεται ετησίως σε μήκος χιλιάδων χιλιομέτρων, ένα συνεχώς αυξανόμενο ποσοστό των εγκαταστάσεων Ε.Τ.Η. βρίσκεται σε εκρηκτικά περιβάλλοντα, όπου σύγχρονα συστήματα προστασίας έχει αποδειχθεί ότι είναι αποδοτικά οικονομικά, αξιόπιστα και κυρίως ασφαλή, σε σύγκριση με την εφαρμογή του ατμού.

Από τότε που τα Ε.Τ.Η. συστήματα εισήχθησαν στη βιομηχανία, υπήρχε πάντα μια σύγκρουση του ενδιαφέροντος μεταξύ του εξοπλισμού θερμικής ιχνηλάτησης και των απαιτήσεων των εν δυνάμει εκρηκτικών περιοχών. Αυτή η σύγκρουση είναι αποτέλεσμα των εφαρμογών σε βιομηχανίες πετρελαίου, φυσικού αερίου και πετροχημικών που απαιτούν συστήματα θερμικής ιχνηλάτησης για την λειτουργία τους και ταυτόχρονα την παραγωγή ηλεκτρικής θερμικής ενέργειας από συστήματα παροχής θερμότητας σε επιφάνειες.

Το πρόβλημα ήταν, και ακόμα παραμένει, ότι το σύστημα Ε.Τ.Η. χρειάζεται να παράγει όσο περισσότερη θερμική ενέργεια είναι δυνατόν, ενώ ο στόχος σε μια βιομηχανική εφαρμογή που έχει χαρακτηριστεί σαν επικίνδυνη περιοχή είναι να αποφευχθεί όσο αυτό είναι δυνατόν μεγάλη παραγωγή θερμότητας. Όταν ένα ηλεκτρικό θερμικό καλώδιο χρησιμοποιείται και είναι μέρος ενός συστήματος θέρμανσης, το πρόβλημα του να προκύπτει ζεστή επιφάνεια στο καλώδιο είναι αναπόφευκτο. Και προκειμένου τα θερμικά καλώδια να διατηρήσουν θερμοκρασίες ή ακόμα χειρότερα να αυξήσουν θερμοκρασίες ενός συστήματος, το αναγκαίο ποσό ενέργειας πρέπει να μεταφερθεί μέσα από την σχετικά μικρή περιοχή της επιφάνειας του καλωδίου.

Η θερμοκρασίες των επιφανειών σε εν δυνάμει εκρηκτικά περιβάλλοντα είναι αυστηρά καθορισμένες και γι' αυτό τα συστήματα θερμικής ιχνηλάτησης απαιτείται να λειτουργούν μέσα στα πλαίσια αυτών των κανονισμών. Κανονισμοί για την χρήση εξοπλισμού μέσα σε εν δυνάμει εκρηκτικές ατμόσφαιρες ξεκίνησαν να

διαμορφώνονται στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, εξαιτίας ατυχημάτων που συνέβαιναν συχνά σε τέτοιες περιοχές.

Μεγάλης σημασίας σε μια επικίνδυνη περιοχή είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας του θερμικού καλωδίου. Σε επικίνδυνες περιοχές, η συμμόρφωση με τα πρότυπα EX και ειδικά την τήρηση της κατηγοριοποίησης της θερμοκρασίας (T-class rating) είναι επιτακτική. Η κατηγοριοποίηση της θερμοκρασίας γίνεται με στόχο να προσδιορισθεί η θερμοκρασία ανάφλεξης, η οποία είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία στην επιφάνεια του θερμικού καλωδίου (στον εξωτερικό μανδύα) στην οποία μια εκρηκτική ατμόσφαιρα θα αναφλεγεί. Αέρια και σκόνες χωρίζονται σε κατηγορίες θερμοκρασίας, ανάλογα με τις θερμοκρασίες ανάφλεξής τους, ώστε ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός να μπορεί να υποδιαιρεθεί σε έξι κατηγορίες θερμοκρασίας T1 έως T6. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας της επιφάνειας του θερμικού καλωδίου πρέπει να είναι πάντα κάτω από τη θερμοκρασία ανάφλεξης του εκρηκτικού μείγματος.

Η επιλογή και τοποθέτηση συστημάτων E.T.H. σε εν δυνάμει εκρηκτικές ατμόσφαιρες, βασίζεται στην σειρά των προτύπων EN 60079. Η συνολική εγκατάσταση του E.T.H. καθορίζεται στο πρότυπο EN 60079-30-2, ενώ όλες οι άλλες συσκευές πρέπει να επιλέγονται και να εγκαθίστανται σύμφωνα με το πρότυπο EN 60079 – 14 που αφορά την εγκατάσταση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού σε εκρηκτικές ατμόσφαιρες.

#### **1.4.3.2 Προστασία από τη διάβρωση**

Σε χημικές και πετροχημικές εγκαταστάσεις ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην προστασία από τη διάβρωση. Η διαρροή χημικών ουσιών σε εξαρτήματα σωληνώσεων, φλάντζες και βαλβίδες μπορεί εύκολα να καταστρέψει τα θερμικά καλώδια.

Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένας εξωτερικός μανδύας από χαλκό σαν ασπίδα προστασίας από μηχανικές καταπονήσεις, ο οποίος συχνά αποτελεί και τον αγωγό γείωσης λόγω της καλής αγωγιμότητάς του. Ωστόσο, επειδή αυτός ο μανδύας χαλκού δεν είναι ανθεκτικός σε χημικές ουσίες, χρειάζεται επιπλέον ένα πλαστικό υλικό εξωτερικά του καλωδίου για να διασφαλίσει την απαιτούμενη ασφάλεια και αντοχή στη διάβρωση.

#### **1.4.3.3 Θερμοκρασία**

Η θερμοκρασία αντοχής των διαφόρων ειδών θερμικών καλωδίων που χρησιμοποιούνται διαφέρει σημαντικά από είδος σε είδος. Πριν την τοποθέτηση του στο πεδίο εφαρμογής, είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας του θερμικού καλωδίου και η μέγιστη θερμοκρασία που επέρχεται στο σωλήνα που πρόκειται να θερμανθεί. Η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας πρέπει πάντοτε να είναι 20 έως 40°C υψηλότερη, και η μέγιστη φόρτιση του θερμικού καλωδίου πρέπει πάντα να επιλέγεται ώστε να ανταποκρίνεται στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του σωλήνα και της μέγιστης επιτρεπόμενης θερμοκρασίας λειτουργίας του θερμικού καλωδίου, τόσο μεγαλύτερη μπορεί να είναι η φόρτιση του θερμικού καλωδίου.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο σημείο αυτό, ιδιαίτερα αν, ταυτόχρονα, το θερμικό καλώδιο πρόκειται να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες κάτω του μηδενός. Οι

ιδιότητες ορισμένων πλαστικών είναι εξίσου καλές σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από  $-50$  έως  $0^{\circ}\text{C}$ , όσο και σε θετικές θερμοκρασίες, ενώ άλλα πλαστικά υλικά δεν μπορούν να χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση.

#### **1.4.4 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ Ε.Τ.Η.**

##### **1.4.4.1 Θερμομόνωση**

Οι θεμελιώδεις αρχές του Ε.Τ.Η. φαίνονται αρκετά απλές σε πρώτη ανάγνωση. Ωστόσο, παρουσιάζονται κάποιες δυσκολίες κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός συστήματος Ε.Τ.Η για τους εξής λόγους:

- Οι σωλήνες δεν περιβάλλονται πάντα από τέλεια καλύμματα θερμομόνωσης και συνεπώς δεν μπορεί εύκολα να υποθέσει κανείς ότι ένα σύστημα σωληνώσεων θα πρέπει να μοντελοποιηθεί σαν μια τέλεια μονωμένη κυλινδρική επιφάνεια.
- Το στρώμα της θερμομόνωσης μπορεί συχνά να διακόπτεται από στηρίγματα των σωληνώσεων και άλλα εξαρτήματα, πράγμα που οδηγεί σε φαινόμενα απωλειών θερμότητας.
- Οι σωλήνες και τα δοχεία αποθήκευσης δεν είναι στέρες δομές. Περιέχουν υγρά μέσα που μπορούν να είναι σε φυσική κίνηση που οφείλεται σε διαφορές της πυκνότητας τους που προκύπτουν από τη θέρμανση.
- Οι σωλήνες μπορεί να είναι κατασκευασμένοι από υλικά -κακούς αγωγούς της θερμότητας- όπως πλαστικά, τα οποία έχουν σημαντικά μειωμένους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και περιορισμένο εύρος θερμοκρασίας στην οποία μπορούν να εκτίθενται.
- Μεγάλης διαμέτρου μεταλλικοί σωλήνες μπορεί να έχουν σημαντική διαφορά θερμοκρασίας γύρω από την περιφέρεια τους λόγω πιθανής έλλειψης συμμετρίας του εφαρμοζόμενου συστήματος Ε.Τ.Η.

Ανεξάρτητα λοιπόν από τον τύπο θερμικού καλωδίου ή την εφαρμογή, ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία κάθε συστήματος θερμικής ιχνηλάτησης είναι η θερμική μόνωση. Τοποθετείται γύρω από το σύστημα σωληνώσεων και το θερμικό καλώδιο του Ε.Τ.Η. με στόχο να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες προς το γύρω περιβάλλον.

Στη φάση του σχεδιασμού, η θερμότητα που παράγεται από το θερμικό καλώδιο υπολογίζεται ώστε να αντισταθμίσει την θερμότητα που χάνεται μέσω της θερμομόνωσης σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας κατά τη διάρκεια των ελάχιστων περιβαλλοντικών συνθηκών. Ο υπολογισμός της θερμικής απώλειας είναι απλός, αλλά εξαρτάται εξ ολοκλήρου από το σύστημα θερμομόνωσης που έχει εγκατασταθεί. Τυχόν διαφοροποιήσεις στο σύστημα μόνωσης κατά μήκος των σωληνώσεων, όπως η έλλειψη μόνωσης σε κάποιο σημείο ή η εισροή νερού στο σύστημα (η οποία οδηγεί σε επιδείνωση της αποδοτικότητας), αυξάνει σημαντικά τις θερμικές απώλειες, οι οποίες σχεδόν πάντα υπερβαίνουν τη παραγωγή θερμότητας από το κύκλωμα Ε.Τ.Η.

Η ποιότητα της θερμομόνωσης εκφράζεται από τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $h$  ( $\text{W} / \text{m}^2\text{K}$ ). Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή αυτή, τόσο χαμηλότερη είναι η θερμική ισχύς του καλωδίου που πρέπει να εγκατασταθεί. Η θερμική αγωγιμότητα είναι μια μορφή μεταφοράς ενέργειας που καθορίζεται από έναν θερμοκρασιακό συντελεστή και ποικίλει ανάλογα με το είδος του υλικού. Στα στερεά υλικά η

θερμότητα διαδίδεται με την αγωγιμότητα. Ένα δεδομένο ποσό θερμότητας κινείται στον χρόνο 't' μέσα από ένα τοίχωμα (πάχος της μόνωσης) με διαφορετικές εσωτερικές και εξωτερικές θερμοκρασίες (θερμοκρασία του σωλήνα και του περιβάλλοντος). Ο σκοπός του συστήματος θέρμανσης είναι να αντισταθμίσει την απώλεια θερμότητας και να σταθεροποιήσει την θερμοκρασία. Ο τύπος και οι διαστάσεις των διαφόρων μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό και τον σχεδιασμό των συστημάτων σε σχέση πάντοτε με την αντίστοιχη θερμοκρασία λειτουργίας.

Οι σωλήνες πρέπει να μονώνονται με τη σωστή θερμομόνωση ώστε να διατηρείται η επιθυμητή θερμοκρασία σε αυτούς. Μια καλή θερμομόνωση συνεπάγεται:

- Χαμηλότερες απώλειες θερμότητας
- Χαμηλότερα λειτουργικά κόστη

### Μονωτικό υλικό

Τα ακόλουθα κριτήρια αποτελούν σημαντικές παραμέτρους, οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν όταν επιλέγεται ένα μονωτικό υλικό. Η επιλογή καθορίζεται από τις προδιαγραφές της εγκατάστασης και τις συνθήκες λειτουργίας:

- Θερμοκρασία
- Θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης
- Μηχανικές ιδιότητες του υλικού
- Χημική συμβατότητα και αντοχή στη διάβρωση
- Αντοχή στην υγρασία
- Βαθμός επικινδυνότητας για την υγεία του ανθρώπου κατά την εγκατάσταση
- Ευφλεκτότητα
- Τοξικές ιδιότητες κατά την έκθεση του στην φωτιά

### Θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης

Ιδιαίτερα μεγάλη προσοχή θα πρέπει να δοθεί λοιπόν, στην επιλογή της σωστής θερμομόνωσης για ένα δεδομένο σχέδιο εγκατάστασης. Το μονωτικό υλικό θα πρέπει να είναι κατάλληλο για τις αναμενόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας. Για την παρεμπόδιση της διείσδυσης υγρασίας, επειδή αυτή μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα της μόνωσης και του ίδιου του συστήματος θέρμανσης, ίσως απαιτείται να χρησιμοποιηθεί κατάλληλο υλικό, ως προστατευτικό κάλυμμα για τον σκοπό αυτό.

Αν χρησιμοποιηθούν υλικά τα οποία δεν συμμορφώνονται με το πλάνο σχεδιασμού που έχει εκπορευτεί για την εγκατάσταση της θερμομόνωσης, η λειτουργία του συστήματος Ε.Τ.Η. δεν είναι απόλυτα εγγυημένη.

Τα μονωτικά υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως, περιλαμβάνουν:

- Ορυκτές ίνες
- Ορυκτοβάμβακα
- Armaflex/Aeroflex
- Κυψελωτό γυαλί
- Αφρό πολουρεθάνης

### Πάχος της μόνωσης

Το πάχος της μόνωσης και το είδος του υλικού αποτελούν βασικούς παράγοντες για την όλη λειτουργία της εγκατάστασης. Το πάχος της μόνωσης που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να επιλέγεται σύμφωνα με τις προβλέψεις του αρχικού σχεδιασμού και των υπολογισμών.

Στην πραγματικότητα, κατά μήκος μιας μονάδας εγκατάστασης είναι πιθανό να υπάρχουν διαφοροποιήσεις στο πάχος και επαναλαμβανόμενες διακοπές του καλύμματος της θερμομόνωσης, εξαιτίας της ανομοιογένειας του συστήματος σωληνώσεων (βαλβίδες, στηρίγματα σωλήνων κ.α.). Αυτή η ασυνέχεια της θερμομόνωσης μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα ψύξης (cooling effect). Ανάλογα με το είδος του υγρού μέσου της διαδικασίας εντός του σωλήνα, αυτό το φαινόμενο μπορεί να συγκεντρώνεται σε ένα σημείο ή μπορεί να διαχέεται μέσω αναμειξέως συναγωγής (convective mixing) στο υγρό στο εσωτερικό του σωλήνα.

Αν και είναι συνήθως πρακτική να τοποθετούνται επιπλέον θερμικά καλώδια σε αυτές τις περιοχές απωλειών θερμότητας, πιθανόν να υπάρξουν περιπτώσεις όπου το φαινόμενο convective mixing να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να πρέπει να γίνει σχεδόν από το μηδέν ο σχεδιασμός του συστήματος E.T.H.

### Αυξημένη απώλεια θερμότητας μέσα από την μόνωση, η οποία δεν μπορεί να αντισταθμιστεί από το καλώδιο

Πολλές φορές προκειμένου να ενισχυθεί η ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας στον σωλήνα που θερμαίνεται, θα πρέπει να τοποθετηθεί κατάλληλο υλικό (συνήθως αλουμινόχαρτο) γύρω από το σωλήνα και το θερμικό καλώδιο. Όταν όμως η απώλεια θερμότητας του μονωμένου σωλήνα υπερβαίνει την παραγωγή θερμότητας από το καλώδιο που έχει τοποθετηθεί, θα πρέπει να γίνουν τα εξής:

- α) να χρησιμοποιηθούν ίσως πολλαπλά περάσματα του καλωδίου στα σημεία που η απώλειες θερμότητας είναι μεγαλύτερες από αυτήν που αποδίδει το θερμικό καλώδιο,
- β) να χρησιμοποιηθεί ένα διαφορετικό καλώδιο υψηλότερης θερμικής ισχύος, ή
- γ) να γίνει μείωση των απωλειών θερμότητας με αύξηση του πάχους της μόνωσης ή χρησιμοποιώντας μια μόνωση με χαμηλότερο "συντελεστή k".

#### **1.4.4.1-1 Συστήματα θερμικής ιχνηλάτησης σωλήνων για την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας**

Η θερμότητα (σε Watt) που απαιτείται για να διατηρηθεί ένα μονωμένος σωλήνας με δεδομένο μήκος σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία μπορεί να υπολογιστεί από την απλοποιημένη εξίσωση:

$$Q_1 = \frac{L \cdot \pi \cdot (\theta_R - \theta_A) \cdot 1,43}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{IS}} \cdot \ln \left[ \frac{D_{IS}}{D_R} \right] + \frac{1}{\alpha_A \cdot D_{IS}}} \quad (1.5)$$

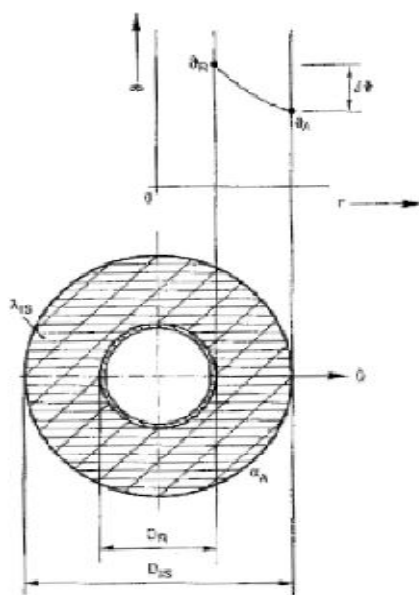
όπου

$Q_1$ : η αναγκαία παροχή θερμότητας [W], L: το μήκος του σωλήνα [m],  $\theta_R$ : η θερμοκρασία του σωλήνα [°C],  $\theta_A$ : η θερμοκρασία περιβάλλοντος ή εξωτερική θερμοκρασία [°C],  $\theta_R - \theta_A = \Delta\theta =$  η διαφορά θερμοκρασίας [°K],  $\lambda_{IS}$ : η θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης [W/ mK],  $D_{IS}$ : η εξωτερική διάμετρος της μόνωσης [m],  $D_R$ : η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα [m],  $\alpha_A$ : ο συντελεστής μεταφοράς



θερμότητας [ $W/m^2K$ ] και 1,43: ο συντελεστής  $z=1,43$ , καλύπτει το 30% των θερμικών απωλειών που δεν υπεισέρχονται στην παραπάνω εξίσωση και υπολογίζονται θεωρητικά.

Η θερμότητα ανά μονάδα μήκους (Watt/μέτρο) που απαιτείται είναι σύμφωνα με την εξίσωση (1.5) συνάρτηση πολλών παραγόντων συμπεριλαμβανομένου του πάχους της μόνωσης, της διαμέτρου του αγωγού, και της διαφοράς θερμοκρασίας (βλ. σχ. 1.4-6). Ανάλογα με το αν η εγκατάσταση του συστήματος γίνεται σε εξωτερικό ή σε εσωτερικό χώρο η αναγκαία παροχή θερμότητας μπορεί να διαφοροποιείται περαιτέρω (π.χ. σε εξωτερικούς χώρους λαμβάνεται υπόψη και η ταχύτητα του αέρα, η οποία επηρεάζει και την τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας).



*Σχήμα 1.4-6: Σωλήνας στον οποίο περιμετρικά έχει τοποθετηθεί μόνωση. Έχουν σημειωθεί όλοι οι παράμετροι που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της αναγκαίας παροχής θερμότητας από το θερμικό καλώδιο ενώ πάνω δεξιά απεικονίζεται ποιοτικά η γραφική παράσταση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ σωλήνα και εξωτερικού περιβάλλοντος.*

### Επιτρεπτότητα για θερμικές απώλειες που δεν μπορούν να υπολογιστούν με βεβαιότητα

Όπου εφαρμόζεται μόνωση, προκύπτουν πάντοτε διακυμάνσεις ως αποτέλεσμα των επιμέρους κενών και των αλλαγών στο πάχος της και στη θερμική αγωγιμότητα  $\lambda$ . Επίσης, είναι σχεδόν αδύνατο να υπολογιστούν με ακρίβεια οι θερμικές απώλειες που δημιουργούνται από φλάντζες, βαλβίδες και υπόλοιπα ανομοιόμορφα εξαρτήματα σωληνώσεων. Για να καλυφθούν αυτές οι επιπρόσθετες απώλειες, ένας συντελεστής επιτρεπτότητας  $z=1,43$  εισάγεται στην παραπάνω εξίσωση για να αυξήσει την υπολογισμένη απώλεια θερμότητας κατά 30%.

Διάφορες τιμές για τον συντελεστή επιτρεπτότητας  $z$  σε σχέση με το ποσοστό των επιπρόσθετων απωλειών θερμότητας που καλύπτεται σε κάθε περίπτωση, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

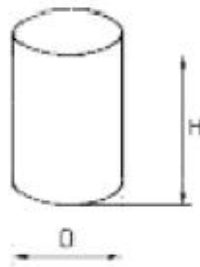
**Πίνακας 1.4-1:** Συντελεστής επιτρεπτότητας για διαφορετικές εκτιμήσεις απωλειών θερμότητας

Απώλειες θερμότητας (%)	0	10	15	20	25	30	35	40
Συντελεστής z	1	1,11	1,18	1,25	1,33	1,43	1,54	1,67

#### 1.4.4.1-2 Συστήματα θερμικής ιχνηλάτησης δεξαμενών για σταθεροποίηση της θερμοκρασίας

Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.4-7, το εμβαδόν της επιφάνειας μιας κυλινδρικής δεξαμενής υπολογίζεται από την εξίσωση:

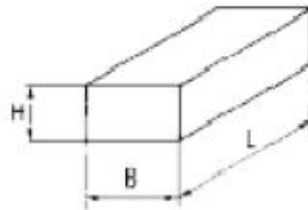
$$A = \pi \cdot D \cdot (D/2 + H) \quad (1.6)$$



**Σχήμα 1.4-7:** Κυλινδρική δεξαμενή.

Αντίστοιχα στο το εμβαδόν της επιφάνειας μιας κυβικής δεξαμενής (Σχ. 1.4-8) δίνεται από τη εξίσωση:

$$A = 2 \cdot [(B \cdot L) + (L \cdot H) + (B \cdot H)] \quad (1.7)$$



**Σχήμα 1.4-8:** Κυβική δεξαμενή.

Όπως η απλοποιημένη εξίσωση (1.5) για συστήματα Ε.Τ.Η. σωλήνων, η εξίσωση (1.8) που ακολουθεί, δίνει τη θερμότητα που απαιτείται για θέρμανση δεξαμενών ως συνάρτηση του εμβαδού της επιφάνειας της δεξαμενής, τη διαφορά θερμοκρασίας, του μονωτικού υλικού και του πάχους της μόνωσης. Η εξίσωση έχει ως εξής:

$$Q_2 = \frac{A \cdot (\theta_B - \theta_A) \cdot 1,43}{\frac{D_{IS}}{\lambda_{IS}} + \frac{1}{a_A}} \quad (1.8)$$

όπου

$Q_2$ : η αναγκαία παροχή θερμότητας [W], L: το μήκος του σωλήνα [m],  $\theta_B$ : η θερμοκρασία του σωλήνα [°C],  $\theta_A$ : η θερμοκρασία περιβάλλοντος ή εξωτερική θερμοκρασία [°C],  $\theta_B - \theta_A = \Delta\theta =$  η διαφορά θερμοκρασίας [K],  $\lambda_{IS}$ : η θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης [W/mK],  $D_{IS}$ : η εξωτερική διάμετρος της μόνωσης [m],

$\alpha_A$ : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] και 1,43: ο συντελεστής  $z=1,43$ , καλύπτει το 30% των θερμικών απωλειών που δεν υπεισέρχονται στον υπολογισμό θεωρητικά

#### **1.4.4.1-3 Καθορισμός της απαιτούμενης παροχής θερμότητας για αύξηση της θερμοκρασίας**

Σε ορισμένες εφαρμογές, είναι ανάγκη να μπορούμε να παρέχουμε θερμότητα σε μέσα που βρίσκονται σε σωλήνες ή δεξαμενές. Ορισμένα μέσα είναι αντλήσιμα μόνο πάνω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία (προβλήματα ιξώδους), και άλλα τείνουν να αποκρυσταλλώνονται κάτω από μια ορισμένη θερμοκρασία. Για να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία ενός συστήματος ωστόσο, ο υπολογισμός του ποσού θερμότητας που απαιτείται για μια δεδομένη αύξηση της θερμοκρασίας, μπορεί να γίνει με την ακόλουθη σχέση:

$$Q_3 = \Delta\theta \cdot 0,278 \cdot (M_1 \cdot c_{p1} + M_2 \cdot c_{p2}) / t \quad (1.9)$$

$Q_3$ : η θερμότητα (σε W) που απαιτείται για θέρμανση στην επιθυμητή θερμοκρασία για χρονικό διάστημα μίας ώρας,  $t$ : χρόνος παροχής θερμότητας σε ώρες [h],  $M_1$ : ποσότητα του μέσου που θερμαίνεται [kg],  $M_2$ : μάζα του σωλήνα ή της δεξαμενής που θερμαίνεται [kg],  $c_{p1}$ : η ειδική θερμοχωρητικότητα του μέσου [ $\text{kJ}/\text{kgK}$ ],  $c_{p2}$ : η ειδική θερμοχωρητικότητα του σωλήνα ή της δεξαμενής [ $\text{kJ}/\text{kgK}$ ],  $\Delta\theta$ : η διαφορά θερμοκρασίας με την οποία πρέπει να θερμανθούν το μέσο και ο σωλήνας ή η δεξαμενή [K] και  $0.278 \cdot \text{kJ} = \text{Wh}$ .

Εάν ένα μέσο πρέπει επίσης να λιώσει, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη και η θερμότητα τήξης του (*heat of fusion*).

#### **1.4.4.1-4 Συνολική ποσότητα θερμότητας για σταθεροποίηση και αύξηση της θερμοκρασίας**

Η συνολική θερμότητα  $Q_{tot}$  για συστήματα θέρμανσης σωληνώσεων, λαμβάνεται με πρόσθεση των απαιτήσεων θερμότητας που υπολογίστηκαν στις προηγούμενες εξισώσεις (1.5) και (1.9):

$$Q_{tot} = Q_1 + Q_3 \quad (1.10)$$

Αντίστοιχα η συνολική θερμότητα  $Q_{tot}$  για δεξαμενές λαμβάνεται με πρόσθεση των απαιτήσεων θερμότητας που υπολογίστηκαν στις προηγούμενες εξισώσεις (1.8) και (1.9):

$$Q_{tot} = Q_2 + Q_3 \quad (1.11)$$

#### **1.4.4.2 Επιπρόσθετα στοιχεία της εγκατάστασης των συστημάτων E.T.H.**

##### **1.4.4.2-1 Καθορισμός σημείων σύνδεσης**

Ο καθορισμός των σημείων σύνδεσης του κυκλώματος είναι πολύ σημαντικός όταν σχεδιάζονται και εγκαθίστανται E.T.H. συστήματα. Ανεξάρτητα από το αν πρόκειται να εγκατασταθεί ένα αυτορυθμιζόμενο ή ένα συμβατικό θερμικό καλώδιο (καλώδιο σταθερής θερμικής ισχύος), τα σημεία σύνδεσης και, ως εκ τούτου, οι θέσεις των κουτιών σύνδεσης πρέπει να είναι γνωστά πριν από την έναρξη της εγκατάστασης των καλωδίων.

##### **1.4.4.2-2 Παράλληλη εγκατάσταση στους σωλήνες**

Τα θερμικά καλώδια συνήθως εγκαθίστανται παράλληλα στους σωλήνες. Αυτός ο τύπος εγκατάστασης παρέχει τη δυνατότητα να αφαιρούνται και να αντικαθίστανται ατομικά τμήματα του σωλήνα και εξαρτήματα ανά πάσα στιγμή. Στην περίπτωση αυτή, προκειμένου να διεκπεραιωθεί το έργο συντήρησης, είναι αρκετό να αφαιρεθεί η μόνωση και το θερμικό καλώδιο τοπικά. Εάν το καλώδιο είναι εγκατεστημένο σπειροειδώς, τόσο η μόνωση όσο και το καλώδιο πρέπει να απομακρυνθούν συνολικά από τον σωλήνα.

##### **1.4.4.2-3 Διαφορετικές διαμέτροι σωλήνων και διαχωρισμός σε διαφορετικά κυκλώματα θέρμανσης**

Λεπτομερής γνώση της διαδικασίας είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό και την διαίρεση ενός δεδομένου έργου σε επιμέρους κυκλώματα θέρμανσης και επιπλέον είναι απαραίτητο ο μηχανικός να είναι εξοικειωμένος με την πορεία της ροής του προς επεξεργασία υγρού μέσου. Πολλές φορές είναι απαραίτητη η πρόβλεψη για αποσύνδεση ορισμένων διακλαδώσεων του κύριου συστήματος σωληνώσεων με μηχανισμούς απομόνωσης.

Ένα σύστημα σωληνώσεων το οποίο αποτελείται από σωλήνες διαφορετικής διατομής, δεν πρέπει ποτέ να θερμαίνεται σαν ένα ενιαίο και ομοιόμορφο σύστημα. Οι διαφορετικές διατομές έχουν διαφορετικές απώλειες θερμότητας, γεγονός που καθιστά πιθανόν δύσκολο να επιτευχθεί σταθεροποίηση ή αποτελεσματικός έλεγχος της θερμοκρασίας με ένα ενιαίο κύκλωμα θέρμανσης.

Σε αυτή την περίπτωση, είναι αναγκαίο να εγκαθίστανται δύο τουλάχιστον ανεξάρτητα κυκλώματα θέρμανσης και ελέγχου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό ειδικά εάν απαιτούνται ελάχιστες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

Σε εξαιρετικές περιπτώσεις, όπου η ακρίβεια στη θερμοκρασία είναι δευτερεύουσας σημασίας ή οι θερμοκρασίες λειτουργίας του συστήματος είναι χαμηλές (π.χ. αντιπαγωτική προστασία) και χρησιμοποιούνται σωλήνες μικρού μήκους, το πάχος της μόνωσης μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με τη διάμετρο του εκάστοτε σωλήνα. Ο σωλήνας με την μεγαλύτερη διατομή (προκαθορισμένη διάμετρος και πάχος της μόνωσης) αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό των απωλειών. Η υπολογιζόμενη θερμική (ή θερμαντική) ικανότητα στη συνέχεια χρησιμοποιείται ως βάση για τον υπολογισμό του απαιτούμενου πάχους μόνωσης για τους σωλήνες με διαφορετική διάμετρο.

#### 1.4.4.2-4 Ειδική μέριμνα για τις ηλεκτρικές παραμέτρους της εγκατάστασης

Κάθε εγκατάσταση θερμικού καλωδίου πρέπει να διαθέτει κάποια μορφή προστασίας από υπερεντάσεις με στοιχεία όπως είναι οι μικροαυτόματοι διακόπτες κυκλωμάτων ή οι ασφάλειες. Για τα θερμικά καλώδια σταθερής παραγωγής θερμότητας και τα ορυκτής μόνωσης, το συνολικό φορτίο του θερμικού καλωδίου μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{Συνολικό φορτίο (Amps)} = \frac{\text{Μήκος καλωδίου}(m) \times \text{Watt} / m}{\text{Εφαρμοζόμενη τάση (V)}} \quad (1.12)$$

Για τα αυτορυθμιζόμενα θερμικά καλώδια το συνολικό φορτίο υπολογίζεται με διαφορετικό τρόπο. Όταν εφαρμόζεται τάση στο αυτορυθμιζόμενο θερμικό καλώδιο, αυτό υπόκειται σε μια απότομη αύξηση του ηλεκτρικού του φορτίου. Αυτή η απότομη αύξηση γενικά ονομάζεται απορροφούμενη ένταση ρεύματος εκκίνησης. Η τιμή του ρεύματος απορρόφησης κατά την εκκίνηση εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία ενεργοποιείται το καλώδιο. Για να υπολογιστεί το συνολικό φορτίο, χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$\text{Συνολικό φορτίο (Amps)} = \text{Απορροφούμενη ένταση ρεύματος} \times \text{μήκος καλωδίου (m)} \quad (1.13)$$

Όταν επιλέγονται μικροαυτόματοι διακόπτες κυκλώματος σαν στοιχεία για προστασία από υπερεντάσεις σε εγκαταστάσεις που γίνεται χρήση αυτορυθμιζόμενων θερμικών καλωδίων θα πρέπει να είναι κατάλληλου τύπου. Αυτό ελαχιστοποιεί την πιθανότητα να υποστούν κάποια βλάβη, όταν το καλώδιο πρόκειται να ενεργοποιηθεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από την κανονική.

Μια συσκευή διακοπής σε περίπτωση σφάλματος προς γη (Ground Fault Interrupter (GFI)) πρέπει να τοποθετείται επιπλέον στο κύκλωμα σαν επιπρόσθετη προστασία. Όπου απαιτείται σύνδεση ως προς γη για την κανονική λειτουργία του GFI, το καλώδιο θα πρέπει να διαθέτει έναν μεταλλικό εξωτερικό μανδύα.

#### 1.4.4.2-5 Έλεγχος του συστήματος E.T.H.

Ένα ευρύ φάσμα συστημάτων ελέγχου μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση συστημάτων ηλεκτρικής θερμικής ιχνηλάτησης σωληνώσεων. Ο έλεγχος βασίζεται σε δύο διαφορετικές περιοχές, της θερμοκρασίας του σωλήνα ή/και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος γύρω από την εγκατάσταση.

Οι αισθητήρες περιβάλλοντος χρησιμοποιούνται πιο συχνά στις εφαρμογές αντιπαγωγικής προστασίας. Η τοποθέτηση αισθητήρα επάνω στον σωλήνα γίνεται ευρέως σε εφαρμογές που εκτείνονται από την αντιπαγωγική προστασία μέχρι τις διαδικασίες συντήρησης θερμοκρασίας. Αποτελεσματικός έλεγχος της θερμοκρασίας του συστήματος σωληνώσεων εξαρτάται άμεσα από την τοποθέτηση του αισθητήρα. Οι αισθητήρες που αφορούν την θερμοκρασία περιβάλλοντος πρέπει να τοποθετούνται εκεί που αναμένεται η χαμηλότερη θερμοκρασία. Οι αισθητήρες που τοποθετούνται επάνω στους σωλήνες δεν πρέπει να βρίσκονται σε σημεία που υπάρχει διακοπή της θερμομόνωσης, αλλά στα πιο αντιπροσωπευτικά σημεία ολόκληρου του συστήματος σωληνώσεων.

Όταν τοποθετείται ένας ελεγκτής θερμοκρασίας, το συνολικό φορτίο του συστήματος του θερμικού καλωδίου που ελέγχεται από αυτόν, δεν μπορεί να υπερβαίνει την

ονομαστική ένταση ρεύματος του ελεγκτή. Στην περίπτωση που η συνολική απορροφούμενη ένταση του συστήματος ξεπεραστεί, τότε απαιτείται μια επιπλέον βοηθητική επαφή που θα ελέγχει την ισχύ στο σύστημα του θερμικού καλωδίου.

Παρακολούθηση της τάσης του κυκλώματος ή της συνέχειας εφαρμόζεται συνήθως σε θερμικά καλώδια παράλληλου κυκλώματος, ενώ παρακολούθηση του ρεύματος προσφέρεται για θερμικά καλώδια κυκλώματος σε σειρά. Παρακολούθηση της θερμοκρασίας μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους καλωδίων, δεδομένου ότι εν γένει αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο.

#### **1.4.4.2-6 Πτώση τάσης κατά μήκος των καλωδιώσεων σύνδεσης του μετ/στη με τα θερμικά καλώδια**

Σε αρκετές περιπτώσεις είναι απαραίτητη η τοποθέτηση ενός μετασχηματιστή ισχύος, προκειμένου να μπορεί να ικανοποιηθεί η ονομαστική τάση λειτουργίας του συστήματος θερμικών καλωδίων που εγκαθίστανται. Μια πτώση τάσης της τάξης των 3-5% είναι συνήθως επιτρεπτή στην καλωδίωση από τον μετασχηματιστή ισχύος προς το θερμικό καλώδιο. Η υπερβολική πτώση τάσης μπορεί συχνά να προβλεφθεί με έναν από τους παρακάτω δύο τρόπους στο σχεδιασμό της εγκατάστασης:

- 1) ρύθμιση των τυλιγμάτων (taps) του μετασχηματιστή, ώστε η τάση που εφαρμόζεται στο θερμικό καλώδιο να είναι η ονομαστική τάση λειτουργίας,
- 2) να γίνει χρήση θερμικού καλωδίου με χαμηλότερη ονομαστική τάση για να αντισταθμίσει την πτώση τάσης των καλωδίων που συνδέονται σε αυτό.

#### **1.4.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ELECTRICAL TRACE HEATING (E.T.H)**

Το E.T.H. είναι ένα σύστημα θέρμανσης το οποίο εφαρμόζεται σε μια εγκατάσταση με στόχο να εκπληρώσει μια από τις δύο παρακάτω βασικές λειτουργίες:

α) Την αντιπαγωτική προστασία

β) Τη διατήρηση (ή αύξηση) της θερμοκρασίας σε σωλήνες, λέβητες, δεξαμενές, αντλίες και παρεμφερή εξοπλισμό βιομηχανικών διαδικασιών και εφαρμογών.

Τα E.T.H. χρησιμοποιούνται για την διατήρηση συγκεκριμένων θερμοκρασιακών ορίων ώστε να καλύψουν διαφορετικές ανάγκες στις διάφορες βιομηχανίες: πετρελαίου και φυσικού αέριου, πετροχημικών, ειδικών χημικών, χαρτοπολτού και χαρτιού, και διαφόρων φαρμακευτικών προϊόντων.

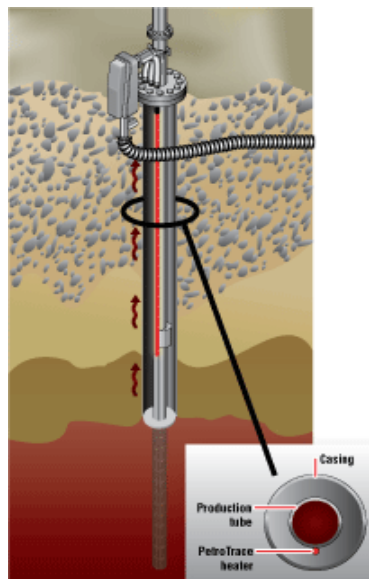
Η θέρμανση μεγάλων αγωγών για την διατήρηση θερμοκρασιών με πιο συνήθη στόχο τον έλεγχο του ιξώδους αποτελούν χαρακτηριστικές εφαρμογές τέτοιων συστημάτων. Αυτές οι εφαρμογές απαιτούν σημαντικά ηλεκτρικά φορτία, τα οποία συχνά τροφοδοτούνται από μια μόνο ηλεκτρική πηγή τροφοδοσίας. Πολύ μεγάλες γραμμές μεταφοράς είναι συνήθως γραμμές από μονάδες επεξεργασίας προς μονάδες αποθήκευσης. Δεξαμενές, προβλήτες για τα σκάφη θαλάσσιας μεταφοράς, καθώς και σωλήνες μεταξύ πετροχημικών εγκαταστάσεων αποτελούν περιπτώσεις εφαρμογής συστημάτων E.T.H. Στη συνέχεια δίνονται οι κυριότερες εφαρμογές συστημάτων E.T.H.

#### 1.4.5.1 Θέρμανση εξόρυξης σωληνώσεων πετρελαίου (Downhole Heating)

Τα τελευταία χρόνια, ολοένα και περισσότερες εταιρείες πετρελαίου σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιούν σε αρκετές περιπτώσεις συστήματα θέρμανσης ως ένα ισχυρό εργαλείο για την διευκόλυνση απάντλησης του πετρελαίου και κατ' επέκταση τη βελτίωση της παραγωγής, την εξάλειψη της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας, και την επιμήκυνση της ζωής του πηγαδιού άντλησης. Συστήματα θέρμανσης χρησιμοποιούνται για την αύξηση της θερμοκρασίας του πετρελαίου που μεταφέρεται σε έναν αγωγό ώστε να μειώσουν το ιξώδες του, στην περίπτωση εφαρμογών εξόρυξης πετρελαίου, καθώς και να μειώσουν τον κίνδυνο σχηματισμού παραφίνης μέσα στο σωλήνα παραγωγής σε εφαρμογές διασφάλισης της ροής.

Μελέτες έχουν δείξει ότι η παροχή θερμότητας σε βαρέα έλαια μειώνει σημαντικά το ιξώδες του ελαίου, ενισχύοντας τη ροή του κατά μήκος του σωλήνα μεταφοράς, διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο τη παραγωγική διαδικασία.

Επιπλέον, η παραφίνη και άλλες ένυδρες ουσίες μπορούν να εμβάλουν ή να καθυστερήσουν την παραγωγή του πετρελαίου. Σε εφαρμογές διασφάλισης της ροής τα συστήματα θέρμανσης θερμικών καλωδίων σχεδιάζονται για να διατρέχουν εξωτερικά ή εσωτερικά τον σωλήνα παραγωγής αποτελώντας μια σταθερή πηγή θερμοκρασίας κατά μήκος του ώστε να αποφευχθούν οι κοστοβόρες διακοπές ή καθυστερήσεις της ροής λόγω της παραφίνης ή άλλων κατάλοιπων του πετρελαίου. Τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν την διατήρηση του σωλήνα παραγωγής πάνω από τους 85°C για μήκη μέχρι και 2000 m.



Σχήμα 1.4-9: Εγκατεστημένο θερμικό καλώδιο σε κάθετο σωλήνα απάντλησης πετρελαίου.

#### 1.4.5.2 Εφαρμογές σε παράκτιες εγκαταστάσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου

Παράκτιες πλατφόρμες, πλοία και πλωτές εξέδρες γεώτρησης απαιτούν συνήθως την εφαρμογή συστημάτων E.T.H. για τους ακόλουθους λόγους:

#### α) Αντιπαγωγική προστασία

Το 25% των γνωστών κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου βρίσκονται σε εξαιρετικά ψυχρά περιβάλλοντα και, επομένως, τα πλοία και οι πλατφόρμες που προορίζονται για τις περιοχές αυτές απαιτούν διάφορα επίπεδα προστασίας από τον πάγο.

#### β) Διατήρηση θερμοκρασιακών ορίων

Τα προϊόντα πετρελαίου και φυσικού αερίου απαιτούν E.T.H. για συντήρηση ενός συγκεκριμένου θερμοκρασιακού ορίου των αγωγών, των δεξαμενών και των άλλων μέσων στις ακόλουθες χαρακτηριστικές περιπτώσεις.

- Υψηλή περιεκτικότητα σε κηρό του αργού πετρελαίου
- Αγωγοί ατμών
- Πρόληψη από υγροποίηση στους αγωγούς φυσικού αερίου
- Θέρμανση για καταπολέμηση της συμπύκνωσης στους αγωγούς φυσικού αερίου



Σχήμα 1.4-10: Εφαρμογή E.T.H. σε σύστημα σωληνώσεων πλωτής εξέδρας γεώτρησης.

#### 1.4.5.3 Θέρμανση δεξαμενών

Σχεδόν κάθε μεγάλη βιομηχανική διαδικασία απαιτεί θέρμανση δεξαμενών με τον ένα ή τον άλλο τρόπο. Οι μεγάλες βιομηχανίες που διαθέτουν εκτεταμένες εγκαταστάσεις δεξαμενών συνήθως, είναι οι ακόλουθες:

- Δωλιστήρια και βιομηχανίες πετροχημικών
- Βιομηχανίες χαρτιού και χαρτοπολτού
- Μονάδες εξόρυξης
- Μονάδες παραγωγής τροφίμων
- Αεροδρόμια

Παραδείγματα προϊόντων που αποθηκεύονται και θερμαίνονται σε δεξαμενές μονάδων παραγωγής τροφίμων μπορεί να είναι η μελάσα, η σουκρόζη, η υγρή σοκολάτα, το άμυλο ενώ για μονάδες που φιλοξενούν υγρά καύσιμα, ένα ευρύ φάσμα υποπροϊόντων του πετρελαίου βρίσκουν εφαρμογή όπως, βενζίνη, νάφθα, λιπαντικά έλαια, κηροζίνη κ.α.



Ο υπολογισμός της θερμότητας που απαιτείται για τη θέρμανση δεξαμεμών διέπεται από φυσικούς νόμους που είναι διαφορετικοί από αυτούς για τους σωλήνες.

Κατά την εγκατάσταση θερμικών καλωδίων, η θερμοκρασία λειτουργίας, οι επιπλέον θερμικές απώλειες εξαιτίας διαφόρων ακροφυσίων, σωλήνων και παράθυρων ελέγχου, καθώς και το συνολικό μήκος του θερμικού καλωδίου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Συχνά είναι απαραίτητο να θερμαίνονται δεξαμενές που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση υγρών, τα οποία μειώνονται σταδιακά σε ποσότητα κατά τη διάρκεια μιας μακράς χρονικής περιόδου. Σε αυτές τις ειδικές περιπτώσεις (π.χ. από πετρέλαιο μέχρι υγρή σοκολάτα ή κάποιο άλλο μέσο που πρέπει να θερμαίνεται για να διατηρήσει το απαιτούμενο ιξώδες), η δεξαμενή χωρίζεται κάθετα σε επιμέρους τμήματα θέρμανσης. Κάθε τμήμα θέρμανσης ελέγχεται από ένα θερμοστάτη ελέγχου ή ασφάλειας. Δεδομένου ότι η δεξαμενή αδειάζει σταδιακά, τα τμήματα θέρμανσης που δεν χρειάζονται πια αποκόπτονται αυτόματα από την τροφοδοσία, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του τοίχου της δεξαμενής.

Η θέρμανση των δεξαμεμών είναι μια συνήθης πρακτική σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Η θερμότητα μπορεί να είναι απαραίτητη για να διατηρήσει το ιξώδες απάντλησης του μαζούτ ή των ρητινών, για την πρόληψη κρυσταλλικής καθίζησης (υδροξείδιο του νατρίου), για την προστασία από συγκέντρωση πάγου και για να διευκολύνει εν γένει τις διαδικασίες παραγωγής, καθώς και σε εκατοντάδες άλλες εφαρμογές.

Υπάρχει γενικά μια μεγάλη ποικιλία από λύσεις θερμικής ιχνηλάτησης για προστασία από πάγο και διατήρηση θερμοκρασίας υγρών σε μικρές, μεσαίου μεγέθους και μεγάλες βιομηχανικές δεξαμενές αποθήκευσης. Τυπικές εφαρμογές είναι οι εξής:

- Προστασία από τον πάγο υγρών με χαμηλό ή μέτριο ιξώδες (π.χ νερό ή αμμωνία)
- Διατήρηση θερμοκρασίας για υγρά με μέτριο ιξώδες (π.χ πετρέλαιο ή ιζήματα)
- Παρεμπόδιση κρυσταλλικής καθίζησης (π.χ καυστική σόδα)
- Πρόληψη συμπύκνωσης.

#### ***1.4.5.4 Εμπορικές και οικιακές εφαρμογές***

Καθώς αρχιτέκτονες και μηχανικοί κτηρίων υποχρεούνται ολοένα και περισσότερο από τους ισχύοντες κανονισμούς να αναζητούν ευκαιρίες ώστε να μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας, κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών παρατηρείται σταθερά σημαντική αύξηση της χρήσης συστημάτων θερμικής ιχνηλάτησης σε επιμέρους εμπορικές και κτηριακές εφαρμογές της καθημερινής ζωής.

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί μεγάλο βάρος στη μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται για τη θέρμανση και την ψύξη κτιριακών εγκαταστάσεων. Η δραστηριότητα αυτή είχε ως αποτέλεσμα η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή ζεστού νερού να καταλαμβάνει σήμερα μεγαλύτερη μερίδα στις ενεργειακές ανάγκες ενός κτηρίου. Έτσι, οποιαδήποτε εξοικονόμηση στη διανομή του ζεστού νερού θα έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στη συνολική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου.

Με την τοποθέτηση θερμικών καλωδίων στους σωλήνες ύδρευσης ενός κτιρίου, η ενέργεια που καταναλώνεται μπορεί να μειωθεί έως και 60% σε σχέση με την

ενέργεια που χρειάζεται ένα σύστημα επανακυκλοφορίας. Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν τις απώλειες θερμότητας μέσα από την μόνωση των σωληνώσεων και να διατηρούν συγκεκριμένες θερμοκρασίες σωληνώσεων για νεροχύτες, ντους, πλυντήρια πιάτων και ρούχων, κ.α.

Ακόμη μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> σε περίπτωση που η ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται στο σύστημα προέρχεται από οικολογικές πηγές ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά, μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

#### Αντιπαγωγική προστασία για στέγες και σωλήνες υδρορροών

Σε πολλές περιοχές του κόσμου, όπου για μεγάλα χρονικά διαστήματα επικρατούν άσχημες καιρικές συνθήκες, πολλά κτίρια είναι επιρρεπή στις ζημιές που προκαλούνται από τον σχηματισμό πάγου στους σωλήνες νερού. Κατά κύριο λόγο, οι ζημιές αυτές είναι είτε ραγίσματα των σωλήνων ή δομικές ζημιές λόγω του βάρους του πάγου και του χιονιού που δημιουργείται στην οροφή.

Στην αντιπαγωγική προστασία σωλήνων νερού χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο αυτορυθμιζόμενα θερμικά καλώδια τα οποία έχουν την δυνατότητα να ελέγχουν την θερμική ισχύ που παράγουν και την ενεργειακή κατανάλωση καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, με συνέπεια την μείωση του ενεργειακού κόστους του κτηρίου.

#### **1.4.5.5 Λοιπές εφαρμογές**

##### Ναυτιλιακές εφαρμογές

Το Ε.Τ.Η. χρησιμοποιείται σε πλήθος εφαρμογών στη βιομηχανία της ναυτιλίας, απαιτώντας ιδιαίτερη γνώση και εμπειρία. Ένα από τα κλασικά πεδία εφαρμογής των συστημάτων αυτών είναι σε καταστρώματα για τάνκερ που μεταφέρουν πετρέλαιο, χημικά προϊόντα, πίσσα και βρώσιμα έλαια. Σχεδιάζονται συστήματα αντιπαγωγικής προστασίας και διατήρησης θερμοκρασίας για:

- Γραμμές φορτοεκφορτώσεων
- Γραμμές καθαρισμού
- Γραμμές μαζούτ
- Δεξαμενές και δοχεία αποθήκευσης
- Γραμμές καθαρισμού καταστρώματος
- Γραμμές πυροπροστασίας



*Σχήμα 1.4-11: Κατάστρωμα τάνκερ με εγκατεστημένα θερμικά καλώδια.*

## 1.5 ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΑ

Τα θερμικά καλώδια ενός συστήματος Ε.Τ.Η. μπορεί να είναι είτε καλώδια κυκλώματος σειράς, είτε καλώδια παράλληλου κυκλώματος. Θερμικά καλώδια κυκλώματος σειράς χρησιμοποιούνται όταν τα μήκη του κυκλώματος υπερβαίνουν τα όρια των συμβατικών θερμικών καλωδίων παράλληλης αντίστασης και απαιτούν συνήθως μία μόνο πηγή τροφοδοσίας.

Τα θερμικά καλώδια μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις ξεχωριστές κατηγορίες. Αυτές οι κατηγορίες περιλαμβάνουν τα δύσκαμπτα θερμικά καλώδια ορυκτής μόνωσης μέχρι τα περισσότερα εύκαμπτα, επενδυμένα με πλαστικό πολυμερές υλικό θερμικά καλώδια. Κάθε τύπος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στη συνέχεια αναλύονται οι διαφορετικοί τύποι καλωδίων.

### 1.5.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

Πιο συγκεκριμένα οι τέσσερις τύποι καλωδίων που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι:

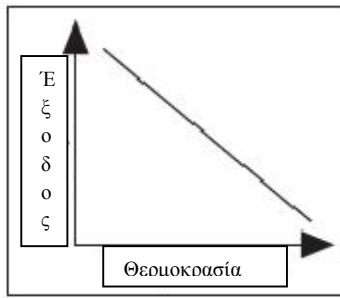
- Αυτορρυθμιζόμενα θερμικά καλώδια (Self-regulating heating cables): Συνήθως χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε θερμοκρασίες μέχρι και 150°C.
- Θερμικά καλώδια σταθερής θερμικής ισχύος κυκλώματος σειράς (Series circuit heating cables): Συνήθως χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε θερμοκρασίες μέχρι και 400°C.
- Θερμικά καλώδια σταθερής θερμικής ισχύος παράλληλου κυκλώματος ή παράλληλης ζώνης (Parallel circuit heating cables): Συνήθως χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε θερμοκρασίες μέχρι και 425°C.
- Θερμικά καλώδια ορυκτής μόνωσης (Mineral insulated heating cables): Συνήθως χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε θερμοκρασίες μέχρι και 650°C.

Τα αυτορρυθμιζόμενα θερμικά καλώδια και τα καλώδια παράλληλης ζώνης σταθερής ισχύος είναι θερμικά καλώδια παράλληλου κυκλώματος. Αντίστοιχα τα θερμικά καλώδια ορυκτής μόνωσης και τα θερμικά καλώδια σταθερής ισχύος σε σειρά είναι θερμικά καλώδια κυκλώματος σε σειρά.

Στα Ε.Τ.Η. συστήματα κυκλώματος σε σειρά εντάσσεται και το σύστημα ηλεκτρικής θερμικής ιχνηλάτησης που κάνει χρήση του επιδερμικού φαινομένου σε αγωγούς και το οποίο έχει το μεγάλο πλεονέκτημα, ότι μπορούν να καλυφθούν μεγάλες αποστάσεις, μέχρι και 20km, με ένα μόνο σημείο τροφοδοσίας.

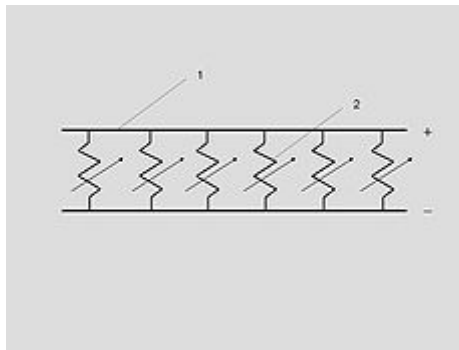
#### 1.5.1.1 Αυτορρυθμιζόμενα θερμικά καλώδια (Self-regulating heating cables)

Τα αυτορρυθμιζόμενα θερμικά καλώδια είναι η πιο πρόσφατη τεχνολογία στα προϊόντα ηλεκτρικών θερμικών καλωδίων. Το πρώτο θερμικό καλώδιο τέτοιου είδους εισήχθη στις βιομηχανικές και εμπορικές αγορές περίπου το 1970. Έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για να προσαρμόζουν αυτόματα την παραγόμενη ισχύ τους με στόχο να αντισταθμίζουν τις αλλαγές της θερμοκρασίας. Η γενική αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο ότι καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται στον σωλήνα ή στο γύρω περιβάλλον, η θερμική ισχύς εξόδου του καλωδίου μειώνεται και το αντίστροφο συμβαίνει όταν η θερμοκρασία πέφτει (Σχ. 1.5-1).



**Σχήμα 1.5-1:** Ποιοτική γραφική παράσταση της βασικής αρχής λειτουργίας των αυτορρυθμιζόμενων θερμικών καλωδίων.

Αυτή η χαρακτηριστική ιδιότητα προσδίδεται σε αυτό το είδος θερμικών καλωδίων από έναν ημιαγώγιμο πολυμερή πυρήνα που αποτελεί ουσιαστικά το αυτορρυθμιστικό στοιχείο του καλωδίου. Με όρους ηλεκτρολογίας, ο αυτορρυθμιζόμενος πυρήνας είναι στην ουσία ένας άπειρος αριθμός από παράλληλες μεταβλητές αντιστάσεις (Σχ. 1.5-2).



**Σχήμα 1.5-2:** Πυρήνας αυτορρυθμιζόμενων θερμικών καλωδίων: Ουσιαστικά είναι ένας μεγάλος αριθμός από παράλληλες μεταβλητές αντιστάσεις.

### Δομή αυτορρυθμιζόμενων θερμικών καλωδίων

Αποτελούνται από δύο παράλληλους αγωγούς οι οποίοι συνδέονται στην πηγή τροφοδοσίας και μεταφέρουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Οι δύο αυτοί αγωγοί βρίσκονται μέσα σε έναν ημιαγώγιμο πλαστικό πολυμερή πυρήνα, που αποτελεί το θερμαντικό στοιχείο. Γύρω από τον πυρήνα υπάρχει επίσης ένα εσωτερικό στρώμα ηλεκτρικής μονώσεως που χωρίζει τους δύο αγωγούς από την πλεξούδα γείωσης. Εξωτερικά των καλωδίων υπάρχει συνήθως ένας εξωτερικός μανδύας από φθοροπολυμερές ή πολυολεφίνη.

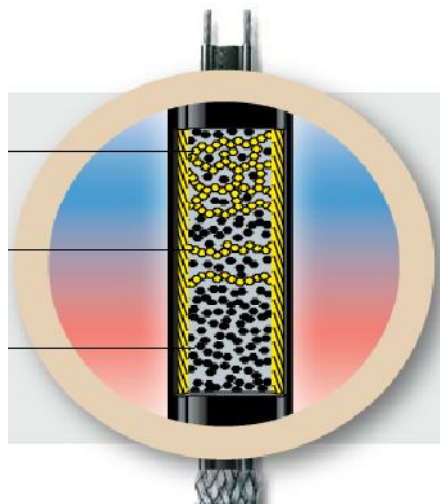


**Σχήμα 1.5-3:** Αυτορρυθμιζόμενο θερμικό καλώδιο.

Το υλικό του πυρήνα αποτελείται από σωματίδια άνθρακα, τα οποία βρίσκονται σε επαφή με τους δύο παράλληλους αγωγούς και δημιουργούν τα μονοπάτια ρεύματος κατά μήκος του καλωδίου, συνθέτοντας με αυτόν τον τρόπο ένα απείρως παράλληλο

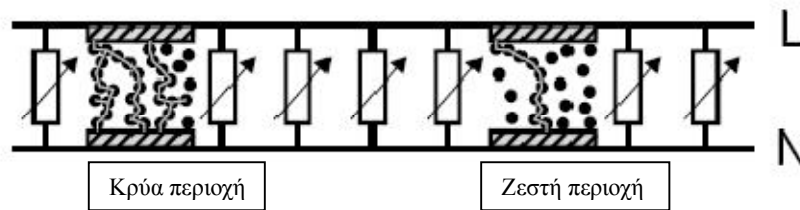
ηλεκτρικό κύκλωμα. Στους δύο αγωγούς εφαρμόζεται μια τάση από μια κατάλληλη παροχή ρεύματος έτσι ώστε να προκαλέσει ροή ρεύματος μέσα από το υλικό και αυτό να επιδράσει περιοριστικά ή ενισχυτικά σε ανταπόκριση στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, παράγοντας την απαιτούμενη θερμότητα. Οι δύο αυτοί αγωγοί είναι κατασκευασμένοι στις περισσότερες περιπτώσεις από χαλκό και εκτείνονται παράλληλα σε κοντινή απόσταση κατά μήκος του καλωδίου για την μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος.

Καθώς η θερμοκρασία περιβάλλοντος μειώνεται, ο πυρήνας συστέλλεται μικροσκοπικά και τα σωματίδια του υλικού πυκνώνουν σταδιακά μεταξύ τους. Τότε ο αριθμός των ηλεκτρικών μονοπατιών μέσα στον πυρήνα αυξάνεται και έτσι παράγεται περισσότερη θερμότητα. Αντίθετα, καθώς η θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξάνεται, ο πυρήνας ζεσταίνεται και διαστέλλεται μικροσκοπικά, τα σωματίδια απομακρύνονται σταδιακά μεταξύ τους όλο και περισσότερο και διακόπτονται τα μονοπάτια του ηλεκτρικού ρεύματος. Σε αυτή τη περίπτωση παράγεται λιγότερη ή και καθόλου θερμότητα σε περίπτωση σημαντικής αύξησης της θερμοκρασίας, όπου κανένα μονοπάτι ρεύματος δεν δημιουργείται. Είναι προφανές ότι θερμικά καλώδια με διαφορετική περιεκτικότητα σε άνθρακα έχουν διαφορετική ικανότητα παραγωγής θερμότητας. Στο σχήμα 1.5-4 απεικονίζεται σχηματικά το πώς διαμορφώνεται το εσωτερικό του πυρήνα ανάλογα με το αν του τμήμα του σωλήνα που ακουμπάει είναι κρύο, ζεστό ή καυτό:



*Σχήμα 1.5-4: Σε ανταπόκριση στο κρύο, ο πυρήνας συστέλλεται μικροσκοπικά, ανοίγοντας ηλεκτρικά μονοπάτια. Αντίθετα σε ζεστό περιβάλλον ο πυρήνας ξεκινάει να διαστέλλεται μικροσκοπικά διακόπτοντας ολόένα και περισσότερα ηλεκτρικά μονοπάτια. Στην περίπτωση μεγάλης αύξησης της θερμοκρασίας όλα τα ηλεκτρικά μονοπάτια μεταξύ των δύο παράλληλων αγωγών διακόπτονται.*

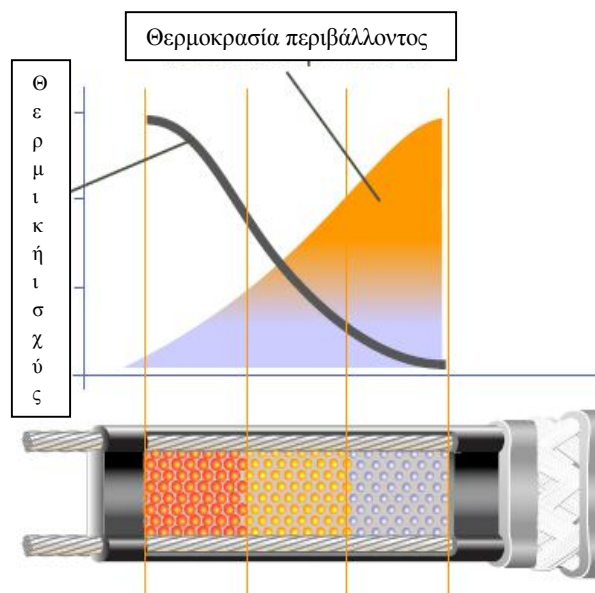
Ένα αυτορρυθμιζόμενο θερμικό καλώδιο προσαρμόζει την απόδοση θερμότητας σε όλο το μήκος του ανάλογα με τη θερμοκρασία που έχει σε κάθε σημείο (Σχ.1.5-5, 1.5-6) ο πυρήνας του θερμικού καλωδίου και αυτό είναι που το κάνει μια ασφαλή και αξιόπιστη λύση για πολλές εφαρμογές. Το φαινόμενο της αυτορρύθμισης έχει πολλές θετικές πτυχές, συμπεριλαμβανομένης και της μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας καθώς χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια όταν απαιτείται λιγότερη θερμότητα. Επομένως αυτό το είδος καλωδίων συντελεί στην μείωση του λειτουργικού κόστους μιας εγκατάστασης.



**Σχήμα 1.5-5:** Στην κρύα περιοχή έχουν δημιουργηθεί περισσότερα ηλεκτρικά μονοπάτια και έτσι παράγεται περισσότερη θερμότητα, σε αντίθεση με την ζεστή περιοχή όπου παράγεται λιγότερη.

Ο αυτορρυθμιζόμενος πυρήνας που αποτελεί ένα απείρως παράλληλο ηλεκτρικό κύκλωμα επιτρέπει στο καλώδιο να κοπεί σε οποιοδήποτε μήκος χωρίς αυτό να επηρεάζει τη λειτουργία του, καθιστώντας εύκολη την υλοποίηση ενός σχεδίου και την εγκατάστασή του.

Η ιδιότητα της αυτορρύθμισης επιτρέπει στο θερμικό καλώδιο να επικαλύπτεται πολλαπλά χωρίς να υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης. Επιπλέον καθώς το καλώδιο είναι εύκαμπτο καθιστά εύκολη την εφαρμογή του ειδικά σε περιπτώσεις που απαιτείται να εφαρμοστεί επάνω σε φλάντζες, βαλβίδες, στηρίγματα και γενικότερα σε ανομοιόμορφα στοιχεία ενός συστήματος σωληνώσεων.



**Σχήμα 1.5-6:** Η παραγωγή θερμότητας του καλωδίου ανάλογα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι διακυμάνσεις στη θερμοκρασία περιβάλλοντος αντισταθμίζονται αυτόματα σε όλο το μήκος του σωλήνα.

Η ανθεκτικότητα είναι επίσης ένα κύριο χαρακτηριστικό των αυτορρυθμιζόμενων θερμικών καλωδίων. Ο εξωτερικός μανδύας από φθοροπολυμερές από τον οποίον καλύπτονται συνήθως, προσφέρει τόσο μηχανική (π.χ προστασία από την συνεχή τριβή) όσο και χημική αντοχή. Επιπλέον είναι ανθεκτικός τόσο στην παρουσία νερού όσο και στην υγρασία, πράγμα που τα καθιστά περισσότερο ασφαλή. Συνήθως υπάρχει επίσης εσωτερικά του εξωτερικού μανδύα του καλωδίου ένα μεταλλικό περίβλημα το οποίο μπορεί να παρέχει πρόσθετη μηχανική ή ηλεκτρική προστασία (πλεξούδα γείωσης), ιδιαίτερα όταν αυτό πρόκειται να τοποθετηθεί σε μια επικίνδυνη περιοχή.

Τα αυτορυθμιζόμενα θερμικά καλώδια έχουν μια συγκεκριμένη θερμοκρασία έκθεσης η οποία εξαρτάται από τον τύπο του πολυμερούς που χρησιμοποιείται για να αποτελέσει τον πυρήνα θέρμανσης, πράγμα που σημαίνει ότι εάν εκτεθούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες το καλώδιο μπορεί να καταστραφεί ανεπανόρθωτα.

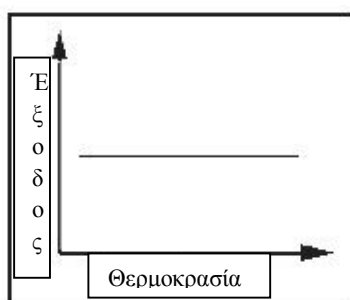
Στις περισσότερες περιπτώσεις (π.χ στην αντιπαγωγική προστασία) και όταν η θερμοκρασία του σωλήνα είναι χαμηλή επειδή του προσδίδεται λίγη ενέργεια, δεν χρειάζονται θερμοστάτες και ελεγκτές θερμοκρασίας και περιορισμού να παρακολουθούν το θερμικό καλώδιο, λόγω της ιδιότητας της αυτορρύθμισης. Ωστόσο, εάν το αυτορυθμιζόμενο θερμικό καλώδιο χρησιμοποιείται για τη θέρμανση σωλήνων σε γραμμές παραγωγής και να διατηρήσει τη θερμοκρασία εντός δεδομένων ελάχιστων και μέγιστων τιμών, η χρήση ενός θερμοστάτη ή ενός ελεγκτή θερμοκρασίας είναι απαραίτητη. Συνήθως και οι εγκαταστάσεις αντιπαγωγικής προστασίας είναι εξοπλισμένες με θερμοστάτες για την εξοικονόμηση ενέργειας.

Επιπλέον κατά την επιλογή μικροαυτόματων διακοπών υπερέντασης για αυτό το είδος θερμικών καλωδίων πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η ιδιότητα της αυτορρύθμισης, λόγω του ρεύματος εκκίνησης το οποίο έχουν και είναι διαφορετικό ανάλογα με την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι διακόπτες που επιλέγονται πρέπει να είναι κατάλληλοι για την απορροφημένη ένταση του καλωδίου κατά την εκκίνηση. Γι' αυτό το λόγο τόσο η θερμοκρασία εκκίνησης όσο και το μήκος του θερμικού καλωδίου που έχει εγκατασταθεί, πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την διαστασιολόγηση.

Αυτά τα καλώδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας υγρών σε σωλήνες, την πρόληψη της υποβάθμισης του υγρού ή τη διατήρηση της ρευστότητάς του. Το μέγιστο μήκος κυκλώματος για αυτό το είδος καλωδίων κυμαίνεται συνήθως από 50 έως 200 m.

### **1.5.1.2 Συμβατικά θερμικά καλώδια με σταθερή και συνεχή θερμική παροχή ανά μονάδα μήκους**

Τα θερμικά καλώδια σταθερής ισχύος χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές που απαιτείται μια συγκεκριμένη πυκνότητα θερμικής ισχύος κάθε στιγμή. Αποτελούν μια οικονομικότερη λύση λόγω της απλούστερης τεχνολογίας κατασκευής τους από τα αυτορυθμιζόμενα θερμικά καλώδια. Το χαρακτηριστικό της ενιαίας και ομοιόμορφης θερμότητας που παράγουν, ανεξάρτητα από τις μεταβολές της θερμοκρασίας στο γύρω περιβάλλον (Σχ. 1.5-7), καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη συστημάτων ελέγχου και περιορισμού της θερμοκρασίας ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες καταστάσεις υπερθέρμανσης.



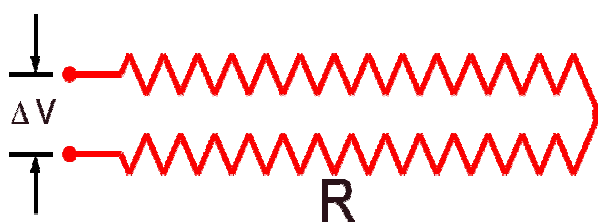
*Σχήμα 1.5-7: Γραφική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας των θερμικών καλωδίων σταθερής ισχύος: Σταθερή παραγωγή θερμότητας ανεξάρτητη από την θερμοκρασία.*

Τα καλώδια αυτά συνδυάζουν υψηλής ποιότητας υλικά και αποτελούν μια πολύ ανθεκτική κατασκευή σε μια αρκετά λογική τιμή. Μπορούν να παράγουν υψηλή θερμική ισχύ εξόδου και γι' αυτό είναι κατάλληλα για εφαρμογές θέρμανσης που απαιτούν υψηλότερη παροχή θερμότητας, όπως π.χ αντιπαγωτική προστασία. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τα θερμικά καλώδια κυκλώματος σειράς και τα θερμικά καλώδια παράλληλου κυκλώματος ή παράλληλης ζώνης.



Σχήμα 1.5-8: Θερμικό καλώδιο σταθερής ισχύος.

#### 1.5.1.2-1 Θερμικά καλώδια σταθερής ισχύος κυκλώματος σειράς (Series circuit heating cables)



Σχήμα 1.5-9: Μορφή κυκλώματος θερμικού καλωδίου σειράς

Ένα θερμικό καλώδιο σειράς αποτελείται από μια διαδρομή ενός καλωδίου υψηλής αντίστασης  $R$  (Σχ. 1.5-9), το οποίο είναι μονωμένο, και συχνά περικλείεται μέσα σε ένα προστατευτικό περίβλημα. Μπορεί να αποτελείται και από δύο ή περισσότερα στοιχεία αντίστασης συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν ένα κύκλωμα σειράς.

Αυτό το είδος των θερμικών καλωδίων διατίθεται συνήθως σε προκαθορισμένα, εργοστασιακά τυποποιημένα μήκη, τροφοδοτείται με μια συγκεκριμένη τάση και η αντίσταση  $R$  του σύρματος οδηγεί σε σταθερά επίπεδα παραγωγής θερμότητας κάποιας ονομαστικής τιμής. Τα θερμικά καλώδια σειράς χρησιμοποιούνται περισσότερο σε συστήματα 3-φάσεων για θέρμανση αγωγών μεγάλου μήκους.

Είναι διαθέσιμα με προαιρετικό κάλυμμα μεταλλικού σύρματος για αύξηση της μηχανικής και ηλεκτρικής προστασίας τους και για χρήση σε εκρηκτικά περιβάλλοντα.

Λόγω της σταθερής και συνεχούς παραγωγής θερμότητας η οποία είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, είναι απαραίτητη υπό κανονικές συνθήκες η χρήση συστημάτων παρακολούθησης και ελέγχου της θερμοκρασίας γι' αυτό το είδος θερμικών καλωδίων. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας γίνεται συνήθως από ένα θερμοστάτη ή με κατάλληλους αισθητήρες (όπως είναι οι αισθητήρες αντίστασης Pt-100) που



τοποθετούνται επάνω στο καλώδιο και που μπορούν να συνδυαστούν με αισθητήρα ρεύματος για την παρακολούθηση της αντίστασης και αμπερομετρικούς διακόπτες προστασίας σφάλματος ως προς γη.

Σε εγκαταστάσεις αντιπαγωγικής προστασίας, υπάρχει επίσης η δυνατότητα, αυτά τα θερμικά καλώδια να λειτουργούν με έναν ελεγκτή, ο οποίος χρησιμοποιεί τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ως είσοδο. Ακόμη και σε αυτές τις περιπτώσεις, η θερμοκρασία του σωλήνα θα πρέπει να παρακολουθείται και ενδεχομένως να περιορίζεται εφόσον η τήρηση της μέγιστης επιτρεπόμενης θερμοκρασίας της επιφάνειας του δεν είναι δυνατόν να επαληθεύεται από μια θερμική δοκιμή ρουτίνας.

Τα μειονεκτήματα αυτών των τύπων θερμικών καλωδίων σειράς είναι τα εξής:

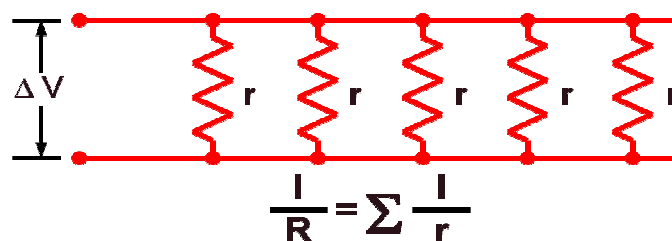
- α) αν επικαλυφθούν μεταξύ τους μπορούν να υπερθερμανθούν και ίσως και να καταστραφούν,
- β) παρέχονται σε συγκεκριμένα μήκη και δεν μπορούν να κοπούν ανάλογα με το επιθυμητό μήκος της εφαρμογής εξαιτίας του εν σειρά κυκλώματος, και επιπλέον,
- γ) φθορά σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της γραμμής του καλωδίου θα οδηγήσει πιθανόν σε καταστροφή του και θα καταστήσει άχρηστο ολόκληρο το καλώδιο, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η αφαίρεση και άμεση αντικατάσταση του.

Δύο ισχυρά πλεονεκτήματα είναι ότι είναι συνήθως φθηνά και επιπλέον όπως συμβαίνει και με τα θερμικά καλώδια ορυκτής μόνωσης, τα οποία είναι και αυτά καλώδια σειράς, μπορούν να εκτίθενται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

Τα θερμικά καλώδια κυκλώματος σειράς είναι διαθέσιμα για εφαρμογές σε θερμοκρασία λειτουργίας έως και 400°C και με ονομαστική θερμική ισχύ έως 150W/m. Τυπικές εφαρμογές αυτών των θερμικών καλωδίων σειράς είναι η θέρμανση σωληνώσεων σε εγκαταστάσεις μεγάλου μήκους, για παράδειγμα, σε σωλήνες μεταφοράς πετρελαίου μεγάλων αποστάσεων.

#### 1.5.1.2-2 Θερμικά καλώδια σταθερής ισχύος παράλληλου κυκλώματος ή παράλληλη ζώνης (Parallel circuit heating cables)

Λόγω του χαρακτηριστικού του παράλληλου κυκλώματος (Σχ. 1.5-10), η ισχύς εξόδου ανά μονάδα μήκους είναι σταθερή και συνεχής, ανεξάρτητα από το συνολικό μήκος του καλωδίου.

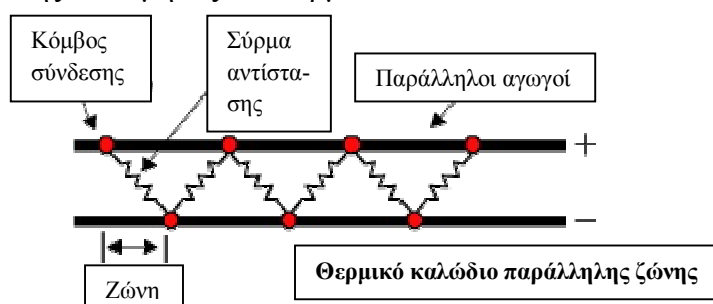


Σχήμα 1.5-10: Το εσωτερικό των θερμικών καλωδίων σταθερής ισχύος παράλληλης ζώνης είναι ουσιαστικά ένας άπειρος αριθμός από παράλληλες αντιστάσεις.

Τα σταθερής ισχύος θερμικά καλώδια παράλληλης ζώνης είναι κατασκευασμένα από ένα λεπτό μονό στοιχείο αντίστασης υπό μορφή σύρματος (resistor alloy heating element), περιτυλιγμένο γύρω από δύο μονωμένους παράλληλους αγωγούς οι οποίοι

εκτείνονται κατά μήκος του θερμικού καλωδίου και συνδέονται στην ηλεκτρική τροφοδοσία. Οι αγωγοί είναι συνήθως από χαλκό και περιβάλλονται από ένα μονωτικό κάλυμμα από κάποιο πλαστικό πολυμερές, στις περισσότερες περιπτώσεις από τεφλόν.

Σε προκαθορισμένα διαστήματα, η μόνωση αφαιρείται από τους δύο αγωγούς στις δύο πλευρές, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται εγκοπές στην μόνωση. Το σύρμα αντίστασης είναι σχεδιασμένο για να κάνει ηλεκτρική επαφή εναλλάξ με τους δύο αγωγούς σε αυτά τα διαστήματα (Σχ. 1.5-11), π.χ. η απόσταση των διαστημάτων αυτών μπορεί να είναι 600mm. Αυτές οι συνδέσεις γίνονται στα σημεία σύνδεσης όπου το θερμαινόμενο σύρμα αντίστασης νιχρωμίου (nickel-chrome resistance heating wire) είναι είτε συγκολλημένο είτε συνδέεται με πριτσίνια στους δύο παράλληλους αγωγούς σχηματίζοντας κυκλώματα παράλληλης αντίστασης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να σχηματίζεται μια ακολουθία παράλληλων ηλεκτρικών κυκλωμάτων θέρμανσης κατά μήκος του θερμικού καλωδίου.



*Σχήμα 1.5-11: Το σύρμα αντίστασης συνδέεται εναλλάξ στους δύο παράλληλους αγωγούς σχηματίζοντας παράλληλα κυκλώματα θέρμανσης κατά μήκος του καλωδίου. Στο σχήμα φαίνονται οι κόμβοι σύνδεσης του σύρματος στους δύο αγωγούς και το μήκος ζώνης.*

Η απόσταση μεταξύ των σημείων σύνδεσης, καθορίζει το μήκος της ζώνης θέρμανσης. Το μήκος αυτό δεν είναι τυποποιημένο αλλά μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τον εκάστοτε κατασκευαστή.

Η παράλληλη κατασκευή αυτών των θερμικών καλωδίων τους επιτρέπει να μπορούν να κόβονται στο επιθυμητό μήκος κάθε φορά, εντός των ορίων που επιβάλλονται από το μέγιστο μήκος του κυκλώματος θέρμανσης για το οποίο είναι κατασκευασμένο το συγκεκριμένο είδος καλωδίων (συνήθως 50 έως 100 m) και το ελάχιστο διάστημα σύνδεσης του σύρματος αντιστάσεως στους δύο παράλληλους αγωγούς.

Στην πράξη αυτό το είδος θερμικών καλωδίων είναι κατάλληλο για πολύπλοκα συστήματα αγωγών ή και για πολυσύνθετες διαδικασίες συντήρησης θερμοκρασιών, δεδομένου ότι νέα κομμάτια καλωδίων μπορούν να κοπούν και να προστεθούν στο πεδίο της εφαρμογής όπου και όποτε αυτό κριθεί σκόπιμο. Γενικά, προσφέρουν μια οικονομική εναλλακτική λύση, διατηρώντας παράλληλα τα πλεονεκτήματα των καλωδίων που μπορούν να κόβονται στο επιθυμητό μήκος. Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος σε σχέση με τα θερμικά καλώδια κυκλώματος εν σειρά είναι ότι αν ένα μικρό στοιχείο αποτύχει να λειτουργήσει ή καταστραφεί τότε το υπόλοιπο σύστημα θα συνεχίσει να λειτουργεί κανονικά, ενώ ένα μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι το μήκος του περιορίζεται από την απόσταση των εγκοπών, τα σημεία δηλαδή που γίνεται η ηλεκτρική επαφή του σύρματος αντιστάσεως με τους δύο παράλληλους αγωγούς. Και σε αυτόν τον τύπο, όπως και στα καλώδια σταθερής ισχύος κυκλώματος σειράς, εξακολουθεί να ανακύπτει το πρόβλημα της υπερθέρμανσης και της πιθανής καταστροφής σε περίπτωση

επικάλυψης, εκ των πραγμάτων όμως αποφεύγεται η επικάλυψη των θερμικών καλωδίων κατά την εγκατάσταση.

Λόγω αυτής της συνεχούς και σταθερής παραγωγής θερμότητας, η ονομαστική ένταση των αυτόματων διακοπών που χρησιμοποιούνται μπορεί να μειωθεί σε σύγκριση με τα αυτορυθμιζόμενα συστήματα θέρμανσης ενώ ανάλογα με την εφαρμογή, μπορεί να απαιτούνται πιο εξελιγμένα συστήματα ελέγχου. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας γίνεται συνήθως με τη χρήση θερμοστατών ή άλλων αισθητήρων (Pt-100) ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια πλεξούδα από χαλκό περιμετρικά του καλωδίου μαζί με έναν αμπερομετρικό διακόπτη προστασίας σφάλματος από διαρροή παρέχοντας τόσο ηλεκτρική, όσο και μηχανική προστασία.

Τα καλώδια παράλληλου κυκλώματος είναι κατάλληλα για εφαρμογές σε θερμοκρασίες έως 425°C και με πυκνότητα ισχύος εξόδου μέχρι και 130W/m.

### **1.5.1.3 Θερμικά καλώδια ορυκτής μόνωσης (Mineral insulated heating cables - M.I.)**

Είναι ίσως το πιο στιβαρό και ανθεκτικό είδος θερμικού καλωδίου, το οποίο έχει μεγάλη αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις και αντοχή στη διάβρωση από χημικές καταπονήσεις. Διαθέτει μη πολυμερή κατασκευή που του προσφέρει κάποια μοναδικά χαρακτηριστικά, σχετικά με τις θερμοκρασίες στις οποίες μπορεί να εκτίθεται, οι οποίες είναι πολύ μεγαλύτερες από τα θερμικά καλώδια που κατασκευάζονται με πολυμερή υλικά. Αυτά τα χαρακτηριστικά τα καθιστούν μία ελκυστική λύση για ορισμένες εφαρμογές E.T.H. σε πολύ σκληρά βιομηχανικά περιβάλλοντα που απαιτούν υψηλή παροχή θερμότητας, αφού μπορούν να έχουν πολύ υψηλή απόδοση σε Watt, και είναι ιδανικά για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες έως και 650°C.

Αυτά τα καλώδια σημειώνεται επίσης ότι έχουν μακρά ζωή, από την στιγμή της εγκατάστασης καθώς δεν περιέχουν οργανικά υλικά τα οποία μπορεί να φθαρούν με τον χρόνο. Είναι διαθέσιμα σε μορφή μονόκλωνων ή δίκλωνων καλωδίων (Σχ. 1.5-12).

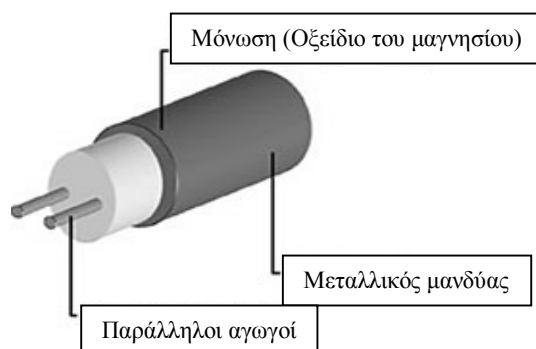


*Σχήμα 1.5-12: Μονόκλωνο και δίκλωνο θερμικό καλώδιο ορυκτής μόνωσης.*

#### Κατασκευή θερμικών καλωδίων ορυκτής μόνωσης

Τα θερμικά καλώδια ορυκτής μόνωσης αποτελούνται από έναν ή δύο συμπαγείς αγωγούς αντίστασης (μονόκλιωνα ή δίκλιωνα καλώδια) που εκτείνονται κατά μήκος του καλωδίου, ένα εξαιρετικά συμπιεσμένο μεταλλικό μονωτικό (ηλεκτρική μόνωση

ορυκτής σκόνης), καθώς και έναν εξωτερικό μεταλλικό μανδύα, ο οποίος μπορεί να είναι κατασκευασμένος από χαλκό, χαλκονικέλιο, ανοξείδωτο χάλυβα ή κάποιο κράμα νικελίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5-13. Τα κράματα νικελίου γενικά έχουν εξαιρετικά καλή αντίσταση στη διάβρωση, ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες.



Σχ. 1.5-13: Κατασκευή θερμικού καλωδίου ορυκτής μόνωσης: Παράλληλοι αγωγοί, μόνωση και εξωτερικός μανδύας.

#### α) Αγωγοί

Οι αγωγοί που επιλέγονται για τα θερμικά καλώδια ορυκτής μόνωσης είναι συνήθως από χαλκό ή νικέλιο, ή στις περισσότερες περιπτώσεις κάποιο κράμα αυτών, ανάλογα με την αντίσταση ανά μονάδα μήκους που απαιτείται και τις ιδιότητες του διηλεκτρικού που καθορίζει τη τελική διάμετρο του καλωδίου. Για τα περισσότερα κράματα η αντίσταση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η αντίσταση του καθαρού χαλκού για παράδειγμα, όταν συντηρεί ένα σωλήνα στους 200° C είναι περίπου δύο φορές η αντίστασή του σε θερμοκρασία δωματίου. Γενικότερα η αλλαγή της αντίστασης με τη θερμοκρασία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν σχεδιάζεται η εγκατάσταση θέρμανσης.

#### β) Διηλεκτρική μόνωση

Η ηλεκτρική μόνωση του καλωδίου μπορεί να είναι ένας αριθμός διαφορετικών κεραμικών κόνεων, όπως το οξείδιο του αργιλίου ή νιτρίδιο του βορίου, αλλά το οξείδιο του μαγνησίου (MgO) είναι με διαφορά το διηλεκτρικό που προτιμάται, διότι είναι άμεσα διαθέσιμο, φθινό και έχει καλές θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες όταν συμπιέζεται. Το συμπιεσμένο MgO έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα σε σύγκριση με άλλους τύπους μόνωσης και συνεπώς, η θερμότητα μεταφέρεται πιο γρήγορα έξω από το καλώδιο.

#### γ) Εξωτερικός μανδύας

Ενώ ένας εξωτερικός μανδύας από χαλκό μπορεί να χρησιμοποιείται για θερμικά καλώδια που λειτουργούν συνεχώς σε θερμοκρασίες 204°C ή λιγότερο, στις περισσότερες εφαρμογές διυλιστηρίων και πετροχημικών επιλέγονται πιο συχνά ο ανοξείδωτος χάλυβας ή ισχυρά κράματα νικελίου. Ωστόσο οι ανοξείδωτοι χάλυβες της σειράς 300 (όπως οι 304 και 316) είναι επιρρεπείς στη δημιουργία ρηγμάτων λόγω διάβρωσης (stress corrosion cracking) στην παρουσία χλωριδίων. Δεδομένου λοιπόν ότι οι περισσότερες από τις θερμικές μονώσεις περιέχουν χλωρίδια, τα κράματα 825 ή 600 χρησιμοποιούνται πιο συχνά ως υλικά του μανδύα για τα καλώδια ορυκτής μόνωσης στις βιομηχανίες.

Το διηλεκτρικό από οξείδιο μετάλλου (συνήθως MgO- οξείδιο του μαγνησίου), που αποτελεί την ηλεκτρική μόνωση, και το μεταλλικό περίβλημα είναι αμφότερα ανθεκτικά σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό καθιστά το συγκεκριμένο είδος

ιδανικό για εφαρμογές σε θερμοκρασίες πολύ πάνω από τα σημεία τήξης των καλωδίων πολυμερούς. Η κατασκευή τους, τους δίνει την ικανότητά να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η αντίσταση των αγωγών αυξάνει σε υψηλότερες θερμοκρασίες και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερη θερμική ισχύ εξόδου του καλωδίου. Υψηλότερης αντίστασης θερμικά καλώδια κατασκευάζονται από κράματα νιχρωμίου που μπορούν να λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, με πολύ μικρή αλλαγή στην ηλεκτρική τους αντίσταση. Χαμηλότερης αντίστασης θερμικά καλώδια κατασκευάζονται από κράματα χαλκού που έχουν χαμηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες λειτουργίας και επίσης μεγαλύτερη μεταβολή της αντίστασης με τη θερμοκρασία.

Τα θερμικά καλώδια ορυκτής μόνωσης παρέχονται τις περισσότερες φορές σαν εργοστασιακά τυποποιημένες κατασκευές. Δεδομένου λοιπόν ότι τα καλώδια αυτά είναι τύπου σειράς και δεν υπάρχει η δυνατότητα να κόβονται στο επιθυμητό μήκος, πρέπει να γίνεται εκ των προτέρων καλή προσέγγιση ή ακριβής μέτρηση των απαιτούμενων μηκών για την εφαρμογή. Επιπλέον τα καλώδια αυτά δεν είναι τόσο ευέλικτα όσο τα καλώδια πολυμερούς, και γι' αυτό πρέπει να σχεδιάζονται και να εγκαθίστανται με τρόπους που δεν θα υπόκεινται σε σημαντικές επαναλαμβανόμενες κάμψεις ή κυρτώσεις. Το καλώδιο θα απομακρυνθεί από την επιφάνεια του σωλήνα όταν περνά επάνω από τους συζευκτήρες (φλάντζες) και άλλες ανώμαλες επιφάνειες, ειδικά όταν η εγκατάσταση στο σωλήνα είναι χαλαρή. Τέλος, ελικοειδής τοποθέτηση των θερμικών καλωδίων ορυκτής μόνωσης γύρω από το σύστημα των σωληνώσεων καλό είναι να αποφεύγεται, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα δημιουργίας επαγωγικών ρευμάτων επάνω στους αγωγούς.

Η κυκλική γεωμετρία των M.I καλωδίων επιτρέπει μόνο επαπτομενική επαφή με το σωλήνα που θερμαίνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελάχιστη μεταφορά θερμότητας με αγωγή. Έτσι η απόδοση της μεταφοράς θερμότητας αυτού του είδους καλωδίων μπορεί να είναι μικρότερη από αυτή ενός θερμικού καλωδίου επίπεδης μορφής, εξαιτίας των περιορισμών που επιβάλλονται στο να μπορέσει να υπάρξει ακριβής επαφή ενός αντικειμένου κυκλικής διατομής επάνω σε ένα άλλο της ίδιας μορφής.

Τα μονόκλιωνα καλώδια έχουν μια απόληξη σε κάθε άκρο και γενικά πρέπει να σχηματιστούν φουρκέτες για να επιτραπεί να γίνουν οι συνδέσεις του κυκλώματος σε ένα μόνο άκρο του συστήματος σωληνώσεων. Τα δίκλιωνα καλώδια επιτρέπουν οι συνδέσεις της τροφοδοσίας να γίνουν στο ένα άκρο μόνο.

Όπως σε όλους τους τύπους θερμικών καλωδίων E.T.H., έτσι και εδώ είναι σημαντικό να είναι γνωστό εκ των προτέρων το μήκος του κυκλώματος της θερμικής εγκατάστασης, αφού για δεδομένο μήκος θα πρέπει να επιλεγεί καλώδιο με την κατάλληλη αντίσταση που θα δώσει την επιθυμητή παροχή θερμότητας. Τα θερμικά καλώδια ορυκτής μόνωσης καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από αντιστάσεις και μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μικρού και μεσαίου μήκους κυκλώματα έως εφαρμογές μερικών χιλιομέτρων. Η θερμότητα που παράγει το συγκεκριμένο είδος καλωδίων ανάλογα με το υλικό του εξωτερικού μανδύα είναι ενδεικτικά σε watts/μέτρο:

α) Για καλώδιο χαλκού (Cu) με μέγιστη θερμοκρασία επιφάνειας 200°C, μέχρι και 30 watts/μέτρο.

β) Για καλώδιο χαλκονικελίου (Cu-Ni) με μέγιστη θερμοκρασία επιφάνειας 400°C, μέχρι και 100 watts/μέτρο.

γ) Για καλώδιο από ανοξείδωτο χάλυβα με μέγιστη θερμοκρασία επιφάνειας 650°C, μέχρι και 225 watts/μέτρο.

Οι παραπάνω τιμές είναι ενδεικτικές και μπορεί να αποκλίνουν λίγο έως πολύ ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του καλωδίου που παρέχεται από την εκάστοτε κατασκευάστρια εταιρία και την εφαρμογή.

Ο έλεγχος με θερμοστάτη είναι συνήθης σε ένα τέτοιο σύστημα, ειδικά όταν λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον συνιστάται για όλα τα κυκλώματα θέρμανσης αυτού του είδους καλωδίων να προστατεύονται από βραχυκυκλώματα και ενδείκνυται η ύπαρξη εξοπλισμού προστασίας σφάλματος προς γη.

Τυπικές εφαρμογές των θερμικών καλωδίων ορυκτής μόνωσης αποτελούν οι εξής:

α) Εφαρμογές με ανάγκη σε υψηλή παροχή θερμικής ισχύος

Σωλήνες μεταφοράς πετρελαίου σε εξαιρετικά ψυχρά περιβάλλοντα ή σωλήνες μεγάλης διαμέτρου που απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες συντήρησης, απαιτούν επίσης περισσότερη θερμότητα από τα θερμικά καλώδια, ακόμη και αν γίνεται χρήση παχύτερης θερμικής μόνωσης. Τα θερμικά καλώδια ορυκτής μόνωσης μπορούν να παράγουν υψηλότερη ισχύ εξόδου λόγω της ανόργανης κατασκευής του και έχουν υψηλότερες τάξεις θερμοκρασίας, συγκριτικά με τα θερμικά καλώδια πολυμερούς κατασκευής. Ως εκ τούτου, η χρήση αυτού του είδους μπορεί να μειώσει τον αριθμό των περασμάτων σε έναν σωλήνα, σε σύγκριση με τα πολυμερή θερμικά καλώδια.

β) Αντιπαγωγική προστασία σε γραμμές υπέρθερμου ατμού

Ο υπέρθερμος ατμός που είναι παρόν στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας αγγίζει θερμοκρασίες πολύ πάνω από τα σημεία τήξης των θερμικών καλωδίων πολυμερούς κατασκευής. Οι εν λόγω γραμμές ατμού πρέπει να προστατεύονται από τον παγετό, όταν ο λέβητας κλείσει κατά τη διάρκεια πολικών καιρικών συνθηκών. Η συνηθέστερη μέθοδος θέρμανσης αυτών των σωλήνων υψηλών θερμοκρασιών είναι η τοποθέτηση θερμικού καλωδίου ορυκτής μόνωσης απευθείας επάνω στο σωλήνα.

### **1.5.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ - ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ**

Για να καθοριστεί πιο θερμικό καλώδιο είναι κατάλληλο για να χρησιμοποιηθεί σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή, πρέπει να γίνει ανάλυση πολλών παραμέτρων του ίδιου και της εγκατάστασης συνολικά. Αυτή η ανάλυση δεν θα καθορίσει μόνο την καταλληλότητα του προϊόντος για την εφαρμογή αλλά θα βοηθήσει τον ενδιαφερόμενο στην επιλογή της βέλτιστης λύσης με το πιο ευνοϊκό κόστος για εκείνον. Τα σημαντικότερα κριτήρια που πρέπει να εξετάσει κανείς κατά την εγκατάσταση των θερμικών καλωδίων ενός συστήματος Ε.Τ.Η. είναι τα εξής:

- *Μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος λειτουργίας και εξοπλισμού τοποθέτησης*

Είναι η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία μπορεί να εκτίθεται και να εφαρμόζεται ένα καλώδιο όταν το κύκλωμα θέρμανσης είναι απενεργοποιημένο,

χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα αλλοίωσης του εξωτερικού μανδύα πολυμερούς (στην περίπτωση των καλωδίων πολυμερούς) και στην περίπτωση των αυτορυθμιζόμενων θερμικών καλωδίων στον πολυμερή πυρήνα που αποτελεί το θερμαντικό στοιχείο και μπορεί να υποστεί ανεπανόρθωτη βλάβη.

Κυκλώματα με αυτορυθμιζόμενα θερμικά καλώδια που χρησιμοποιούνται με στόχο την αντιπαγωγική προστασία, πρέπει να αντιμετωπίζονται με ιδιαίτερη προσοχή. Η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία με το κύκλωμα θέρμανσης απενεργοποιημένο, καθορίζεται στις προδιαγραφές της κατασκευάστριας εταιρίας για το συγκεκριμένο είδος θερμικού καλωδίου. Αν αυτή ξεπεραστεί, ο ημιαγωγός του αυτορυθμιζόμενου θερμικού καλωδίου μπορεί να καταστραφεί με αποτέλεσμα, το καλώδιο να καταστεί άχρηστο και η αντιπαγωγική προστασία να μην είναι πλέον εξασφαλισμένη. Ωστόσο, το κύκλωμα θα παραμείνει ηλεκτρικά ασφαλές για όσο διάστημα ο ημιαγωγός απλά έχει μια υψηλότερη αντίσταση (σημαντική μείωση στην θερμικής ικανότητας) χωρίς καταστροφή του πλαστικού μανδύα.

Όσον αφορά τον εξοπλισμό απαγορεύεται να εγκαθίσταται το θερμικό καλώδιο σε εξοπλισμό που μπορεί να ζεσταθεί περισσότερο απ' όσο ορίζει η μέγιστη θερμοκρασίας έκθεσης του.

- *Μέγιστη θερμοκρασία συντήρησης*

Είναι η μέγιστη θερμοκρασία, με το κύκλωμα θέρμανσης ενεργοποιημένο, την οποία έχει την ικανότητα το θερμικό καλώδιο να διατηρήσει στον σωλήνα εγκατάστασης (ή στη δεξαμενή ή σε λοιπό εξοπλισμό) και το περιεχόμενο του το οποίο είναι συνήθως κάποιο υγρό. Σχετίζεται άμεσα με τη διατήρηση της ρευστότητάς του υγρού της διαδικασίας.

- *Περιβάλλον εγκατάστασης*

Τα ηλεκτρικά θερμικά καλώδια μπορούν να εγκατασταθούν σε κανονικά (nonclassified) και επικίνδυνα (classified) περιβάλλοντα, ανάλογα με τις προδιαγραφές και τις πιστοποιήσεις του εκάστοτε καλωδίου. Για εγκατάσταση σε επικίνδυνες (hazardous) περιοχές το θερμικό καλώδιο απαιτείται να πληροί την κατηγοριοποίηση της θερμοκρασίας, T-rating, ώστε να εξασφαλίσει την ασφαλή λειτουργία ακόμα και σε περίπτωση μιας ανεπιθύμητης κατάστασης.

Η συνεχής ανάγκη για την ασφάλεια σε επικίνδυνες περιοχές έχει επίσης οδηγήσει στην παραγωγή ενός μεγάλου φάσματος εγκεκριμένου εξοπλισμού για την ασφαλή χρήση των καλωδίων σε περιβάλλοντα αντικρηκτικής προστασίας (Ex) , που βρίσκονται σε βιομηχανίες πετρελαίου, φυσικού αερίου, άνθρακα, πετροχημικών και άλλων βιομηχανιών. Το E.T.H. μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί χωρίς κανένα πρόβλημα σε επικίνδυνες περιοχές, χάρη στη διαθεσιμότητα μιας ποικιλίας εγκεκριμένου προϊόντων, τα οποία συνήθως συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις για προστασία από εκρήξεις, με χρήση εξοπλισμού τύπου "e" αυξημένης ασφάλειας.

Οι ακόλουθες απαιτήσεις πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν όταν το E.T.H. εφαρμόζεται με καλώδια που έχουν προστασία έναντι εκρηκτικών περιοχών:

α) τα θερμικά καλώδια θα πρέπει να έχουν έναν μεταλλικό μανδύα με πρόβλεψη για σύνδεση με την γη,

β) πρέπει επίσης να υπάρχουν διατάξεις για την απομόνωση του συστήματος από την κύρια τροφοδοσία,

γ) το σύστημα πρέπει να διαθέτει προστασία από υπερφόρτωση και επίσης προστασία διαρροής ως προς γη για κάθε ζώνη θέρμανσης,

δ) το σύστημα θα πρέπει να προστατεύεται ενάντια στην υπερθέρμανση είτε με σταθεροποίηση του θερμικού καλωδίου σε μια ασφαλή θερμοκρασία, ή εναλλακτικά με συσκευές ελέγχου περιορισμού της θερμοκρασίας.

- *Μέγιστο και ελάχιστο μήκος αγωγών*

Το μήκος των σωληνώσεων όπου γίνεται η εφαρμογή του συστήματος θερμικής ιχνηλάτησης είναι σημαντικό στοιχείο καθώς η καταλληλότητα των θερμικών καλωδίων διαφέρει από είδος σε είδος για κυκλώματα μικρού, μεσαίου ή μεγάλου μήκους αντίστοιχα. Για παράδειγμα τα αυτορυθμιζόμενα θερμικά καλώδια χρησιμοποιούνται συνήθως για μικρού μήκους κυκλώματα, τα σταθερής ισχύος για μεσαίου μήκους και τα ορυκτής μόνωσης για μεγάλου μήκους κυκλώματα (για μικρά μήκη κυκλωμάτων, ενδέχεται να απαιτείται μετασχηματιστής) ενώ υπάρχει και η τεχνολογία των συστημάτων ιχνηλάτησης επιδερμικού φαινομένου που χρησιμοποιούνται για μήκη κυκλωμάτων συνήθως από 1 έως 25 km. Επιπλέον για τα θερμικά καλώδια σειράς σταθερής ισχύος, η ισχύς εξόδου είναι άμεσα εξαρτημένη από το μήκος του κυκλώματος και επομένως είναι απαραίτητος ο σαφής προσδιορισμός αυτού. Από την άλλη πλευρά το ελάχιστο μήκος κυκλώματος στα θερμικά καλώδια σταθερής ισχύος παράλληλου κυκλώματος περιορίζεται από το μήκος της ζώνης θέρμανσης.

Στα θερμικά καλώδια η ηλεκτρική ισχύς μεταφέρεται μέσα από το καλώδιο μέσω δύο παράλληλων αγωγών. Δεδομένου λοιπόν ότι το ρεύμα ρέει μέσα από αυτούς τους αγωγούς, είναι αναπόφευκτη η ύπαρξη πτώσης τάσης κατά μήκος των καλωδίων. Είναι σημαντικό να περιοριστεί η εν λόγω πτώση τάσης, ώστε να εξασφαλιστεί ότι η θερμική ισχύς που αποδίδεται από το καλώδιο δεν είναι κατώτερη από αυτήν που προδιαγράφεται και που απαιτείται σε κάθε εφαρμογή. Ως εκ τούτου, το συνολικό μήκος του καλωδίου μιας μόνο διαδρομής πρέπει να είναι κατάλληλο προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι η ηλεκτρική ενέργεια που μετατρέπεται σε θερμότητα στην άλλη άκρη του καλωδίου είναι επαρκής.

Ανάλογα με τη διάταξη των σωληνώσεων, είναι απαραίτητο να καθοριστεί το μήκος της μεγαλύτερης διαδρομής του καλωδίου επάνω στον σωλήνα. Εάν η τιμή αυτή υπερβαίνει το μέγιστο μήκος για το οποίο είναι κατάλληλο το καλώδιο, τότε είτε η διαδρομή που διατρέχει το καλώδιο είτε ο τύπος καλωδίου, πρέπει να τροποποιηθούν.

- *Απορροφούμενη ένταση εκκίνησης*

Τα αυτορυθμιζόμενα θερμικά καλώδια απαιτούν κάποιο ρεύμα εκκίνησης το οποίο εξαρτάται από την θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι και αρκετά υψηλό ενώ τα θερμικά καλώδια σταθερής ισχύος δεν απαιτούν υψηλό ρεύμα εκκίνησης. Κατά συνέπεια αυτό το χαρακτηριστικό πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν κατά τον σχεδιασμό της εγκατάστασης.



Η φύση των αυτορυθμιζόμενων θερμικών καλωδίων είναι να καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια καθώς θερμαίνονται περισσότερο. Αυτό είναι το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των καλωδίων, καθώς παρέχουν περισσότερη θερμότητα στις κρύες περιοχές ενός σωλήνα απ' ό,τι στις πιο θερμές περιοχές. Ωστόσο κατά την εκκίνηση της λειτουργίας του καλωδίου (και ενώ το καλώδιο είναι κρύο) παρατηρείται αυξημένη τιμή ρεύματος και έτσι απαιτείται προσεκτική επιλογή των μικροαυτόματων διακοπών ώστε να εξασφαλιστεί ότι το αρχικό ρεύμα εκκίνησης δεν προκαλεί λειτουργία του διακόπτη. Έτσι το συνολικό μήκος του θερμικού καλωδίου που συνδέεται στον διακόπτη πρέπει να είναι κατάλληλο ώστε να μην δημιουργηθούν προβλήματα κατά την εκκίνηση.

Το συνολικό μήκος του θερμικού καλωδίου οποιουδήποτε κυκλώματος δεν πρέπει να ξεπερνάει το <<μέγιστο συνολικό μήκος>> που σχετίζεται με τους διακόπτες που τοποθετούνται στο κύκλωμα και γι' αυτό πρέπει η διαστασιολόγηση να γίνει πολύ προσεκτικά. Αν δεν συμβαίνει αυτό πρέπει είτε να χρησιμοποιηθεί ένας μεγαλύτερος μικροαυτόματος διακόπτης μεγαλύτερης έντασης (μαζί με τις σχετικές καλωδιώσεις), είτε να εγκατασταθούν περισσότεροι μικροαυτόματοι διακόπτες.

- *Τάση τροφοδοσίας*

Τα θερμικά καλώδια κατασκευάζονται για να λειτουργούν σε συγκεκριμένες τυπικές τάσεις εφαρμογής. Είναι απαραίτητο λοιπόν να τηρούνται αυτές οι προδιαγραφές και να βεβαιώνεται ότι η τάση λειτουργίας για την οποία προδιαγράφεται το θερμικό καλώδιο είναι διαθέσιμη στην συγκεκριμένη περιοχή της εγκατάστασης, ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του κυκλώματος και η απαιτούμενη παροχή θερμικής ισχύος. Οι πιο χαρακτηριστικές τάσεις λειτουργίας είναι τα 240 Volt και τα 120 Volt.

Η τάση εφαρμογής επηρεάζει και άλλες παραμέτρους και χαρακτηριστικά του συστήματος των θερμικών καλωδίων του E.T.H. Για παράδειγμα τα θερμικά καλώδια που είναι κατάλληλα για τάσεις 240 Volt επιτρέπουν μεγαλύτερου μήκους μονές διαδρομές σε σχέση με τα θερμικά καλώδια των 120 Volt. Επιπλέον εάν οι διαθέσιμες τάσεις είναι διαφορετικές από την ονομαστική τάση του καλωδίου, αυτό πιθανόν να επηρεάσει την αποδιδόμενη θερμότητα από αυτό.

- *Θερμική ισχύς – Απαιτούμενη παροχή θερμότητας*

Η δυνατότητα παροχής θερμότητας των θερμικών καλωδίων μπορεί να διαφοροποιείται όχι μόνο από είδος σε είδος αλλά μπορεί να είναι διαφορετική και για το ίδιο είδος ανάλογα με τις προδιαγραφές που θέτει η κατασκευάστρια εταιρία. Έτσι πρέπει να είναι γνωστή εκ των προτέρων η αναγκαιότητα σε παροχή θερμότητας της εφαρμογής όπου θα γίνει η τοποθέτηση του συστήματος ώστε να γίνει χρήση του κατάλληλου είδους και να διαπιστωθεί αν δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί το ίδιο είδος θερμικού καλωδίου με μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής θερμότητας.

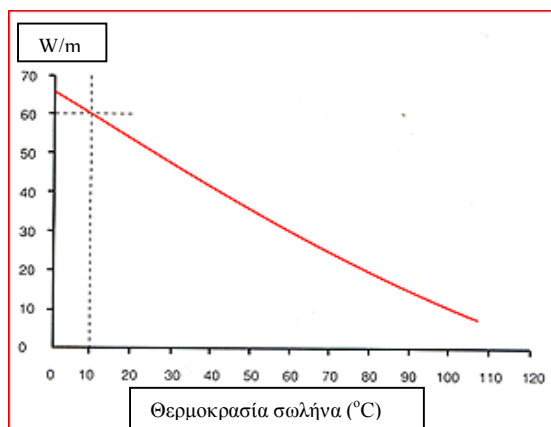
Δεδομένου ότι τα θερμικά καλώδια παράγονται κανονικά σε διακριτά ονομαστικά επίπεδα ισχύος, τέλεια αντιστοιχία με τις απαιτήσεις των απωλειών θερμότητας του σωλήνα (της δεξαμενής κ.τ.λ.) δεν επιτυγχάνεται σχεδόν ποτέ και πάντα το καλώδιο που επιλέγεται, αν δεν είναι εφικτό να τις εξισώνει, πρέπει να υπερβαίνει τις απαιτήσεις αυτές.

Επιπλέον στην επιλογή του θερμικού καλωδίου που ταιριάζει καλύτερα στην απώλεια θερμότητας πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν ότι η πεπερασμένη αντίσταση των δύο ηλεκτροφόρων αγωγών προκαλεί μια πτώση τάσης κατά μήκος του θερμικού καλωδίου και έτσι η απόδοση θερμικής ισχύος στο άλλο άκρο του κυκλώματος πιθανόν να είναι μειωμένη.

Τα μέγιστα μήκη κυκλώματος καθορίζονται ανά περίπτωση με κριτήριο όχι μόνο το ρεύμα εκκίνησης, αλλά και την ισχύ που διατίθεται στην άλλη άκρη του θερμικού καλωδίου παράλληλου κυκλώματος. Για κάθε επιλεγμένο τύπο καλωδίου, ο αλγόριθμος που εξετάζεται έχει στόχο τη βέλτιστη εξισσορόπηση μεταξύ της θερμικής ισχύος εξόδου και του μήκους του κυκλώματος.

Για την περίπτωση των αυτορυθμιζόμενων θερμικών καλωδίων είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη τα αντίστοιχα διαγράμματα θερμικής ισχύος εξόδου σε σχέση με τη θερμοκρασία συντήρησης (βλ. σχήμα 1.5-14), για τον προσδιορισμό της αποδιδόμενης θερμικής ισχύος του καλωδίου στη θερμοκρασία που απαιτείται.

Αρχικά ελέγχεται η επιθυμητή θερμοκρασία διατήρησης του σωλήνα στον οριζόντιο άξονα του γραφήματος του καλωδίου. Στη συνέχεια με βάση την καμπύλη ισχύος εξόδου προσδιορίζεται η αποδιδόμενη θερμική ισχύς (W/m) του καλωδίου.



Σχήμα 1.5-14: Γραφική παράσταση αυτορυθμιζόμενου θερμικού καλωδίου δεδομένης ικανότητας παραγωγής θερμικής ισχύος.

- Μηχανική καταπόνηση

Ανάλογα με το περιβάλλον τοποθέτησης ενός συστήματος Ε.Τ.Η. κρίνεται σκόπιμο να τοποθετούνται καλώδια με την απαιτούμενη αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις και αντοχή στη διάβρωση κατά την έκθεσή τους σε χημικά περιβάλλοντα. Τα θερμικά καλώδια ορυκτής μόνωσης έχουν άριστες αντιδιαβρωτικές ιδιότητες σε μια σειρά από εξαιρετικά σκληρά περιβάλλοντα και είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για περιοχές με υψηλή μηχανική καταπόνηση των θερμικών καλωδίων. Από την άλλη πλευρά η πλειονότητα των βιομηχανικών θερμικών καλωδίων πολυμερούς που κατασκευάζονται σήμερα διαθέτουν έναν εξωτερικό μανδύα για επιπρόσθετη μηχανική αντοχή και ασφάλεια.

Γενικότερα είναι απαραίτητο πριν την εγκατάσταση, να γίνει επιθεώρηση τους συστήματος σωληνώσεων για εκδορές, τραχιές επιφάνειες και αιχμηρά άκρα τα οποία θα μπορούσαν να προκαλέσουν φθορά στα θερμικά καλώδια.

- *Διάταξη – Πολυπλοκότητα σωληνώσεων*

Τα αυτορυθμιζόμενα θερμικά καλώδια και τα σταθερής ισχύος λόγω της κατασκευής τους από πολυμερή πλαστικά υλικά είναι πιο ευέλικτα και εύκολα στην εγκατάσταση από τα ορυκτής μόνωσης τα οποία είναι σχετικά άκαμπτα και δύσκολο να εγκατασταθούν. Γι' αυτό η περιοχή τοποθέτησης του συστήματος θέρμανσης αποτελεί αρκετά σημαντικό παράγοντα. Είναι απαραίτητο να γίνει εκ των προτέρων επιθεώρηση της διάταξης και του συστήματος των σωληνώσεων ώστε να γίνει με τον καλύτερο τρόπο ο σχεδιασμός της εγκατάστασης.

- *Υλικό κατασκευής των σωληνώσεων*

#### Ειδική μέριμνα για πλαστικούς σωλήνες

Στην περίπτωση των πλαστικών σωλήνων, το ανώτατο επιτρεπόμενο θερμικό φορτίο του σωλήνα που χρησιμοποιείται πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κάθε φορά. Η επιτρεπόμενη θερμοκρασία του πλαστικού σωλήνα θα πρέπει πάντα να είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία της επιφάνειας του θερμικού καλωδίου. Εάν επιλεγθεί το κατάλληλο είδος, ο κίνδυνος να συμβεί υπερθέρμανση μπορεί να περιοριστεί στο ελάχιστο και γι' αυτό σε αυτή τη περίπτωση αποφεύγεται η τοποθέτηση θερμικών καλωδίων σταθερής ισχύος και ορυκτής μόνωσης ενώ επιτρέπεται η τοποθέτηση αυτορυθμιζόμενων με μικρή σχετικά ικανότητα σε παραγωγή θερμότητας. Το χαρακτηριστικό της αυτορρύθμισης διατηρεί τη μέγιστη θερμοκρασία του καλωδίου σε αποδεκτά όρια για χρήση σε πλαστικό σωλήνα. Ωστόσο, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος Ε.Τ.Η. ώστε να μην υπερβαίνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία του πλαστικού σωλήνα που τοποθετείται.

Αντίθετα στην περίπτωση μεταλλικών σωλήνων δεν υπάρχουν περιορισμοί στην τοποθέτηση θερμικών καλωδίων.

- *Κόστος αγοράς και εγκατάστασης*

Τα αυτορυθμιζόμενα θερμικά καλώδια εξαιτίας της σύνθετης τεχνολογίας κατασκευής τους απαιτούν μεγαλύτερο αρχικό κεφάλαιο αγοράς σε σχέση με τα συμβατικά θερμικά καλώδια (σταθερής ισχύος). Από την άλλη πλευρά τα συμβατικά θερμικά καλώδια, εξαιτίας της συνεχούς και σταθερής παραγωγής θερμότητας, λειτουργούν μόνο εν τη παρουσία συστημάτων ελέγχου και παρακολούθησης ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις αυτό συμβαίνει και με τα αυτορυθμιζόμενα. Το γεγονός αυτό αυξάνει το συνολικό κόστος της εγκατάστασης. Καλό είναι γενικά να γίνεται ένας ακριβής υπολογισμός του συνολικού κόστους αγοράς και εγκατάστασης ώστε να γίνει η επιλογή της πιο συμφέρουσας τεχνολογίας και να επιτευχθεί βέλτιστος συμψηφισμός μεταξύ της αναγκαίας παροχής θερμότητας και του ελάχιστου κόστους αγοράς και εγκατάστασης.

- *Κόστος λειτουργίας – Ενεργειακή απόδοση*

Τα αυτορυθμιζόμενα θερμικά καλώδια εξαιτίας της αυτόματης διαδικασίας ρύθμισης της θερμικής ισχύος εξόδου ανάλογα με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, χρησιμοποιούν λιγότερη ενέργεια όταν απαιτείται λιγότερη θερμότητα και άρα αυτό το είδος των καλωδίων συντελεί στην εξοικονόμηση ενέργειας και άρα στη μείωση του λειτουργικού κόστους της εγκατάστασης.

- *Υπαρξη συστημάτων ελέγχου και παρακολούθησης*

Τα θερμικά καλώδια σταθερής ισχύος λόγω του ότι παράγουν σταθερή θερμική ισχύ ανεξάρτητη από τις μεταβολές της θερμοκρασίας στο γύρω περιβάλλον, απαιτούν συστήματα ελέγχου και περιορισμού της θερμοκρασίας ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες καταστάσεις υπερθέρμανσης ειδικά σε εκρηκτικά περιβάλλοντα. Το ίδιο συμβαίνει και με τα αυτορυθμιζόμενα, στην περίπτωση που προορίζονται για τη διατήρηση της θερμοκρασίας ενός σωλήνα.

Συνιστάται τα θερμικά καλώδια για τη διατήρηση της θερμοκρασίας σωληνώσεων να ελέγχονται από ένα θερμοστάτη ώστε να εξασφαλιστεί ότι η θερμοκρασία του υγρού που ρέει μέσα στον σωλήνα διατηρείται στα επιθυμητά επίπεδα. Για σωληνώσεις με διακλαδώσεις μπορεί να απαιτούνται ξεχωριστά τμήματα καλωδίων και ανεξάρτητα συστήματα ελέγχου, εφόσον οι συνθήκες που επικρατούν (π.χ. θερμοκρασία) ή τα μεγέθη των επιμέρους σωληνώσεων κατά μήκος αυτών των διακλαδώσεων είναι διαφορετικά από τις σωληνώσεις, όπου έχει εγκατασταθεί ο θερμοστάτης-αισθητήρας ελέγχου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό αν το ρευστό στην κύρια σωληνώση ρέει και το ρευστό μέσα στις σωληνώσεις των διακλαδώσεων είναι στατικό, έστω και αν αυτό συμβαίνει σπάνια.

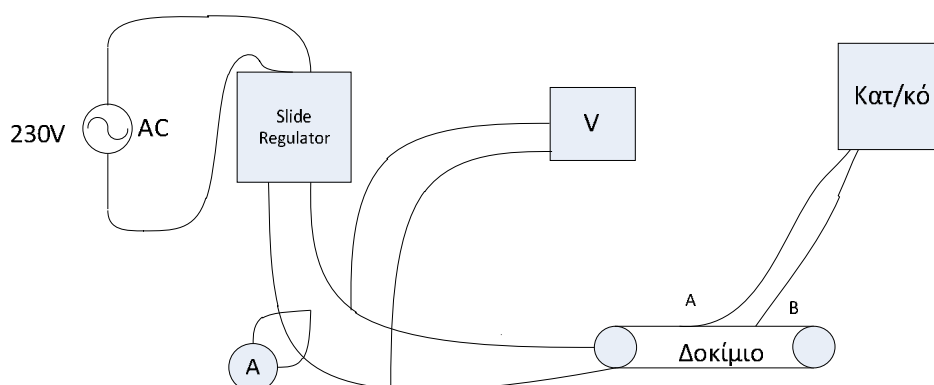
Είναι λοιπόν απαραίτητη ανάλογα με το είδος των καλωδίων η αγορά και η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων που θα εξασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1 Η ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Σε αυτό το στάδιο έγιναν μετρήσεις σε αυτορυθμιζόμενα θερμικά καλώδια που αποτελούν την πιο κοινή εφαρμογή των συστημάτων electrical trace heating λόγω της αυτορρυθμιστικής τους ιδιότητας.

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε η πειραματική διάταξη του ακόλουθου σχήματος:



*Σχήμα 2.1: Η διάταξη που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο.*

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων των μετρήσεων στο εργαστήριο ήταν απαραίτητα τα ακόλουθα βασικά στοιχεία:

- Μεταβλητός μετασχηματιστής (Slide Regulator): Όργανο που χρησιμοποιήθηκε για την σταδιακή αυξομείωση της τάσης ώστε να ελέγχεται η τάση εξόδου του (τάση εισόδου του δοκιμίου).
- Ψηφιακό πολύμετρο: Για την μέτρηση της τάσης εξόδου του μετασχηματιστή (τάση εισόδου του δοκιμίου).
- Αμπεροτσιμπίδα: Μέτρηση του εναλλασσόμενου ρεύματος στην έξοδο του μετ/στη.
- Καταγραφικό όργανο θερμοκρασίας: Η καταγραφή της θερμοκρασίας πραγματοποιείται με την βοήθεια αισθητήρων θερμοκρασίας Pt-100. Οι αισθητήρες συνδέονται στο καταγραφικό και τοποθετούνται επάνω στο δοκίμιο για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας της επιφάνειάς του, η οποία αποθηκεύεται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα στην μνήμη της

συσκευής. Οι ληφθείσες μετρήσεις ανακτώνται με τη χρήση κατάλληλου προγράμματος στον υπολογιστή.

- Ψηφιακό θερμόμετρο: Για την μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.
- Δοκίμιο: Θερμικό καλώδιο το οποίο διαθέτει δύο παράλληλους αγωγούς στους οποίους συνδέεται το καλώδιο από την έξοδο του μεταβλητού μετασχηματιστή.

Τα δοκίμια ήταν αυτορυθμιζόμενα θερμικά καλώδια μήκους περίπου 1m το καθένα, δύο διαφορετικών τύπων και διαφορετικής θερμικής ικανότητας σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί. Τα δύο είδη δοκιμίων διαφοροποιούνται ως προς την ικανότητα τους να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες έκθεσης. Ο τύπος Β δίνει για παράδειγμα, την δυνατότητα για καθαρισμό με ατμό σε αντίθεση με τον τύπο Α που δεν είναι κατάλληλος για πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

*Πίνακας 2.1-1: Χαρακτηριστικά δοκίμια μετρήσεων.*

Δοκίμιο	Τύπος	Θερμική ισχύς (W/m)
No. 1	A	10
No. 2	A	45
No. 3	A	60
No. 4	B	10
No. 5	B	25

## 2.2 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Για κάθε δοκίμιο ακολουθούνται τα παρακάτω:

Βήμα 1<sup>ο</sup>: Μετά την τοποθέτηση του εκάστοτε δοκιμίου στη διάταξη του σχήματος 2.1-1 και την τοποθέτηση των αισθητήρων επάνω σε αυτό ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 2<sup>ο</sup>: Ενεργοποίηση της διάταξης και καταγραφή της τάσης τροφοδοσίας του καλωδίου, της απορροφούμενης από αυτό έντασης, της μέσης τιμής της θερμοκρασίας από αυτήν που λαμβάνονταν από τα σημεία Α και Β του δοκιμίου καθώς και την τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Ως χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων επιλέχθηκε να είναι τα 10 sec.

Όταν πλέον δεν παρατηρείται αξιοσημείωτη μεταβολή του ρεύματος διακόπτεται η τροφοδοσία του δοκιμίου ενώ η διαδικασία καταγραφής της θερμοκρασίας συνεχίζεται έως ότου η θερμοκρασία του δοκιμίου πλησιάσει λίγο έως πολύ τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Βήμα 3<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση πάγου στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου σε μήκος 71 cm και επανάληψη του βήματος 2.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Με βάση τη διάταξη του σχήματος 2.1-1 και ακολουθώντας τα βήματα 1 έως 3 που περιγράφηκαν στην παράγραφο 2.2 για τα επιμέρους δοκίμια προκύπτουν οι ακόλουθοι πίνακες.

*Πίνακας 3-1: Αποτελέσματα μετρήσεων για το δοκίμιο Νο. 1.*

t (sec)	V (Volt)	I (A)	T (°C)	T <sub>περιβ</sub> (°C)
0	230	0,572	22,9	22,9
10	230	0,468	23,6	22,9
20	230	0,419	27,8	22,9
30	230	0,383	34,4	22,9
40	230	0,353	41,3	22,9
50	230	0,327	47,7	22,9
60	230	0,307	53,2	22,9
70	230	0,288	57,6	22,9
80	230	0,272	60,5	22,9
90	230	0,259	61,7	22,9
100	230	0,247	64,8	22,9
110	230	0,237	68	22,9
120	230	0,229	70,9	22,9
130	230	0,221	73,2	22,9
140	230	0,214	75,3	22,9
150	230	0,209	77	22,9
160	230	0,204	78,6	22,9
170	230	0,200	79,9	22,9
180	230	0,198	81,1	22,9
190	230	0,194	82,2	22,9
200	230	0,192	83,2	22,9
210	230	0,190	84,2	22,9
220	230	0,187	85,1	22,9
230	230	0,185	85,8	22,9
240	230	0,184	86,5	22,9
250	230	0,182	87	22,9
260	230	0,182	87,5	22,9
270	230	0,181	88	22,9
280	230	0,180	88,4	22,9
290	230	0,179	88,8	22,9
300	230	0,178	89,1	22,9
310	230	0,177	89,5	22,9
320	230	0,177	89,8	22,9
330	230	0,177	90	22,9
340	230	0,176	90,3	22,9
350	230	0,176	90,6	22,9
360	230	0,175	90,8	22,9
370	230	0,175	91,1	22,9
380	230	0,174	91,4	22,9
390	230	0,174	91,7	22,9
400	230	0,173	91,9	22,9
410	230	0,173	92,1	22,9
420	230	0,172	92,3	22,9
430	230	0,172	92,5	22,9
440	230	0,172	92,6	22,9
450	230	0,171	92,7	22,9
460	230	0,171	92,8	22,9
470	230	0,171	92,9	22,9
480	230	0,171	93	22,9

*συνέχεια Πίνακας 3-1*

490	230	0,171	93,2	22,9
500	230	0,170	93,3	22,9
510	230	0,170	93,4	22,9
520	230	0,170	93,6	22,9
530	230	0,169	93,7	22,9
540	230	0,169	93,8	22,9
550	230	0,169	93,9	22,9
560	230	0,169	94	22,9
570	230	0,169	94,2	22,9
580	0	0	93,1	22,9
590	0	0	90,7	22,9
600	0	0	88,4	22,9
610	0	0	85,9	22,9
620	0	0	83,6	22,9
630	0	0	81,3	22,9
640	0	0	79,2	22,9
650	0	0	77,2	22,9
660	0	0	75,3	22,9
670	0	0	73,4	22,9
680	0	0	71,6	22,9
690	0	0	70	22,9
700	0	0	68,4	22,9
710	0	0	66,9	22,9
720	0	0	65,4	22,9
730	0	0	64,1	22,9
740	0	0	62,8	22,9
750	0	0	61,5	22,9
760	0	0	60,3	22,9
770	0	0	59,1	22,9
780	0	0	58	22,9
790	0	0	56,9	22,9
800	0	0	55,9	22,9
810	0	0	54,9	22,9
820	0	0	54	22,9
830	0	0	53,1	22,9
840	0	0	52,2	22,9
850	0	0	51,3	22,9
860	0	0	50,6	22,9
870	0	0	49,8	22,9
880	0	0	49,1	22,9
890	0	0	48,5	22,9
900	0	0	47,8	22,9
910	0	0	47,2	22,9
920	0	0	46,6	22,9
930	0	0	46,0	22,9
940	0	0	45,4	22,9
950	0	0	44,9	22,9
960	0	0	44,3	22,9
970	0	0	42,5	22,9

**Πίνακας 3-2:** Αποτελέσματα μετρήσεων για το δοκίμιο No.1 (Τοποθέτηση πάγου).

t (sec)	V (Volt)	I (A) με πάγο	T (°C) με πάγο	T <sub>περιβ</sub> (°C)	T (°C) θερμ. πάγου
0	230	0,641	21,1	21,1	-9,6
10	230	0,537	23,5	21,1	-9,7
20	230	0,477	29,6	21,1	-9,8
30	230	0,433	37,2	21,1	-9,8



*συνέχεια Πίνακας 3-2*

40	230	0,401	44,6	21,1	-9,9
50	230	0,370	51,3	21,1	-9,9
60	230	0,347	57,1	21,1	-9,9
70	230	0,327	62,1	21,1	-9,9
80	230	0,312	66,4	21,1	-9,9
90	230	0,298	70,0	21,1	-9,9
100	230	0,287	73,1	21,1	-9,9
110	230	0,277	75,7	21,1	-10
120	230	0,270	78	21,1	-10
130	230	0,262	80	21,1	-10
140	230	0,256	81,6	21,1	-10
150	230	0,251	83,1	21,1	-10
160	230	0,247	84,5	21,1	-10
170	230	0,243	85,6	21,1	-10
180	230	0,240	86,6	21,1	-10
190	230	0,237	87,5	21,1	-10
200	230	0,235	88,2	21,1	-10
210	230	0,233	88,8	21,1	-10
220	230	0,230	89,4	21,1	-10
230	230	0,228	89,8	21,1	-10
240	230	0,227	90,3	21,1	-10
250	230	0,225	90,7	21,1	-10
260	230	0,224	91,1	21,1	-10
270	230	0,223	91,5	21,1	-10
280	230	0,222	91,9	21,1	-10
290	230	0,220	92,2	21,1	-9,9
300	230	0,220	92,5	21,1	-10
310	230	0,219	92,8	21,1	-10
320	230	0,219	93	21,1	-9,9
330	230	0,219	93,2	21,1	-9,9
340	230	0,217	93,4	21,1	-9,9
350	230	0,217	93,6	21,1	-9,9
360	230	0,216	93,8	21,1	-9,9
370	230	0,215	94,0	21,1	-9,9
380	230	0,215	94,1	21,1	-9,9
390	230	0,214	94,3	21,1	-9,9
400	230	0,214	94,4	21,1	-9,9
410	230	0,213	94,6	21,1	-9,9
420	230	0,213	94,7	21,1	-9,9
430	230	0,212	94,8	21,1	-9,9
440	230	0,212	94,9	21,1	-9,9
450	230	0,211	95,1	21,1	-9,9
460	230	0,211	95,2	21,1	-9,9
470	230	0,211	95,3	21,1	-9,9
480	230	0,211	95,4	21,1	-9,9
490	230	0,210	95,5	21,1	-9,9
500	230	0,210	95,6	21,1	-9,9
510	230	0,209	95,7	21,1	-9,9
520	230	0,209	95,8	21,1	-9,9
530	230	0,209	95,9	21,1	-9,8
540	230	0,209	95,9	21,1	-9,9
550	230	0,208	95,9	21,1	-9,9
560	230	0,208	96	21,1	-9,9
570	230	0,208	96,1	21,1	-9,9

*Πίνακας 3-3: Αποτελέσματα μετρήσεων για το δοκίμιο Νο.2.*

t (sec)	V (Volt)	I (A)	T (°C)	T <sub>περιβ</sub> (°C)
0	230	0,431	23,3	23,2
10	230	0,370	24	23,2
20	230	0,340	27,2	23,2
30	230	0,314	31,9	23,2
40	230	0,293	37,2	23,2
50	230	0,275	42,3	23,2
60	230	0,258	47,1	23,2
70	230	0,244	51,4	23,2
80	230	0,231	55,7	23,2
90	230	0,221	58,3	23,2
100	230	0,212	61,1	23,2
110	230	0,205	63,4	23,2
120	230	0,198	65,5	23,2
130	230	0,191	67,2	23,2
140	230	0,188	68,8	23,2
150	230	0,182	70,2	23,2
160	230	0,178	71,4	23,2
170	230	0,176	72,6	23,2
180	230	0,173	73,6	23,2
190	230	0,171	74,5	23,2
200	230	0,168	75,3	23,2
210	230	0,167	76,1	23,2
220	230	0,166	76,8	23,2
230	230	0,163	77,4	23,2
240	230	0,163	78	23,2
250	230	0,162	78,5	23,2
260	230	0,160	79	23,2
270	230	0,160	79,4	23,2
280	230	0,158	79,8	23,2
290	230	0,157	80,2	23,2
300	230	0,157	80,6	23,2
310	230	0,156	81	23,2
320	230	0,155	81,3	23,2
330	230	0,155	81,6	23,2
340	230	0,154	82	23,2
350	230	0,153	82,3	23,2
360	230	0,153	82,5	23,2
370	230	0,152	82,8	23,2
380	230	0,151	83,1	23,2
390	230	0,151	83,3	23,2
400	230	0,151	83,6	23,2
410	230	0,150	83,8	23,2
420	230	0,150	84	23,2
430	230	0,149	84,2	23,2
440	230	0,149	84,4	23,2
450	230	0,149	84,6	23,2
460	230	0,149	84,7	23,2
470	230	0,149	84,9	23,2
480	230	0,148	85	23,2
490	230	0,148	85,2	23,2
500	230	0,148	85,4	23,2
510	230	0,148	85,5	23,2
520	230	0,148	85,6	23,2
530	230	0,148	85,8	23,2
540	230	0,147	85,9	23,2
550	230	0,147	86	23,2

συνέχεια Πίνακας 3-3				
560	230	0,147	86,1	23,2
570	230	0,147	86,2	23,2
580	230	0,147	86,3	23,2
590	230	0,147	86,4	23,2
600	230	0,147	86,5	23,2
610	0	0	86,3	23,2
620	0	0	86,1	23,2
630	0	0	84,4	23,2
640	0	0	82,1	23,2
650	0	0	79,7	23,2
660	0	0	77,3	23,2
670	0	0	75	23,2
680	0	0	72,8	23,2
690	0	0	70,8	23,2
700	0	0	69	23,2
710	0	0	67,3	23,2
720	0	0	65,6	23,2
730	0	0	64	23,2
740	0	0	62,6	23,2
750	0	0	61,2	23,2
760	0	0	59,9	23,2
770	0	0	58,7	23,2
780	0	0	57,6	23,2
790	0	0	56,5	23,2
800	0	0	55,4	23,2
810	0	0	54,4	23,2
820	0	0	53,5	23,2
830	0	0	52,5	23,2
840	0	0	51,6	23,2
850	0	0	50,8	23,2
860	0	0	50	23,2
870	0	0	49,2	23,2

**Πίνακας 3-4:** Αποτελέσματα μετρήσεων για το δοκίμιο Νο.2 (Τοποθέτηση πάγου).

t (sec)	V (Volt)	I (A) με πάγο	T (°C) με πάγο	T <sub>περιβ</sub> (°C)	T (°C) θερμ. πάγου
0	230	0,464	23,2	23,2	-9,1
10	230	0,401	24,8	23,2	-9,1
20	230	0,370	29,9	23,2	-9,2
30	230	0,344	36,1	23,2	-9,2
40	230	0,323	42,4	23,2	-9,2
50	230	0,307	48	23,2	-9,2
60	230	0,292	52,6	23,2	-9,2
70	230	0,279	55,8	23,2	-9,3
80	230	0,267	58,4	23,2	-9,3
90	230	0,258	60,9	23,2	-9,3
100	230	0,250	63,2	23,2	-9,3
110	230	0,244	65,2	23,2	-9,3
120	230	0,239	68,2	23,2	-9,3
130	230	0,234	71,1	23,2	-9,3
140	230	0,229	72,8	23,2	-9,3
150	230	0,226	73,9	23,2	-9,3
160	230	0,224	75,1	23,2	-9,3
170	230	0,221	75,8	23,2	-9,3
180	230	0,219	76	23,2	-9,3
190	230	0,216	76,2	23,2	-9,3
200	230	0,215	77	23,2	-9,3
210	230	0,213	77,7	23,2	-9,3

*συνέχεια Πίνακας 3-4*

220	230	0,211	78,2	23,2	-9,3
230	230	0,210	79,1	23,2	-9,3
240	230	0,209	80,2	23,2	-9,3
250	230	0,208	81	23,2	-9,3
260	230	0,207	81,4	23,2	-9,3
270	230	0,207	81,6	23,2	-9,3
280	230	0,206	81,8	23,2	-9,3
290	230	0,205	82	23,2	-9,3
300	230	0,205	82,2	23,2	-9,3
310	230	0,204	82,5	23,2	-9,3
320	230	0,203	82,7	23,2	-9,3
330	230	0,203	82,9	23,2	-9,3
340	230	0,202	83,1	23,2	-9,3
350	230	0,201	83,9	23,2	-9,3
360	230	0,201	84,3	23,2	-9,3
370	230	0,201	84,2	23,2	-9,3
380	230	0,200	84,3	23,2	-9,3
390	230	0,200	84,4	23,2	-9,3
400	230	0,199	84,6	23,2	-9,3
410	230	0,199	84,8	23,2	-9,3
420	230	0,199	85,1	23,2	-9,3
430	230	0,198	85,2	23,2	-9,3
440	230	0,197	85,4	23,2	-9,3
450	230	0,197	85,6	23,2	-9,3
460	230	0,197	85,7	23,2	-9,3
470	230	0,197	86	23,2	-9,3
480	230	0,197	86,1	23,2	-9,3
490	230	0,197	86,2	23,2	-9,3
500	230	0,196	86,4	23,2	-9,3
510	230	0,196	86,7	23,2	-9,3
520	230	0,196	86,9	23,2	-9,3
530	230	0,196	87	23,2	-9,3
540	230	0,195	87,1	23,2	-9,3
550	230	0,195	87,3	23,2	-9,2
560	230	0,195	87,5	23,2	-9,3
570	230	0,195	87,6	23,2	-9,2
580	230	0,195	87,7	23,2	-9,2
590	230	0,195	87,8	23,2	-9,2
600	230	0,195	87,9	23,2	-9,2

*Πίνακας 3-5: Αποτελέσματα μετρήσεων για το δοκίμιο Νο.3.*

t (sec)	V (Volt)	I (A)	T (°C)	T <sub>περιβ</sub> (°C)
0	230	0,058	21,9	21,9
10	230	0,056	22,1	21,9
20	230	0,055	22,8	21,9
30	230	0,054	23,7	21,9
40	230	0,054	24,6	21,9
50	230	0,054	25,6	21,9
60	230	0,053	26,6	21,9
70	230	0,053	27,5	21,9
80	230	0,053	28,4	21,9
90	230	0,053	29,1	21,9
100	230	0,052	29,8	21,9
110	230	0,052	30,5	21,9
120	230	0,052	31,1	21,9
130	230	0,052	31,7	21,9

συνέχεια Πίνακας 3-5				
140	230	0,051	32,2	21,9
150	230	0,051	32,7	21,9
160	230	0,051	33,2	21,9
170	230	0,051	33,6	21,9
180	230	0,051	34	21,9
190	230	0,051	34,4	21,9
200	230	0,050	34,8	21,9
210	230	0,050	35,2	21,9
220	230	0,050	35,5	21,9
230	230	0,050	35,8	21,9
240	230	0,050	36,2	21,9
250	230	0,050	36,4	21,9
260	230	0,050	36,7	21,9
270	230	0,049	37	21,9
280	230	0,049	37,2	21,9
290	230	0,049	37,4	21,9
300	230	0,049	37,7	21,9
310	0	0	37,4	20,8
320	0	0	36,6	20,8
330	0	0	35,8	20,8
340	0	0	35,1	20,8
350	0	0	34,6	20,8
360	0	0	34,1	20,8
370	0	0	33,6	20,8
380	0	0	33,1	20,8
390	0	0	32,6	20,8
400	0	0	32,2	20,8
410	0	0	31,8	20,8
420	0	0	31,4	20,8
430	0	0	31	20,8
440	0	0	30,6	20,8
450	0	0	30,3	20,8
460	0	0	29,9	20,8
470	0	0	29,6	20,8

**Πίνακας 3-6:** Αποτελέσματα μετρήσεων για το δοκίμιο Νο.3 (Τοποθέτηση πάγου).

t (sec)	V (Volt)	I (A) με πάγο	T (°C) με πάγο	T <sub>περιβ</sub> (°C)	T (°C) θερμ. πάγου
0	230	0,062	20,8	20,8	-15,6
10	230	0,062	21,7	20,8	-15,5
20	230	0,061	22,7	20,8	-15,5
30	230	0,061	23,7	20,8	-15,4
40	230	0,060	24,2	20,8	-15,4
50	230	0,060	25,3	20,8	-15,3
60	230	0,060	26,3	20,8	-15,2
70	230	0,060	27,2	20,8	-15,2
80	230	0,059	28,1	20,8	-15,1
90	230	0,059	29	20,8	-15,1
100	230	0,059	29,9	20,8	-15
110	230	0,059	30,8	20,8	-14,9
120	230	0,059	31,6	20,8	-14,9
130	230	0,058	32,3	20,8	-14,8
140	230	0,058	33	20,8	-14,7
150	230	0,058	33,7	20,8	-14,7
160	230	0,058	34,3	20,8	-14,6
170	230	0,058	34,9	20,8	-14,6
180	230	0,058	35,5	20,8	-14,5

*συνέχεια Πίνακας 3-6*

190	230	0,058	36	20,8	-14,4
200	230	0,057	36,5	20,8	-14,4
210	230	0,057	36,9	20,8	-14,3
220	230	0,057	37,4	20,8	-14,2
230	230	0,057	37,9	20,8	-14,2
240	230	0,057	38,3	20,8	-14,1
250	230	0,057	38,7	20,8	-14
260	230	0,057	39,1	20,8	-14
270	230	0,057	39,4	20,8	-14
280	230	0,057	39,7	20,8	-13,9
290	230	0,057	40,2	20,8	-13,9
300	230	0,057	40,4	20,8	-13,8

**Πίνακας 3-7: Αποτελέσματα μετρήσεων για το δοκίμιο Νο.4.**

t (sec)	V (Volt)	I (A)	T (°C)	T <sub>περιβ</sub> (°C)
0	230	0,285	22,7	22,7
10	230	0,235	22,9	22,7
20	230	0,194	24	22,7
30	230	0,170	25,8	22,7
40	230	0,153	27,8	22,7
50	230	0,143	29,8	22,7
60	230	0,134	31,6	22,7
70	230	0,126	33,2	22,7
80	230	0,119	34,8	22,7
90	230	0,113	36,3	22,7
100	230	0,108	37,6	22,7
110	230	0,104	38,7	22,7
120	230	0,100	39,8	22,7
130	230	0,097	40,8	22,7
140	230	0,093	41,6	22,7
150	230	0,091	42,4	22,7
160	230	0,089	43	22,7
170	230	0,087	43,6	22,7
180	230	0,085	44,1	22,7
190	230	0,084	44,6	22,7
200	230	0,082	45	22,7
210	230	0,081	45,4	22,7
220	230	0,080	45,7	22,7
230	230	0,079	46	22,7
240	230	0,078	46,3	22,7
250	230	0,077	46,5	22,7
260	230	0,077	46,8	22,7
270	230	0,076	47	22,7
280	230	0,076	47,2	22,7
290	230	0,075	47,3	22,7
300	230	0,074	47,5	22,7
310	230	0,074	47,6	22,7
320	230	0,073	47,8	22,7
330	230	0,073	47,9	22,7
340	230	0,073	48	22,7
350	230	0,072	48,1	22,7
360	230	0,072	48,2	22,7
370	230	0,072	48,3	22,7
380	230	0,072	48,4	22,7
390	230	0,071	48,4	22,7
400	230	0,071	48,5	22,7

*συνέχεια Πίνακας 3-7*

410	230	0,071	48,5	22,7
420	230	0,071	48,6	22,7
430	230	0,071	48,6	22,7
440	230	0,070	48,7	22,7
450	230	0,070	48,7	22,7
460	230	0,070	48,8	22,7
470	230	0,070	48,8	22,7
480	230	0,070	48,9	22,7
490	230	0,069	48,9	22,7
500	230	0,069	48,9	22,7
510	230	0,069	49	22,7
520	230	0,069	49	22,7
530	230	0,069	49	22,7
540	230	0,069	49	22,7
550	0	0	48,9	22,7
560	0	0	48,2	22,7
570	0	0	47,5	22,7
580	0	0	46,6	22,7
590	0	0	45,6	22,7
600	0	0	44,6	22,7
610	0	0	43,5	22,7
620	0	0	45,6	22,7
630	0	0	44,6	22,7
640	0	0	43,5	22,7
650	0	0	42,6	22,7
660	0	0	41,6	22,7
670	0	0	40,6	22,7
680	0	0	39,7	22,7
690	0	0	38,8	22,7
700	0	0	38	22,7
710	0	0	37,2	22,7
720	0	0	36,5	22,7
730	0	0	35,8	22,7
740	0	0	35,1	22,7
750	0	0	34,5	22,7
760	0	0	33,9	22,7
770	0	0	33,3	22,7
780	0	0	32,8	22,7
790	0	0	32,3	22,7
800	0	0	31,8	22,7
810	0	0	31,3	22,7
820	0	0	30,7	22,7
830	0	0	30,4	22,7
840	0	0	30	22,7
850	0	0	29,6	22,7
860	0	0	29,3	22,7
870	0	0	28,9	22,7
880	0	0	28,6	22,7
890	0	0	28,3	22,7

**Πίνακας 3-8:** Αποτελέσματα μετρήσεων για το δοκίμιο No.4 (Τοποθέτηση πάγου).

t (sec)	V (Volt)	I (A) με πάγο	T (°C) με πάγο	T <sub>περιβ</sub> (°C)	T (°C) θερμ. πάγου
0	230	0,293	24,9	23,5	-7,1
10	230	0,242	25	23,5	-7,2
20	230	0,223	26	23,5	-7,2
30	230	0,192	28,1	23,5	-7,3

συνέχεια Πίνακας 3-8					
40	230	0,179	30,4	23,5	-7,3
50	230	0,166	32,7	23,5	-7,4
60	230	0,157	34,8	23,5	-7,4
70	230	0,150	36,8	23,5	-7,4
80	230	0,143	38,6	23,5	-7,4
90	230	0,138	40,2	23,5	-7,4
100	230	0,134	41,7	23,5	-7,4
110	230	0,130	43	23,5	-7,4
120	230	0,126	44,2	23,5	-7,4
130	230	0,124	45,3	23,5	-7,4
140	230	0,121	46,3	23,5	-7,4
150	230	0,119	47,2	23,5	-7,4
160	230	0,118	47,9	23,5	-7,4
170	230	0,115	48,6	23,5	-7,4
180	230	0,114	49,2	23,5	-7,4
190	230	0,113	49,7	23,5	-7,4
200	230	0,112	50,2	23,5	-7,4
210	230	0,111	50,7	23,5	-7,3
220	230	0,110	51	23,5	-7,3
230	230	0,109	51,4	23,5	-7,3
240	230	0,109	51,7	23,5	-7,3
250	230	0,108	52	23,5	-7,3
260	230	0,108	52,2	23,5	-7,3
270	230	0,107	52,5	23,5	-7,2
280	230	0,107	52,6	23,5	-7,2
290	230	0,106	52,8	23,5	-7,2
300	230	0,106	53	23,5	-7,2
310	230	0,106	52,6	23,5	-7,2
320	230	0,106	53	23,5	-7,2
330	230	0,105	53,3	23,5	-7,2
340	230	0,105	53,5	23,5	-7,1
350	230	0,105	53,7	23,5	-7,1
360	230	0,105	53,8	23,5	-7,1
370	230	0,105	53,9	23,5	-7,1
380	230	0,105	54	23,5	-7,1
390	230	0,105	54,1	23,5	-7
400	230	0,105	54,1	23,5	-7
410	230	0,105	54,2	23,5	-7
420	230	0,104	54,3	23,5	-7
430	230	0,104	54,4	23,5	-7
440	230	0,104	54,4	23,5	-7
450	230	0,104	54,4	23,5	-7
460	230	0,104	54,5	23,5	-6,9
470	230	0,104	54,5	23,5	-6,9
480	230	0,104	54,5	23,5	-6,9
490	230	0,104	54,5	23,5	-6,9
500	230	0,104	54,6	23,5	-6,9
510	230	0,104	54,6	23,5	-6,9
520	230	0,104	54,7	23,5	-6,9
530	230	0,104	54,8	23,5	-6,8
540	230	0,104	54,8	23,5	-6,8

**Πίνακας 3-9:** Αποτελέσματα μετρήσεων για το δοκίμιο Νο.5.

t (sec)	V (Volt)	I (A)	T (°C)	T <sub>περιβ</sub> (°C)
0	230	0,066	22,8	22,8
10	230	0,063	22,9	22,8



συνέχεια Πίνακας 3-9				
20	230	0,062	23,2	22,8
30	230	0,061	23,9	22,8
40	230	0,060	24,6	22,8
50	230	0,059	25,4	22,8
60	230	0,058	26,1	22,8
70	230	0,057	26,8	22,8
80	230	0,056	27,5	22,8
90	230	0,054	28,2	22,8
100	230	0,053	28,8	22,8
110	230	0,052	29,3	22,8
120	230	0,051	29,8	22,8
130	230	0,050	30,3	22,8
140	230	0,049	30,8	22,8
150	230	0,048	31,2	22,8
160	230	0,048	31,5	22,8
170	230	0,047	31,9	22,8
180	230	0,046	32,2	22,8
190	230	0,046	32,6	22,8
200	230	0,045	32,9	22,8
210	230	0,045	33,1	22,8
220	230	0,044	33,3	22,8
230	230	0,044	33,6	22,8
240	230	0,043	33,8	22,8
250	230	0,043	34	22,8
260	230	0,042	34,2	22,8
270	230	0,042	34,4	22,8
280	230	0,041	34,6	22,8
290	230	0,041	34,7	22,8
300	230	0,041	34,7	22,8
310	230	0,040	34,7	22,8
320	230	0,040	34,7	22,8
330	230	0,040	34,8	22,8
340	230	0,039	34,8	22,8
350	230	0,039	35	22,8
360	230	0,039	35,1	22,8
370	230	0,039	35,3	22,8
380	230	0,038	35,4	22,8
390	230	0,038	35,5	22,8
400	230	0,038	35,6	22,8
410	230	0,038	35,7	22,8
420	230	0,038	35,8	22,8
430	230	0,037	35,9	22,8
440	230	0,037	36	22,8
450	230	0,037	36,1	22,8
460	230	0,037	36,1	22,8
470	230	0,037	36,2	22,8
480	230	0,037	36,2	22,8
490	230	0,037	36,3	22,8
500	230	0,036	36,3	22,8
510	230	0,036	36,3	22,8
520	230	0,036	36,4	22,8
530	230	0,036	36,4	22,8
540	230	0,036	36,5	22,8
550	0	0	36,5	22,8
560	0	0	36,2	22,8
570	0	0	35,4	22,8
580	0	0	34,8	22,8
590	0	0	34,4	22,8
600	0	0	33,8	22,8
610	0	0	33,5	22,8

συνέχεια Πίνακας 3-9				
620	0	0	33,3	22,8
630	0	0	32,9	22,8
640	0	0	32	22,8
650	0	0	31,8	22,8
660	0	0	31,6	22,8
670	0	0	31,5	22,8
680	0	0	31,2	22,8
690	0	0	30,9	22,8
700	0	0	30,6	22,8
710	0	0	30,4	22,8
720	0	0	30,1	22,8
730	0	0	29,8	22,8
740	0	0	29,6	22,8
750	0	0	29,3	22,8
760	0	0	28,9	22,8
770	0	0	28,7	22,8

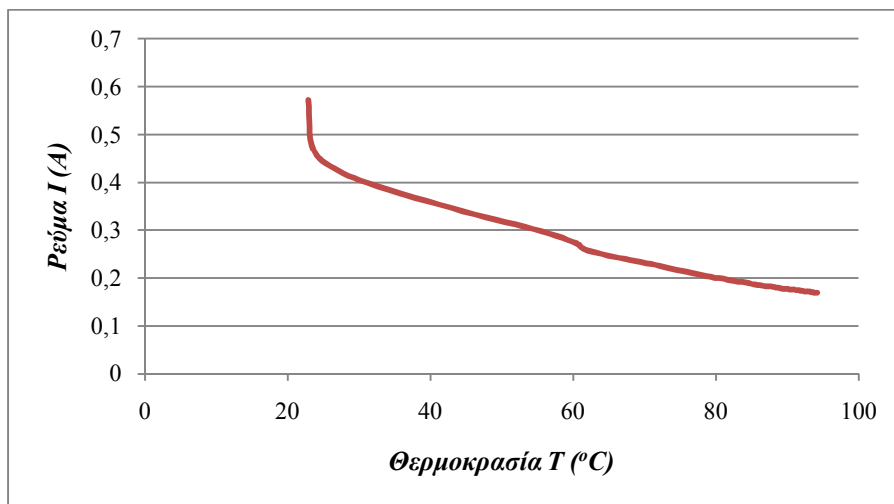
**Πίνακας 3-10:** Αποτελέσματα μετρήσεων για το δοκίμιο Νο.5 (Τοποθέτηση πάγου).

t (sec)	V (Volt)	I (A) με πάγο	T (°C) με πάγο	T <sub>περιβ</sub> (°C)	T (°C) θερμ. πάγου
0	230	0,071	24,6	23,1	-10,1
10	230	0,068	24,7	23,1	-10,4
20	230	0,067	25,3	23,1	-10,6
30	230	0,066	26,1	23,1	-10,7
40	230	0,065	27	23,1	-10,7
50	230	0,064	28	23,1	-10,8
60	230	0,064	28,9	23,1	-10,9
70	230	0,063	29,8	23,1	-10,9
80	230	0,062	30,7	23,1	-10,8
90	230	0,062	31,5	23,1	-10,8
100	230	0,061	32,3	23,1	-10,8
110	230	0,061	33	23,1	-10,8
120	230	0,060	33,6	23,1	-10,8
130	230	0,060	34,2	23,1	-10,8
140	230	0,059	34,9	23,1	-10,8
150	230	0,059	35,4	23,1	-10,8
160	230	0,058	35,9	23,1	-10,8
170	230	0,058	36,4	23,1	-10,8
180	230	0,057	36,9	23,1	-10,8
190	230	0,057	37,3	23,1	-10,8
200	230	0,057	37,7	23,1	-10,8
210	230	0,056	38	23,1	-10,8
220	230	0,056	38,4	23,1	-10,8
230	230	0,056	38,8	23,1	-10,8
240	230	0,056	39,2	23,1	-10,8
250	230	0,055	39,5	23,1	-10,8
260	230	0,055	39,7	23,1	-10,8
270	230	0,055	40	23,1	-10,8
280	230	0,054	40,2	23,1	-10,8
290	230	0,054	40,5	23,1	-10,8
300	230	0,054	40,6	23,1	-10,9
310	230	0,054	40,8	23,1	-10,8
320	230	0,054	41	23,1	-10,8
330	230	0,054	41,2	23,1	-10,8
340	230	0,053	41,4	23,1	-10,8
350	230	0,053	41,5	23,1	-10,8
360	230	0,053	41,6	23,1	-10,8

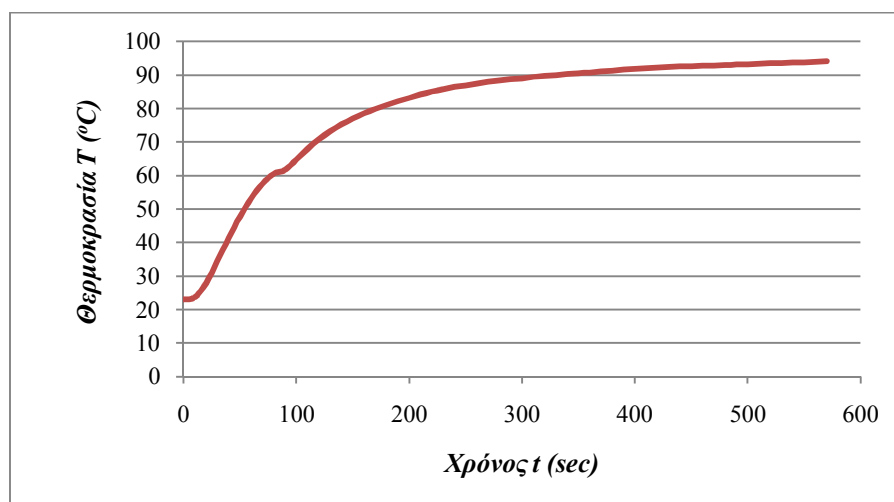
<i>συνέχεια Πίνακας 3-10</i>					
370	230	0,053	41,8	23,1	-10,7
380	230	0,053	41,9	23,1	-10,7
390	230	0,053	42,2	23,1	-10,7
400	230	0,053	42,2	23,1	-10,7
410	230	0,053	42,2	23,1	-10,7
420	230	0,052	42,4	23,1	-10,7
430	230	0,052	42,5	23,1	-10,7
440	230	0,052	42,6	23,1	-10,7
450	230	0,052	42,7	23,1	-10,6
460	230	0,052	42,7	23,1	-10,7
470	230	0,052	42,8	23,1	-10,7
480	230	0,052	43	23,1	-10,7
490	230	0,052	43	23,1	-10,7
500	230	0,052	42,9	23,1	-10,7
510	230	0,052	43	23,1	-10,7
520	230	0,052	43	23,1	-10,7
530	230	0,052	43,1	23,1	-10,7
540	230	0,052	43,1	23,1	-10,6

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

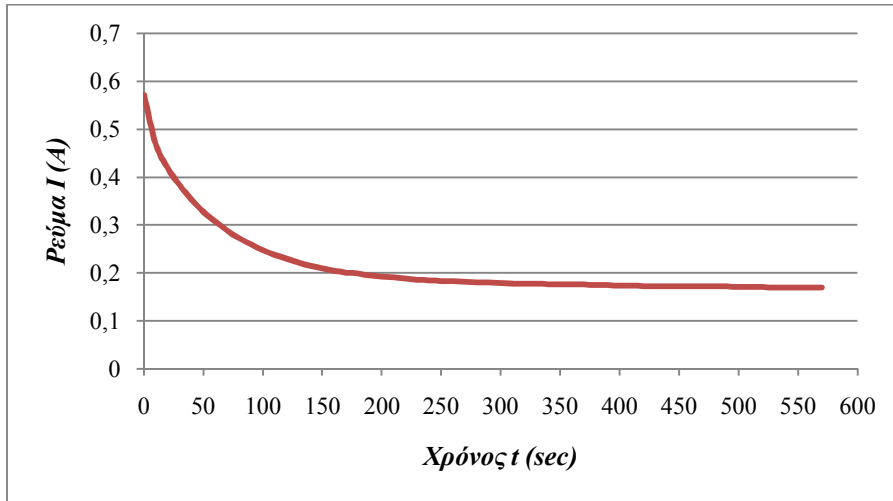
Σύμφωνα με τα δεδομένα των πινάκων 3-1 - 3-10 του προηγούμενου κεφαλαίου προκύπτουν οι επόμενες γραφικές παραστάσεις:



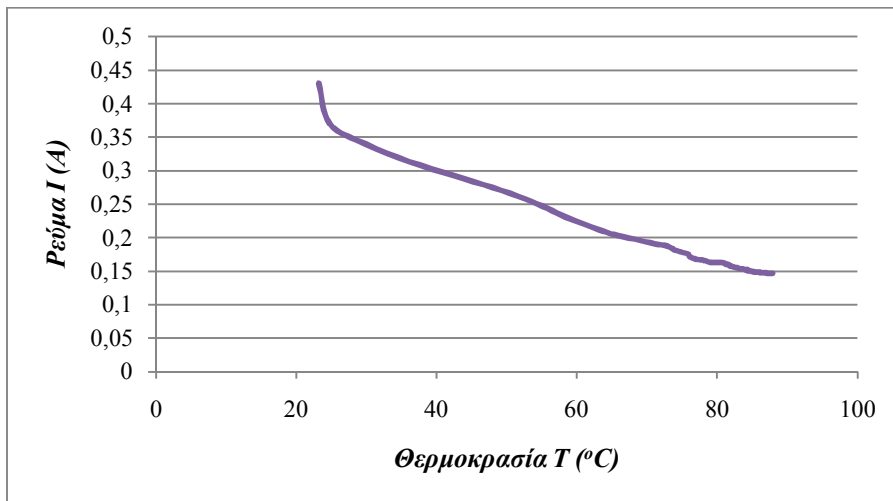
Σχήμα 4-1: Μεταβολή ρεύματος με θερμοκρασία για το δοκίμιο Νο.1 (Χωρίς πάγο).



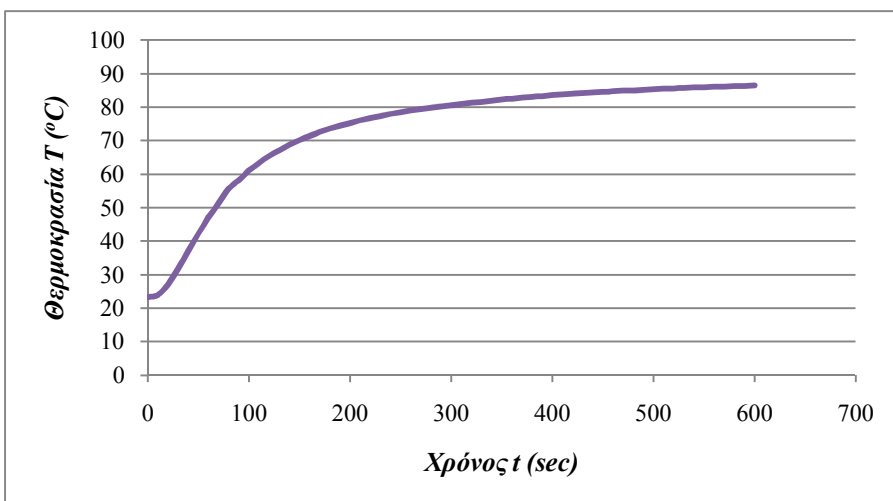
Σχήμα 4-2: Μεταβολή θερμοκρασίας με χρόνο για το δοκίμιο Νο.1 (Χωρίς πάγο).



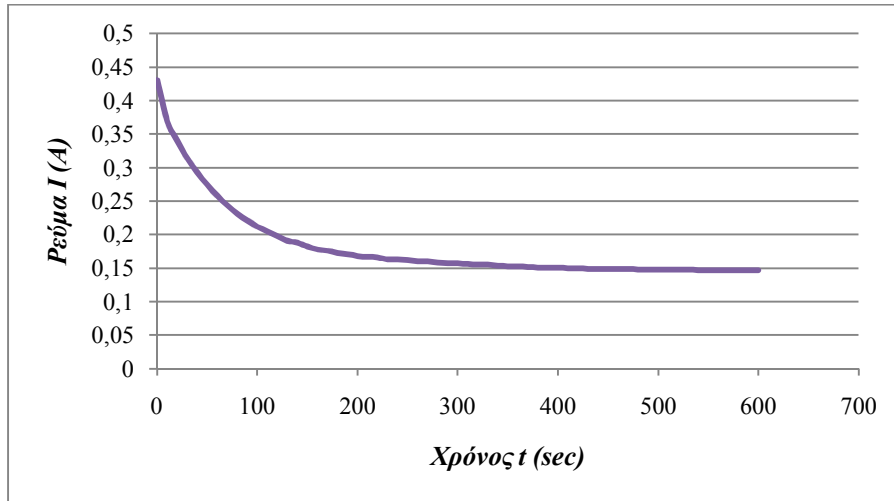
Σχήμα 4-3: Μεταβολή ρεύματος με χρόνο για το δοκίμιο Νο.1 (Χωρίς πάγο).



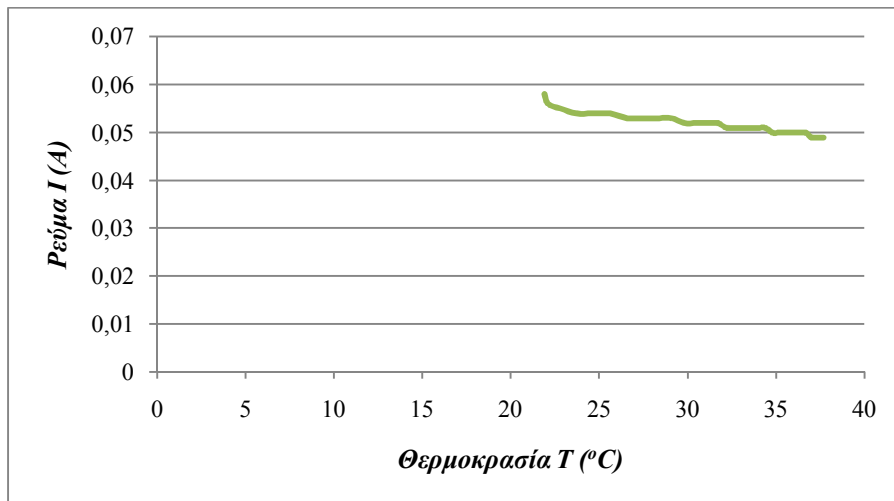
Σχήμα 4-4: Μεταβολή ρεύματος με θερμοκρασία για το δοκίμιο Νο.2 (Χωρίς πάγο).



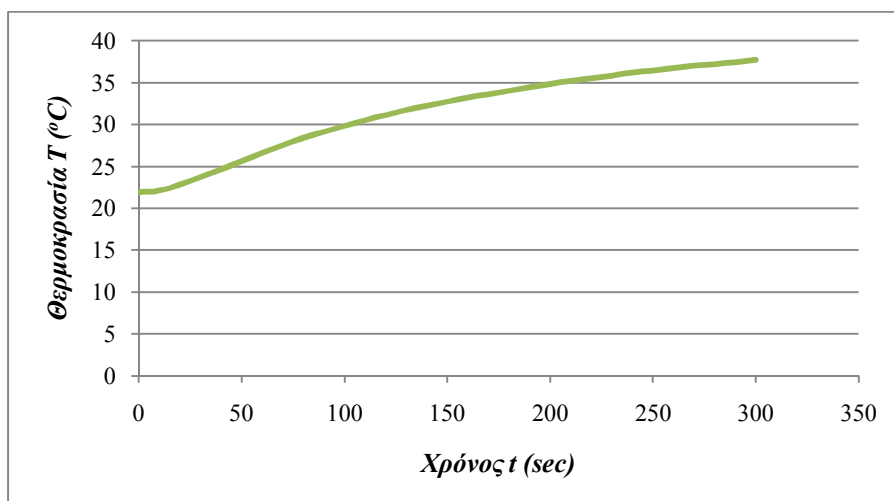
Σχήμα 4-5: Μεταβολή θερμοκρασίας με χρόνο για το δοκίμιο Νο.2 (Χωρίς πάγο).



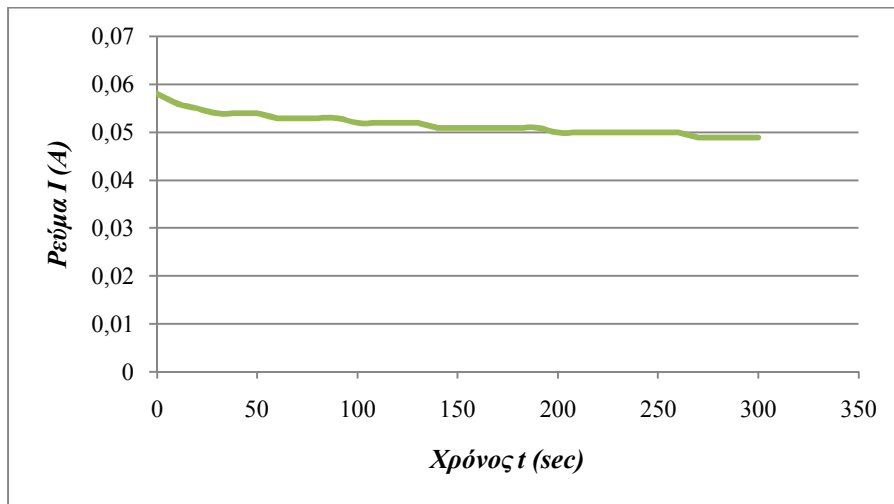
Σχήμα 4-6: Μεταβολή ρεύματος με χρόνο για το δοκίμιο Νο.2 (Χωρίς πάγο).



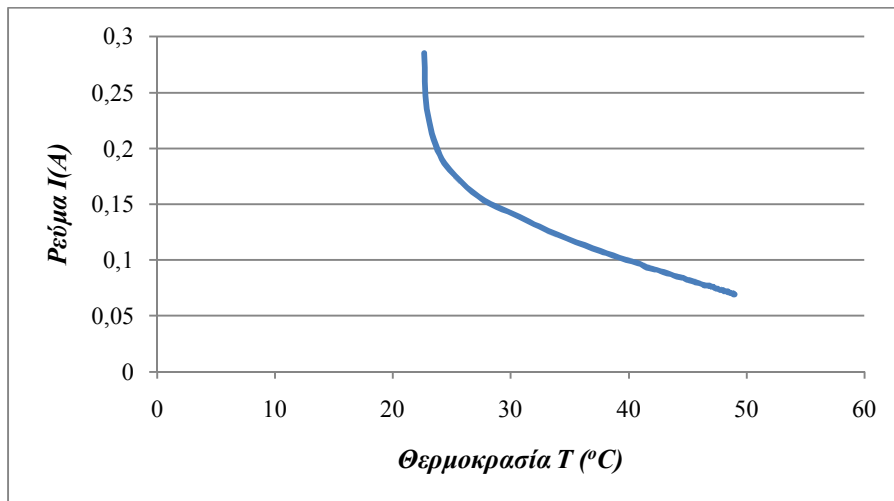
Σχήμα 4-7: Μεταβολή ρεύματος με θερμοκρασία για το δοκίμιο Νο.3 (Χωρίς πάγο).



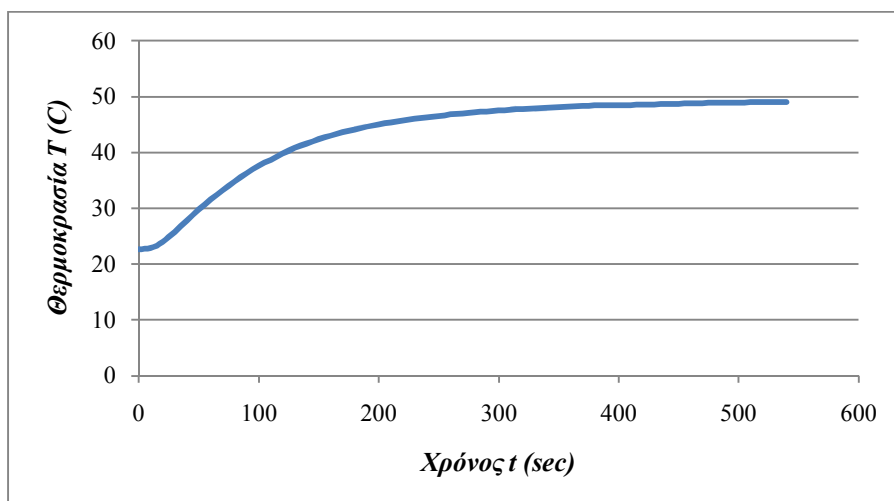
Σχήμα 4-8: Μεταβολή θερμοκρασίας με χρόνο για το δοκίμιο Νο.3 (Χωρίς πάγο).



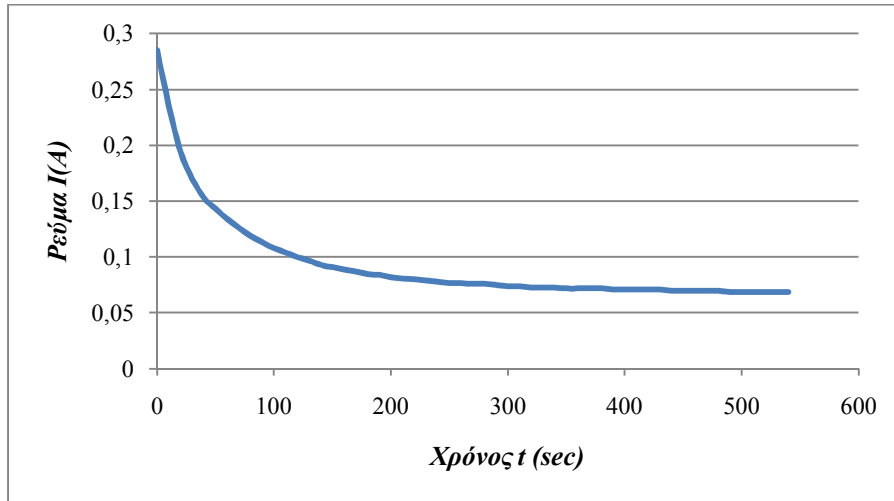
Σχήμα 4-9: Μεταβολή ρεύματος με χρόνο για το δοκίμιο Νο.3 (Χωρίς πάγο).



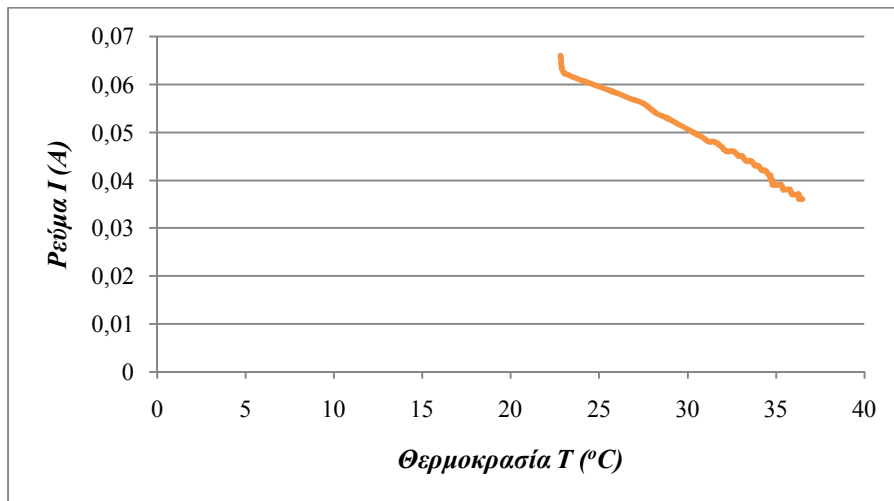
Σχήμα 4-10: Μεταβολή ρεύματος με θερμοκρασία για το δοκίμιο Νο.4 (Χωρίς πάγο).



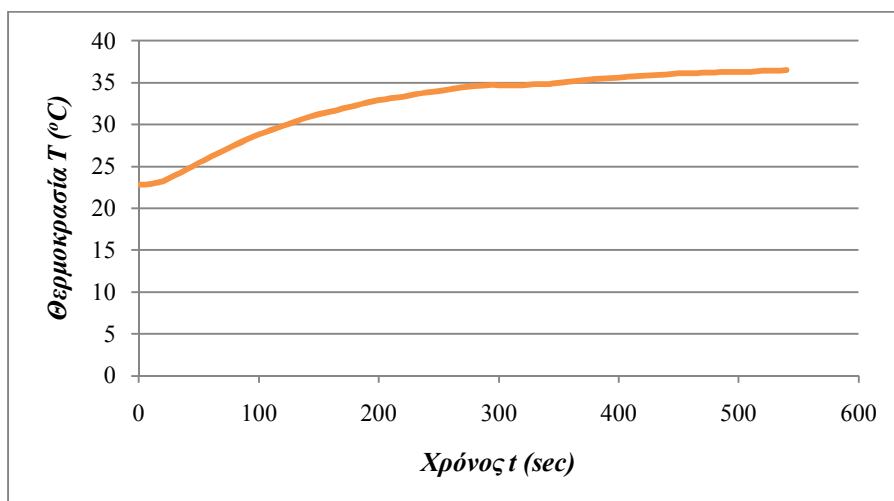
Σχήμα 4-11: Μεταβολή θερμοκρασίας με χρόνο για το δοκίμιο Νο.4 (Χωρίς πάγο).



Σχήμα 4-12: Μεταβολή ρεύματος με χρόνο για το δοκίμιο No.4 (Χωρίς πάγο).

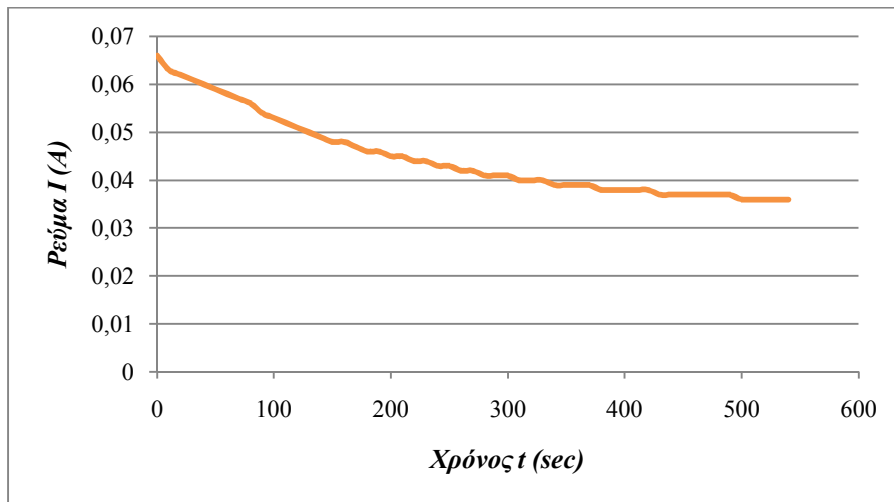


Σχήμα 4-13: Μεταβολή ρεύματος με θερμοκρασία για το δοκίμιο No.5 (Χωρίς πάγο).



Σχήμα 4-14: Μεταβολή θερμοκρασίας με χρόνο για το δοκίμιο No.5 (Χωρίς πάγο).





Σχήμα 4-15: Μεταβολή ρεύματος με χρόνο για το δοκίμιο No.5 (Χωρίς πάγο).

Από τα διαγράμματα 4-1 έως 4-15 μπορεί να παρατηρήσει κανείς μια όμοια συμπεριφορά των πέντε δοκιμίων. Πιο συγκεκριμένα από τα διαγράμματα 4-3, 4-6 και 4-12 παρατηρούμε σχεδόν πανομοιότυπη συμπεριφορά της μεταβολής του ρεύματος εκκίνησης με το πέρασμα το χρόνου. Με την έναρξη της τροφοδοσίας των τριών αυτών δοκιμίων η απορροφούμενη ένταση ρεύματος παρουσιάζει για κάποιο χρονικό διάστημα (~200sec) αισθητή μείωση ενώ στην συνέχεια παρατηρείται μια πιο αργή μεν αλλά συνεχιζόμενη φθίνουσα μεταβολή δε του ρεύματος που απορροφά το καλώδιο για όσο αυτό βρίσκεται υπό τάση. Σε γενικές γραμμές παρατηρείται μια αρκετά ομαλή καμπύλη μείωσης του ρεύματος σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Από την άλλη πλευρά ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και στα διαγράμματα 4-9 και 4-15 για τα δοκίμια No.3 και No.5, με μικρότερο εύρος μεταβολής του ρεύματος, λόγω της αρκετά χαμηλής θερμικής ικανότητας (10W/m) των δύο αυτών δοκιμίων. Στα δύο αυτά διαγράμματα υπάρχουν αρκετά χρονικά διαστήματα στα οποία το ρεύμα παραμένει σταθερό έως ότου αλλάξει τιμή και μειωθεί.

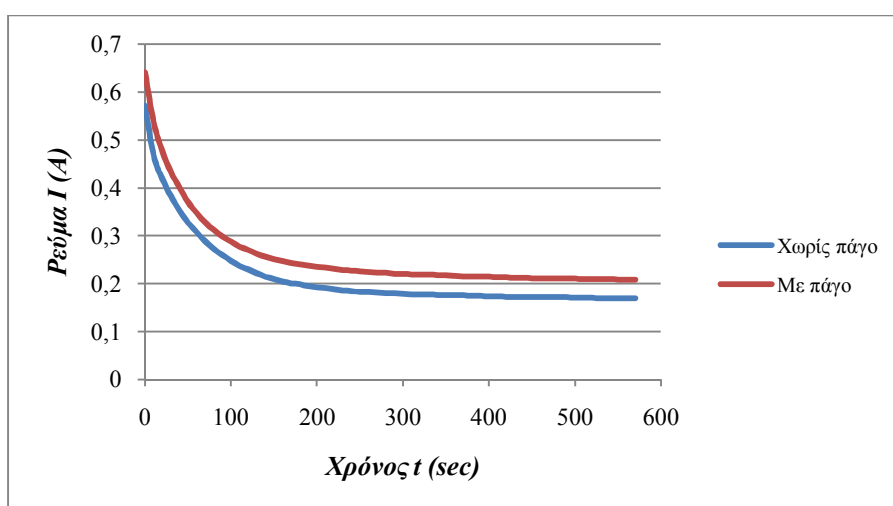
Μπορεί κανείς να πει ότι αυτή η μείωση του ρεύματος που απορροφά το καλώδιο είναι αναμενόμενη, διότι η αύξηση της θερμοκρασίας του καλωδίου με την πάροδο του χρόνου καθώς αυτό είναι σε λειτουργία, λόγω της κατασκευής του (βλ. παρ.1.5.1.1), έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απορροφούμενης εντάσεως (αυτορρυθμιστική ιδιότητα).

Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η ένταση του ρεύματος για κάθε δοκίμιο διαφοροποιείται με αναμενόμενο τρόπο ανάλογα με τη θερμική ικανότητα του θερμικού καλωδίου. Επιβεβαιώνεται δηλαδή η πρόβλεψη ότι το καλώδιο με την μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής θερμότητας, κινείται σε υψηλότερα επίπεδα απορροφούμενου ρεύματος. Το δοκίμιο No.1 με την μεγαλύτερη θερμική ικανότητα έχει το υψηλότερο ρεύμα απορρόφησης κατά την εκκίνηση (0,572 A), το No.2 με την αμέσως μικρότερη ικανότητα έχει το αμέσως μικρότερο ρεύμα (0,431 A), κ.ο.κ. Αντίστοιχα για το δοκίμιο No.3 (25W/m) η ένταση είναι 0,285 A. Για δοκίμια No.3 και No.5, τα οποία είναι ίδιας θερμικής ικανότητας (10W/m), απαιτούν μικρότερο ρεύμα κατά την εκκίνηση (0,058 A και 0,066 A αντίστοιχα). Η μικρή διαφορά στις

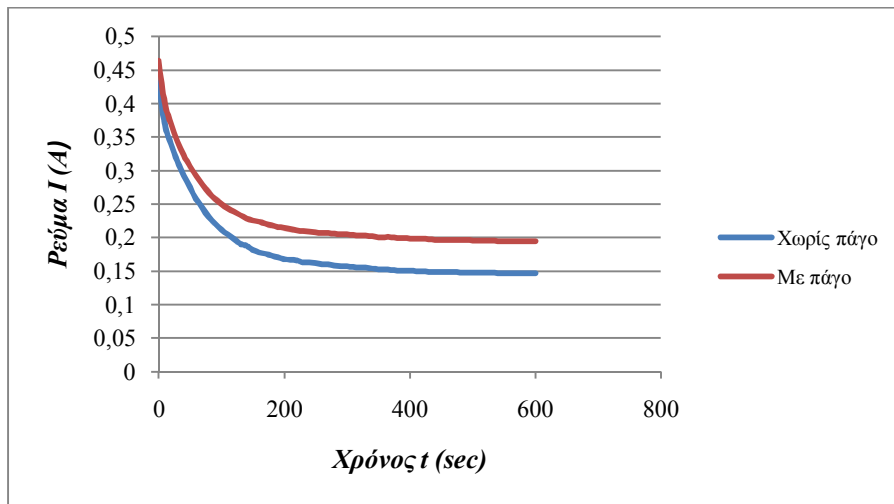
τιμές των δύο τελευταίων-παρόλο που έχουν την ίδια θερμική ικανότητα-πιθανόν οφείλεται στην διαφορετική κατασκευή των δύο τύπων καλωδίων Α και Β.

Όσον αφορά τη θερμοκρασιακή μεταβολή, παρατηρείται και σε αυτή τη περίπτωση όμοια συμπεριφορά των πέντε δοκιμίων. Αρχικά η θερμοκρασία που αναπτύσσουν τα θερμικά καλώδια αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό για κάποιο χρονικό διάστημα-το οποίο διαφοροποιείται λόγω της διαφορετικής τους θερμικής ικανότητας-ενώ στην συνέχεια όντας η θερμοκρασία περιβάλλοντος σταθερή, η θερμοκρασία τους αυξάνεται με πιο αργό και σταθερό ρυθμό, για όσο χρόνο τίθενται σε λειτουργία. Οι καμπύλες των σχημάτων 4-2, 4-5, 4-8, 4-11, 4-14 έχουν λοιπόν την ίδια μορφή. Η διαφορά έγκειται στις διαφορετικές τιμές μέγιστων θερμοκρασιών που αγγίζουν τα πέντε δοκίμια σε ίδια χρονικά σημεία, πράγμα το οποίο εν πολλοίς οφείλεται στην διαφορετική ικανότητα παραγωγής θερμικής ισχύος των επιμέρους θερμικών καλωδίων. Αυτό μπορεί να καταστεί σαφές αν επιλέξει κανείς να δει τις τιμές των θερμοκρασιών των πέντε δοκιμίων σε συγκεκριμένο χρόνο, π.χ. 200sec. Σε αυτό το χρονικό σημείο οι τιμές των θερμοκρασιών των δοκιμίων Νο.1 έως 5 είναι κατά σειρά: 83,2 °C, 75,3 °C, 34,8 °C, 45 °C, 32,9 °C. Επιβεβαιώνεται εν ολίγοις ότι το θερμικό καλώδιο με την υψηλότερη ικανότητα θα έχει την υψηλότερη θερμοκρασία, κ.ο.κ.

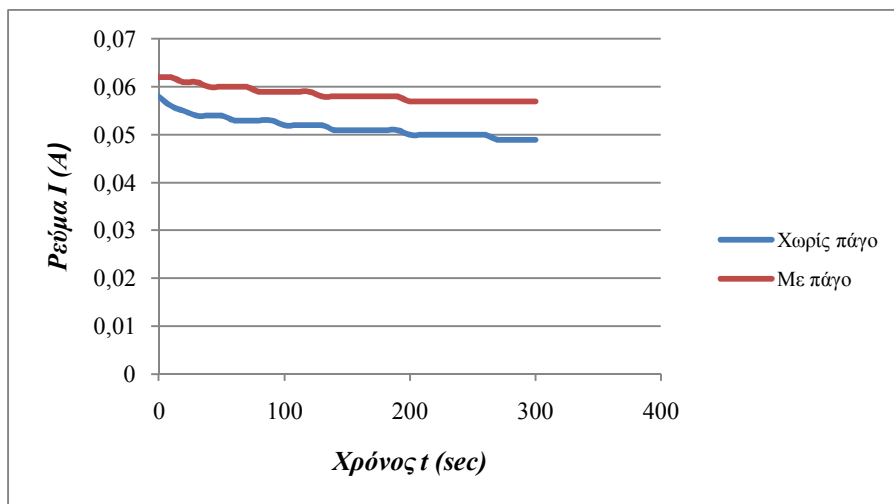
Τέλος στα διαγράμματα 4-1, 4-4, 4-7, 4-10, 4-13 απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής του ρεύματος συναρτήσει της μεταβολής της θερμοκρασίας. Γενική παρατήρηση όπως έχει ήδη προαναφερθεί είναι ότι η ένταση του ρεύματος μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του θερμικού καλωδίου. Αρχικά για τα πέντε δοκίμια παρατηρείται μια σχεδόν κατακόρυφη πτώση του ρεύματος απορρόφησης για κάποιο χρονικό διάστημα από την έναρξη λειτουργίας. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα εμφανές στα διαγράμματα 4-1,4-4 και 4-10, όπου το εύρος τιμών είναι μεγαλύτερο και που αφορούν τα θερμικά καλώδια υψηλότερης θερμικής ισχύος. Μετά την πάροδο κάποιου χρονικού διαστήματος όπου η θερμοκρασία στα πέντε δοκίμια φτάνει σε υψηλά επίπεδα παρατηρείται μια πιο αργή μεταβολή του ρεύματος όπως γίνεται σαφές από αυτά τα διαγράμματα.



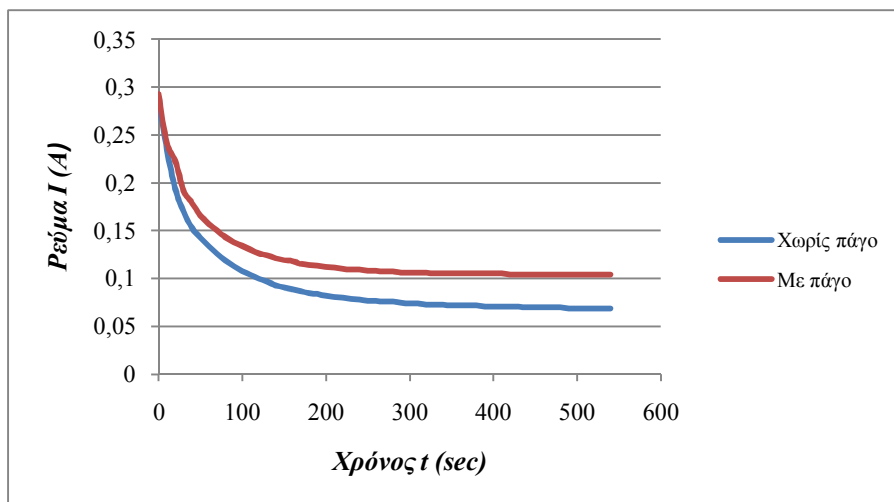
**Σχήμα 4-16:** Σύγκριση μεταβολής ρευμάτων απορρόφησης με τον χρόνο για το δοκίμιο Νο.1 μετά την τοποθέτηση πάγου και χωρίς αυτόν.



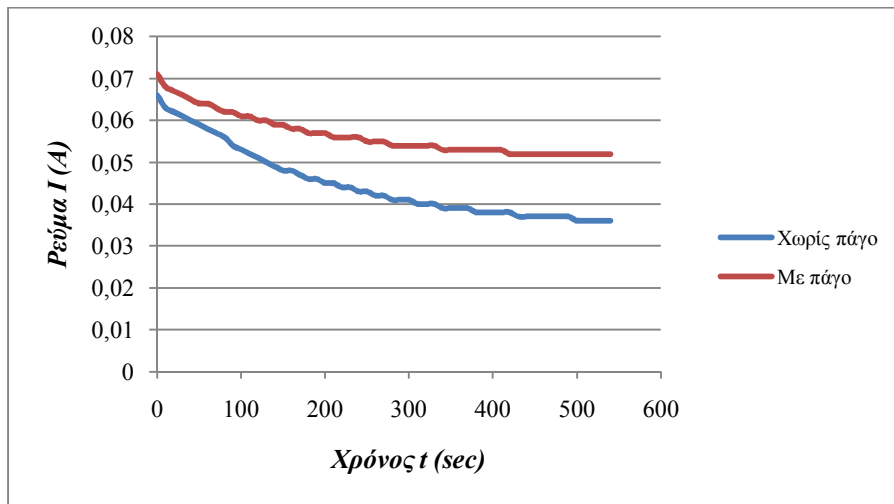
**Σχήμα 4-17:** Σύγκριση μεταβολής ρευμάτων απορρόφησης με τον χρόνο για το δοκίμιο Νο.2 μετά την τοποθέτηση πάγου και χωρίς αυτόν.



**Σχήμα 4-18:** Σύγκριση μεταβολής ρευμάτων απορρόφησης με τον χρόνο για το δοκίμιο Νο.3 μετά την τοποθέτηση πάγου και χωρίς αυτόν.

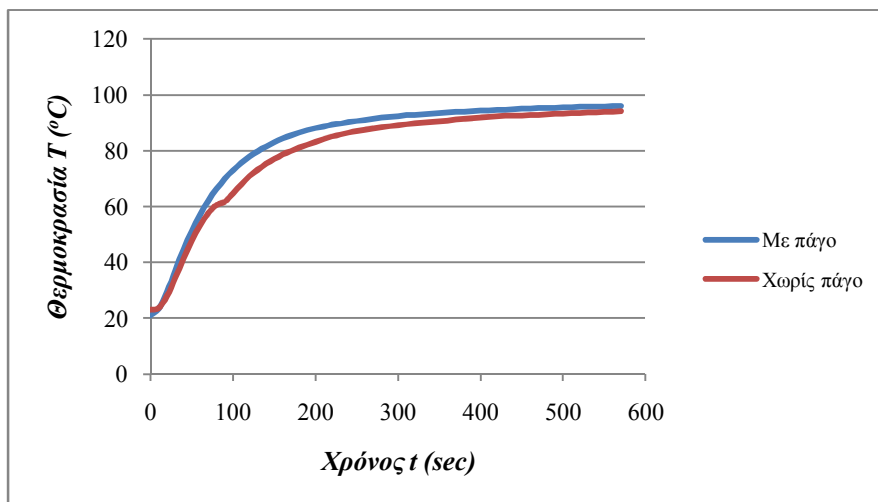


**Σχήμα 4-19:** Σύγκριση μεταβολής ρευμάτων απορρόφησης με τον χρόνο για το δοκίμιο Νο.4 μετά την τοποθέτηση πάγου και χωρίς αυτόν.

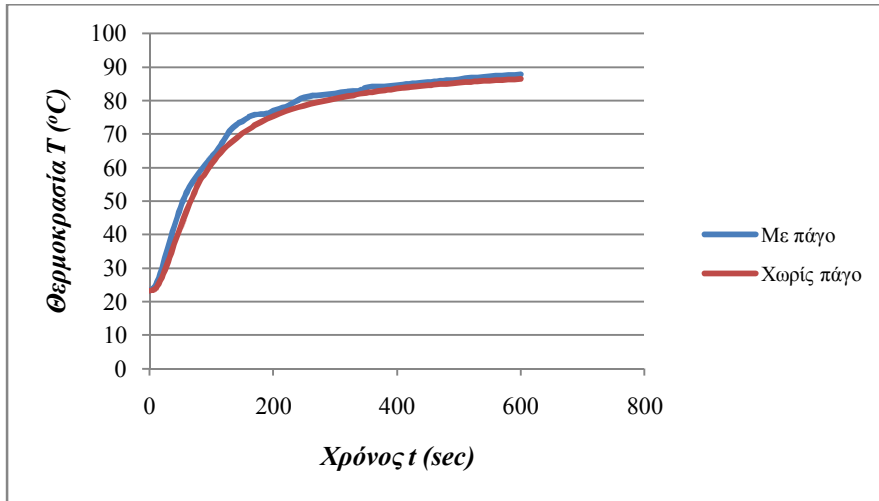


**Σχήμα 4-20:** Σύγκριση μεταβολής ρευμάτων απορρόφησης με τον χρόνο για το δοκίμιο No.5 μετά την τοποθέτηση πάγου και χωρίς αυτόν.

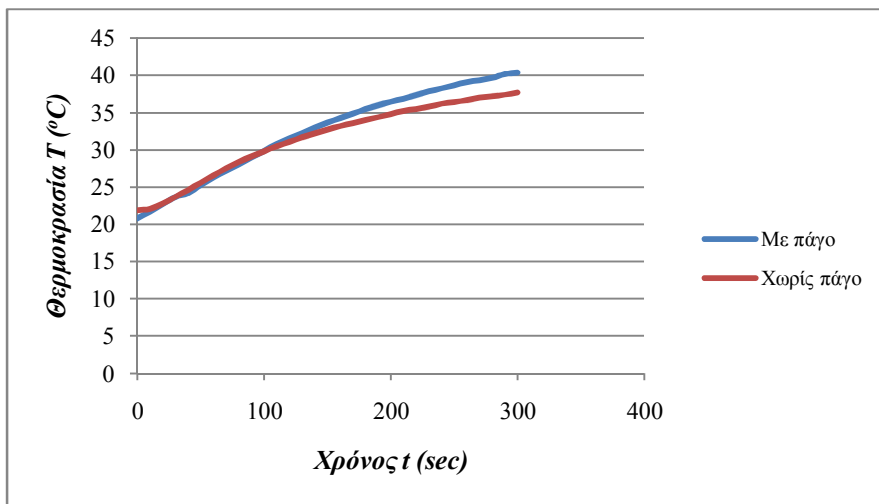
Στα διαγράμματα 4-16 έως 4-20 γίνεται σύγκριση των εντάσεων των ρευμάτων απορρόφησης των επιμέρους δοκιμίων σύμφωνα με τις μετρήσεις έγιναν, δηλαδή την καταγραφή του ρεύματος με τοποθετημένο πάγο στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου και καταγραφή του ρεύματος χωρίς αυτόν. Όπως γίνεται αντιληπτό από αυτά τα διαγράμματα, υπάρχει μια αισθητή διαφορά στις τιμές των τιμών εντάσεων που ελήφθησαν για τα δύο πειράματα. Οι τιμές αυτές είναι και για τα πέντε δοκίμια μεγαλύτερες στην περίπτωση που έχει τοποθετηθεί πάγος, σε όλο το χρονικό εύρος πραγματοποίησης των μετρήσεων. Αντίθετα οι τιμές του ρεύματος απορρόφησης κυμαίνονται σε χαμηλότερα επίπεδα, στην περίπτωση που το δοκίμιο εκτίθεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού το αυτορρυθμιζόμενο θερμικό καλώδιο σε ανταπόκριση στις χαμηλότερες θερμοκρασιακές συνθήκες απορροφά περισσότερο ρεύμα για να αποδώσει μεγαλύτερη θερμότητα (βλ. παρ. 1.5.1.1).



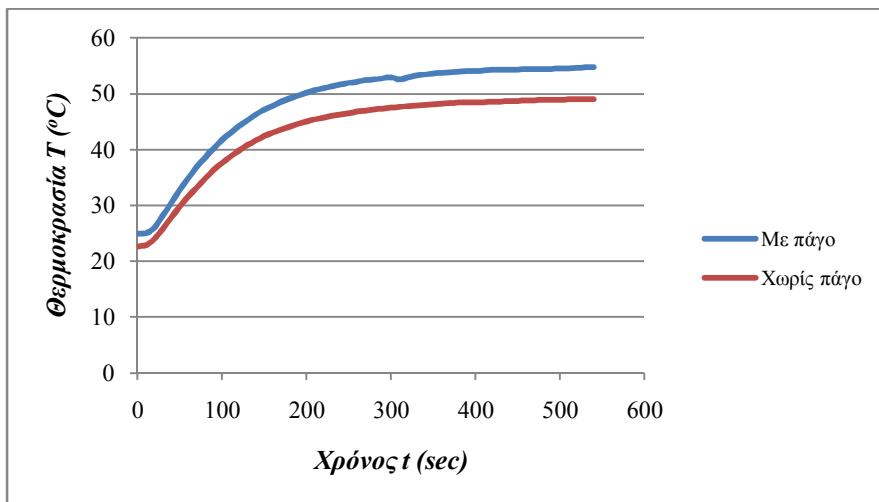
**Σχήμα 4-21:** Σύγκριση μεταβολής θερμοκρασίας καλωδίου με τον χρόνο για το δοκίμιο No.1 μετά την τοποθέτηση πάγου και χωρίς αυτόν.



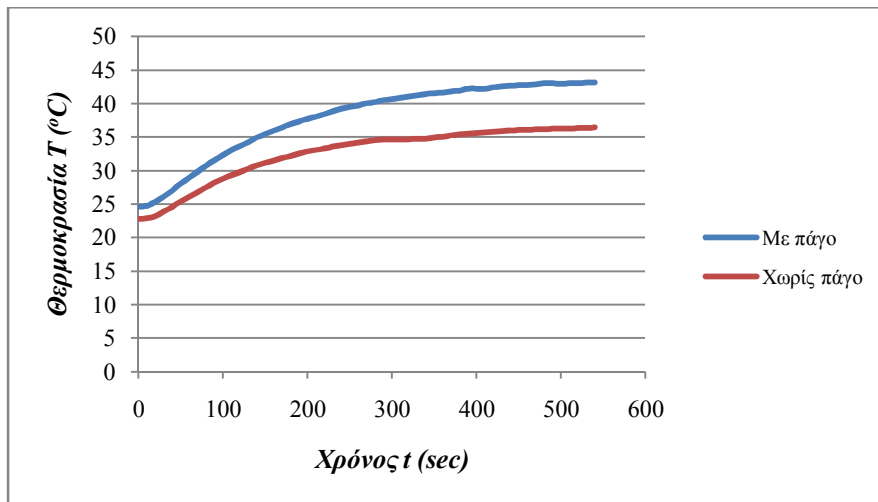
Σχήμα 4-22: Σύγκριση μεταβολής θερμοκρασίας καλωδίου με τον χρόνο για το δοκίμιο Νο.2 μετά την τοποθέτηση πάγου και χωρίς αυτόν.



Σχήμα 4-23: Σύγκριση μεταβολής θερμοκρασίας καλωδίου με τον χρόνο για το δοκίμιο Νο.3 μετά την τοποθέτηση πάγου και χωρίς αυτόν.

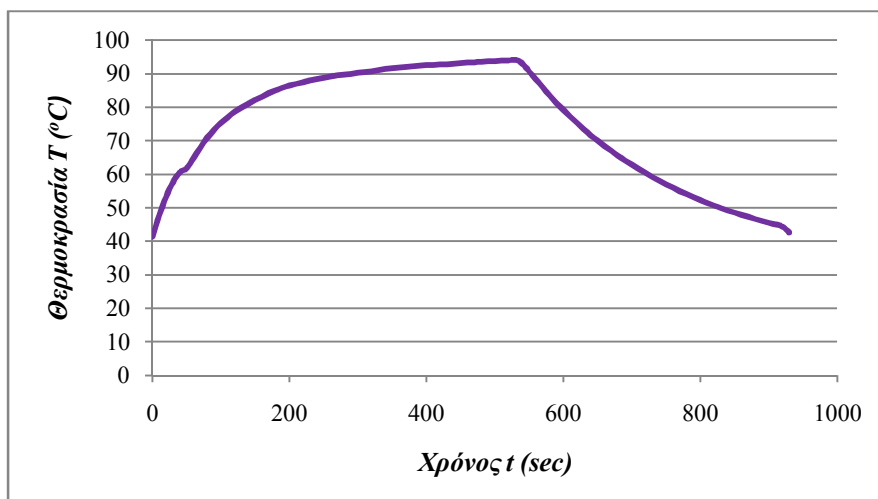


Σχήμα 4-24: Σύγκριση μεταβολής θερμοκρασίας καλωδίου με τον χρόνο για το δοκίμιο Νο.4 μετά την τοποθέτηση πάγου και χωρίς αυτόν.

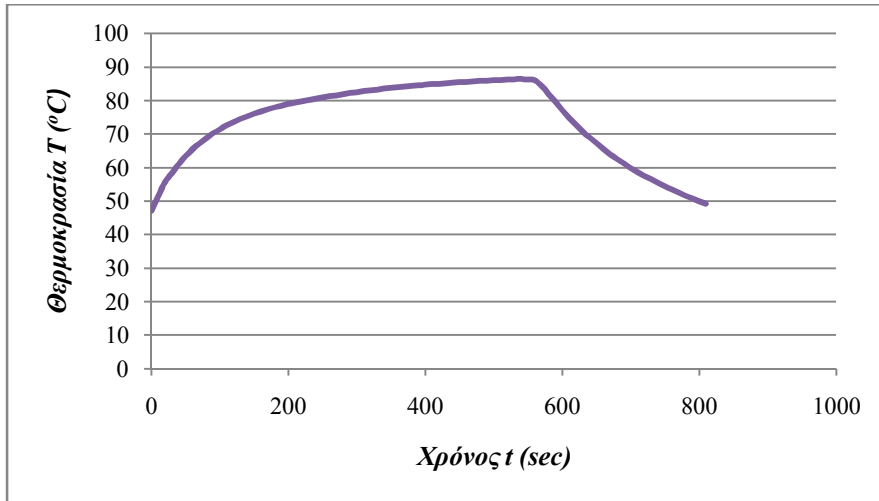


*Σχήμα 4-25: Σύγκριση μεταβολής θερμοκρασίας καλωδίου με τον χρόνο για το δοκίμιο No.5 μετά την τοποθέτηση πάγου και χωρίς αυτόν.*

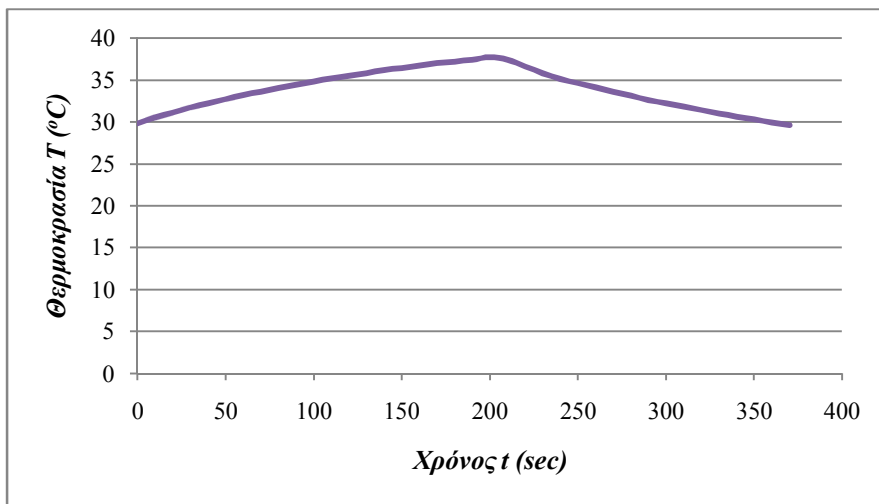
Αντίστοιχα στα διαγράμματα 4-21 έως 4-25 απεικονίζεται η θερμοκρασιακή μεταβολή στην περίπτωση που στο δοκίμιο έχει τοποθετηθεί πάγος και στην περίπτωση που αυτό εκτίθεται στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Από αυτά τα διαγράμματα παρατηρεί κανείς μικρή απόκλιση στις τιμές των θερμοκρασιών που ελήφθησαν για τις δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση της τοποθέτησης πάγου οι τιμές είναι των θερμοκρασιών των δοκιμίων είναι λίγο μεγαλύτερες σε όλο το χρονικό εύρος σε σχέση με την περίπτωση που αυτό εκτίθεται στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό καθίσταται περισσότερο σαφές στα διαγράμματα 4-24 και 4-25 που αφορούν τα δοκίμια No.4 και 5 αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο κατ' αντιστοιχία με τα διαγράμματα 4-16 έως 4-20 που αφορούν το ρεύμα, αφού το αυτορυθμιζόμενο θερμικό καλώδιο τείνει να παράγει περισσότερη θερμότητα σε χαμηλότερες συνθήκες θερμοκρασίας.



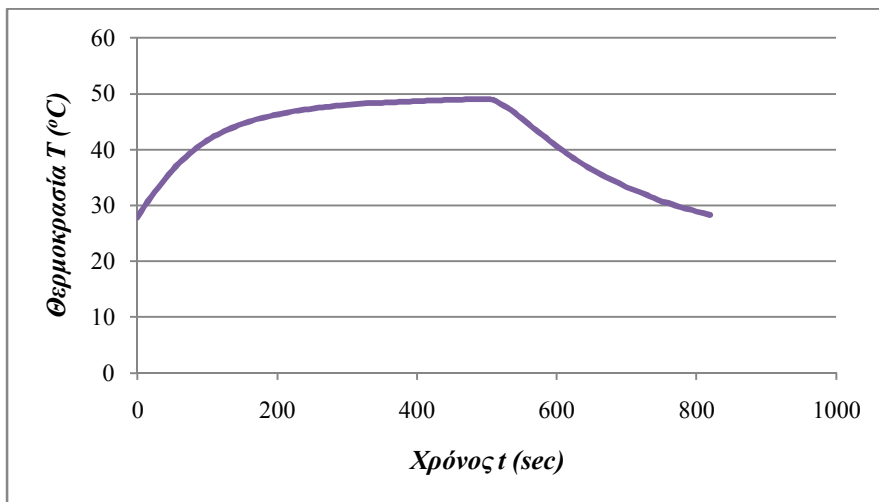
*Σχήμα 4-26: Σύγκριση χρονικής διάρκειας ανόδου θερμοκρασίας του δοκιμίου No.1 (καλώδιο υπό τάση) και χρονικής διάρκειας πτώσης της θερμοκρασίας (καλώδιο εκτός λειτουργίας).*



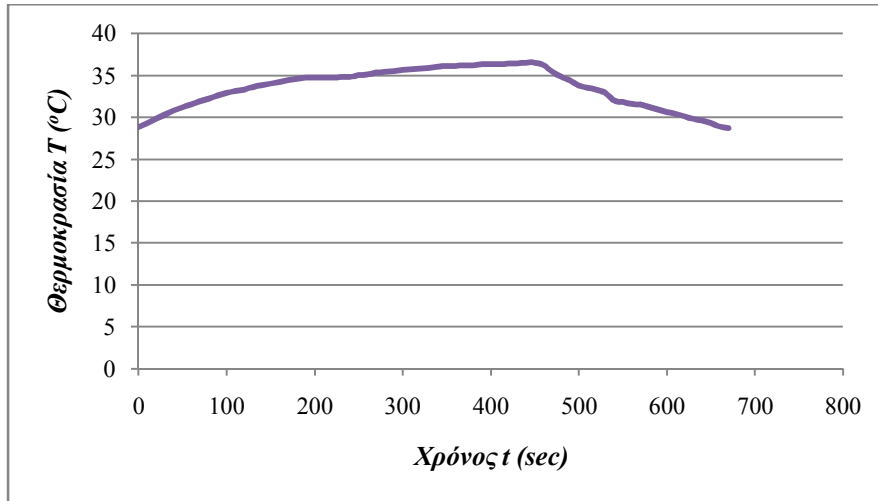
**Σχήμα 4-27:** Σύγκριση χρονικής διάρκειας ανόδου θερμοκρασίας του δοκιμίου No.2 (καλώδιο υπό τάση) και χρονικής διάρκειας πτώσης της θερμοκρασίας (καλώδιο εκτός λειτουργίας).



**Σχήμα 4-28:** Σύγκριση χρονικής διάρκειας ανόδου θερμοκρασίας του δοκιμίου No.3 (καλώδιο υπό τάση) και χρονικής διάρκειας πτώσης της θερμοκρασίας (καλώδιο εκτός λειτουργίας).



**Σχήμα 4-29:** Σύγκριση χρονικής διάρκειας ανόδου θερμοκρασίας του δοκιμίου No.4 (καλώδιο υπό τάση) και χρονικής διάρκειας πτώσης της θερμοκρασίας (καλώδιο εκτός λειτουργίας).



**Σχήμα 4-30:** Σύγκριση χρονικής διάρκειας ανόδου θερμοκρασίας του δοκιμίου No.5 (καλώδιο υπό τάση) και χρονικής διάρκειας πτώσης της θερμοκρασίας (καλώδιο εκτός λειτουργίας).

Στα διαγράμματα 4-26 έως 4-30 απεικονίζονται οι καμπύλες ανόδου-πτώσης της θερμοκρασίας σύμφωνα με τις μετρήσεις που ελήφθησαν για τη θερμοκρασία όταν το καλώδιο ήταν υπό τάση και στη συνέχεια όταν διακόπτονταν η τροφοδοσία του καλωδίου. Οι καμπύλες αφορούν έναν κύκλο λειτουργίας του δοκιμίου, δηλαδή η άνοδος και η πτώση είναι μεταξύ περίπου των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων-όσο αυτό ήταν εφικτό από τις μετρήσεις που ελήφθησαν, αφού δεν συνέπιπταν πάντοτε οι τιμές που καταγράφηκαν κατά την άνοδο της θερμοκρασίας του θερμικού καλωδίου και κατά την κάθοδο αυτής. Αυτό που διαπιστώνει κανείς είναι ότι απαιτείται και στις πέντε περιπτώσεις μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για να αυξήσει το καλώδιο την θερμοκρασία του από μια συγκεκριμένη τιμή σε σχέση με τον χρόνο που απαιτείται για να μειωθεί και να φτάσει αυτήν την τιμή, όταν δεν βρίσκεται υπό τάση. Ουσιαστικά το θερμικό καλώδιο ψύχεται πιο γρήγορα απ' ό τι θερμαίνεται.

Στη συνέχεια επιχειρείται υπολογισμός της ενέργειας που καταναλώνεται σε κάθε ένα από τα πέντε καλώδια. Θα χρησιμοποιηθεί μια εκ των μεθόδων διακριτής αριθμητικής ολοκλήρωσης αφού είναι γνωστή η εισερχόμενη ηλεκτρική ισχύς  $P_{in}$  σε διακριτά χρονικά διαστήματα λήψης των μετρήσεων (10sec). Πιο συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του τραπεζίου.

Για μια γενική περίπτωση συνάρτησης, της οποίας είναι γνωστές οι τιμές σε  $n$  σημεία  $(x_1, f(x_1)), (x_2, f(x_2)), (x_3, f(x_3)), \dots, (x_n, f(x_n))$ , όπου,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  είναι σε

αύξουσα σειρά, η κατά προσέγγιση τιμή του ολοκληρώματος  $\int_{x_1}^{x_n} f(x)dx$  δίνεται από τη

σχέση:

$$\int_{x_1}^{x_n} f(x)dx = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx + \int_{x_2}^{x_3} f(x)dx + \dots + \int_{x_{n-1}}^{x_n} f(x)dx$$

$$\approx (x_2 - x_1) \frac{f(x_1) + f(x_2)}{2} + (x_3 - x_2) \frac{f(x_2) + f(x_3)}{2} + \dots$$



$$\dots\dots + (x_n - x_{n-1}) \frac{f(x_{n-1}) + f(x_n)}{2} \quad (4.1)$$

Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί τον κανόνα του τραπεζίου στα διαστήματα  $[x_1, x_2]$ ,  $[x_2, x_3]$ ,  $\dots$ ,  $[x_{n-1}, x_n]$  και εν συνεχεία αθροίζει τις ληφθείσες τιμές.

Στην περίπτωση που όλα τα υποδιαστήματα είναι ισαπέχοντα με σταθερό μήκος  $h$ , ο παραπάνω τύπος γράφεται ως εξής:

$$\int_{x_0}^{x_N} f(x) dx = h \left[ \frac{1}{2} f(x_0) + \sum_{i=1}^{N-1} f(x_i) + \frac{1}{2} f(x_N) \right]$$

Στην περίπτωση μας γνωρίζουμε ότι για να υπολογίσουμε την ενέργεια  $E$  που καταναλώνεται για δεδομένη ισχύ  $P$  σε χρονικό διάστημα  $t$  ισχύει:

$$E = \int_0^t P dt \quad (4.2)$$

Η απορροφημένη ηλεκτρική ισχύς  $P_{in}$  του θερμικού καλωδίου για κάθε χρονική στιγμή μπορεί να υπολογιστεί με πολλαπλασιασμό της τιμής της τάσης (230 V) με την αντίστοιχη τιμή του ρεύματος, δηλαδή από τον γνωστό τύπο:

$$P_m = V \cdot I \quad (4.3)$$

Στους παραπάνω πίνακες έχουμε υπολογίσει για χρόνους  $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots, t_n$  τις αντίστοιχες τιμές της ηλεκτρικής ισχύος  $P_1, P_2, P_3, P_4, \dots, P_n$  που απορροφά το θερμικό καλώδιο για το χρονικό διάστημα που έχει τεθεί σε λειτουργία. Μπορούμε λοιπόν για κάθε χρονικό διάστημα  $[0, t_1], [t_1, t_2], [t_2, t_3], [t_3, t_4], \dots, [t_{n-1}, t_n]$  να υπολογίσουμε την αντίστοιχη ενέργεια που καταναλώνεται, σύμφωνα με την μέθοδο που περιγράφηκε παραπάνω.

Για το χρονικό διάστημα  $[0, t_1]$  η ενέργεια θα είναι

$$E_1 = \int_0^{t_1} P dt \Rightarrow E_1 = t_1 \cdot \frac{P(0) + P(t_1)}{2}$$

Για το χρονικό διάστημα  $[t_1, t_2]$  η ενέργεια θα είναι:

$$E_2 = \int_0^{t_1} P dt + \int_{t_1}^{t_2} P dt \Rightarrow E_2 = t_1 \cdot \frac{P(0) + P(t_1)}{2} + (t_2 - t_1) \frac{P(t_1) + P(t_2)}{2}$$

κ.ο.κ., ενώ για το χρονικό διάστημα  $[t_{n-1}, t_n]$  θα είναι:

$$E_n = \int_0^{t_1} P dt + \int_{t_1}^{t_2} P dt + \dots + \int_{t_{n-1}}^{t_n} P dt \Rightarrow$$

$$E_n = t_1 \cdot \frac{P(0) + P(t_1)}{2} + (t_2 - t_1) \frac{P(t_1) + P(t_2)}{2} + \dots + (t_n - t_{n-1}) \frac{P(t_{n-1}) + P(t_n)}{2}$$

Επειδή οι τιμές στις μετρήσεις ελήφθησαν σε σταθερά χρονικά διαστήματα, η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών τιμών είναι σταθερή και ίση με 10sec.

Σύμφωνα με τα όσα αναπτύχθηκαν παραπάνω, παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες οι καταναλισκόμενες ενέργειες των πέντε καλωδίων.

**Πίνακας 4-1:** Καταναλισκόμενη ενέργεια για το δοκίμιο Νο.1.

t (sec)	I (A) χωρίς πάγο	P <sub>m</sub> (W)	E (Wh)
0	0,572	131,56	0
10	0,468	107,64	19,93
20	0,419	96,37	36,93
30	0,383	88,09	52,31
40	0,353	81,19	66,41
50	0,327	75,21	79,45
60	0,307	70,61	91,6
70	0,288	66,24	103
80	0,272	62,56	113,74
90	0,259	59,57	123,91
100	0,247	56,81	133,61
110	0,237	54,51	142,89
120	0,229	52,67	151,82
130	0,221	50,83	160,44
140	0,214	49,22	168,78
150	0,209	48,07	176,89
160	0,204	46,92	184,81
170	0,200	46	192,55
180	0,198	45,54	200,18
190	0,194	44,62	207,69
200	0,192	44,16	215,09
210	0,190	43,7	222,41
220	0,187	43,01	229,64
230	0,185	42,55	236,77
240	0,184	42,32	243,84
250	0,182	41,86	250,85
260	0,182	41,86	257,83
270	0,181	41,63	264,79
280	0,180	41,4	271,71
290	0,179	41,17	278,59
300	0,178	40,94	285,43
310	0,177	40,71	292,23
320	0,177	40,71	299,02
330	0,177	40,71	305,8
340	0,176	40,48	312,57
350	0,176	40,48	319,32
360	0,175	40,25	326,04
370	0,175	40,25	332,75

*συνέχεια Πίνακας 4-1*

380	0,174	40,02	339,44
390	0,174	40,02	346,11
400	0,173	39,79	352,76
410	0,173	39,79	359,39
420	0,172	39,56	366,01
430	0,172	39,56	372,6
440	0,172	39,56	379,19
450	0,171	39,33	385,77
460	0,171	39,33	392,32
470	0,171	39,33	398,88
480	0,171	39,33	405,43
490	0,171	39,33	411,99
500	0,170	39,1	418,52
510	0,170	39,1	425,04
520	0,170	39,1	431,56
530	0,169	38,87	438,05
540	0,169	38,87	444,53
550	0,169	38,87	451,01
560	0,169	38,87	457,49
570	0,169	38,87	463,97

*Πίνακας 4-2: Καταναλισκόμενη ενέργεια για το δοκίμιο Νο.2.*

t (sec)	I (A) χωρίς πάγο	P <sub>in</sub> (W)	E (Wh)
0	0,431	99,13	0
10	0,370	85,1	15,35
20	0,340	78,2	28,96
30	0,314	72,22	41,5
40	0,293	67,39	53,13
50	0,275	63,25	64,02
60	0,258	59,34	74,23
70	0,244	56,12	83,85
80	0,231	53,13	92,96
90	0,221	50,83	101,62
100	0,212	48,76	109,92
110	0,205	47,15	117,91
120	0,198	45,54	125,64
130	0,191	43,93	133,09
140	0,188	43,24	140,36
150	0,182	41,86	147,45
160	0,178	40,94	154,35
170	0,176	40,48	161,13
180	0,173	39,79	167,82
190	0,171	39,33	174,42
200	0,168	38,64	180,91
210	0,167	38,41	187,34
220	0,166	38,18	193,72
230	0,163	37,49	200,02
240	0,163	37,49	206,27
250	0,162	37,26	212,5
260	0,160	36,8	218,67
270	0,160	36,8	224,81

*συνέχεια Πίνακας 4-2*

280	0,158	36,34	230,9
290	0,157	36,11	236,94
300	0,157	36,11	242,96
310	0,156	35,88	248,96
320	0,155	35,65	254,92
330	0,155	35,65	260,86
340	0,154	35,42	266,78
350	0,153	35,19	272,67
360	0,153	35,19	278,53
370	0,152	34,96	284,38
380	0,151	34,73	290,18
390	0,151	34,73	295,97
400	0,151	34,73	301,76
410	0,150	34,5	307,53
420	0,150	34,5	313,28
430	0,149	34,27	319,01
440	0,149	34,27	324,72
450	0,149	34,27	330,43
460	0,149	34,27	336,15
470	0,149	34,27	341,86
480	0,148	34,04	347,55
490	0,148	34,04	353,22
500	0,148	34,04	358,9
510	0,148	34,04	364,57
520	0,148	34,04	370,24
530	0,148	34,04	375,92
540	0,147	33,81	381,57
550	0,147	33,81	387,21
560	0,147	33,81	392,84
570	0,147	33,81	398,48
580	0,147	33,81	404,11
590	0,147	33,81	409,75
600	0,147	33,81	415,38

*Πίνακας 4-3: Καταναλισκόμενη ενέργεια για το δοκίμιο Νο.3.*

t (sec)	I (A) χωρίς πάγο	P <sub>in</sub> (W)	E (Wh)
0	0,058	13,34	0
10	0,056	12,88	2,19
20	0,055	12,65	4,31
30	0,054	12,42	6,40
40	0,054	12,42	8,47
50	0,054	12,42	10,54
60	0,053	12,19	12,59
70	0,053	12,19	14,62
80	0,053	12,19	16,66
90	0,053	12,19	18,69
100	0,052	11,96	20,70
110	0,052	11,96	22,69
120	0,052	11,96	24,69
130	0,052	11,96	26,68

συνέχεια Πίνακας 4-3

140	0,051	11,73	28,65
150	0,051	11,73	30,61
160	0,051	11,73	32,56
170	0,051	11,73	34,52
180	0,051	11,73	36,47
190	0,051	11,73	38,43
200	0,050	11,50	40,37
210	0,050	11,50	42,28
220	0,050	11,50	44,20
230	0,050	11,50	46,12
240	0,050	11,50	48,03
250	0,050	11,50	49,95
260	0,050	11,50	51,87
270	0,049	11,27	53,76
280	0,049	11,27	55,64
290	0,049	11,27	57,52
300	0,049	11,27	59,40

**Πίνακας 4-4:** Καταναλισκόμενη ενέργεια για το δοκίμιο Νο.4.

t (sec)	I (A) χωρίς πάγο	P <sub>in</sub> (W)	E (Wh)
0	0,285	65,55	0
10	0,235	54,05	9,97
20	0,194	44,62	18,19
30	0,170	39,10	25,17
40	0,153	35,19	31,36
50	0,143	32,89	37,03
60	0,134	30,82	42,34
70	0,126	28,98	47,32
80	0,119	27,37	52,02
90	0,113	25,99	56,47
100	0,108	24,84	60,70
110	0,104	23,92	64,76
120	0,100	23,00	68,67
130	0,097	22,31	72,45
140	0,093	21,39	76,09
150	0,091	20,93	79,62
160	0,089	20,47	83,07
170	0,087	20,01	86,44
180	0,085	19,55	89,74
190	0,084	19,32	92,98
200	0,082	18,86	96,16
210	0,081	18,63	99,28
220	0,080	18,40	102,37
230	0,079	18,17	105,42
240	0,078	17,94	108,43
250	0,077	17,71	111,40
260	0,077	17,71	114,35
270	0,076	17,48	117,28
280	0,076	17,48	120,19
290	0,075	17,25	123,09

*συνέχεια Πίνακας 4-4*

300	0,074	17,02	125,94
310	0,074	17,02	128,78
320	0,073	16,79	131,60
330	0,073	16,79	134,40
340	0,073	16,79	137,20
350	0,072	16,56	139,97
360	0,072	16,56	142,73
370	0,072	16,56	145,49
380	0,072	16,56	148,25
390	0,071	16,33	151,00
400	0,071	16,33	153,72
410	0,071	16,33	156,44
420	0,071	16,33	159,16
430	0,071	16,33	161,88
440	0,070	16,10	164,58
450	0,070	16,10	167,27
460	0,070	16,10	169,95
470	0,070	16,10	172,63
480	0,070	16,10	175,32
490	0,069	15,87	177,98
500	0,069	15,87	180,63
510	0,069	15,87	183,27
520	0,069	15,87	185,92
530	0,069	15,87	188,56
540	0,069	15,87	191,21

*Πίνακας 4-5: Καταναλισκόμενη ενέργεια για το δοκίμιο Νο.5.*

t (sec)	I (A) χωρίς πάγο	P <sub>in</sub> (W)	E (Wh)
0	0,066	15,18	0
10	0,063	14,49	2,47
20	0,062	14,26	4,87
30	0,061	14,03	7,23
40	0,060	13,8	9,55
50	0,059	13,57	11,83
60	0,058	13,34	14,07
70	0,057	13,11	16,27
80	0,056	12,88	18,44
90	0,054	12,42	20,55
100	0,053	12,19	22,60
110	0,052	11,96	24,61
120	0,051	11,73	26,58
130	0,050	11,5	28,52
140	0,049	11,27	30,42
150	0,048	11,04	32,28
160	0,048	11,04	34,12
170	0,047	10,81	35,94
180	0,046	10,58	37,72
190	0,046	10,58	39,48
200	0,045	10,35	41,23
210	0,045	10,35	42,95

συνέχεια Πίνακας 4-5			
220	0,044	10,12	44,66
230	0,044	10,12	46,35
240	0,043	9,89	48,01
250	0,043	9,89	49,66
260	0,042	9,66	51,29
270	0,042	9,66	52,90
280	0,041	9,43	54,49
290	0,041	9,43	56,06
300	0,041	9,43	57,63
310	0,040	9,2	59,19
320	0,040	9,2	60,72
330	0,040	9,2	62,25
340	0,039	8,97	63,77
350	0,039	8,97	65,26
360	0,039	8,97	66,76
370	0,039	8,97	68,25
380	0,038	8,74	69,73
390	0,038	8,74	71,19
400	0,038	8,74	72,64
410	0,038	8,74	74,10
420	0,038	8,74	75,56
430	0,037	8,51	76,99
440	0,037	8,51	78,41
450	0,037	8,51	79,83
460	0,037	8,51	81,25
470	0,037	8,51	82,67
480	0,037	8,51	84,08
490	0,037	8,51	85,50
500	0,036	8,28	86,90
510	0,036	8,28	88,28
520	0,036	8,28	89,66
530	0,036	8,28	91,04

Οι γραφικές παραστάσεις των ενεργειών που καταναλώνουν τα θερμικά καλώδια για χρονικό διάστημα πέντε λεπτών (300sec) φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



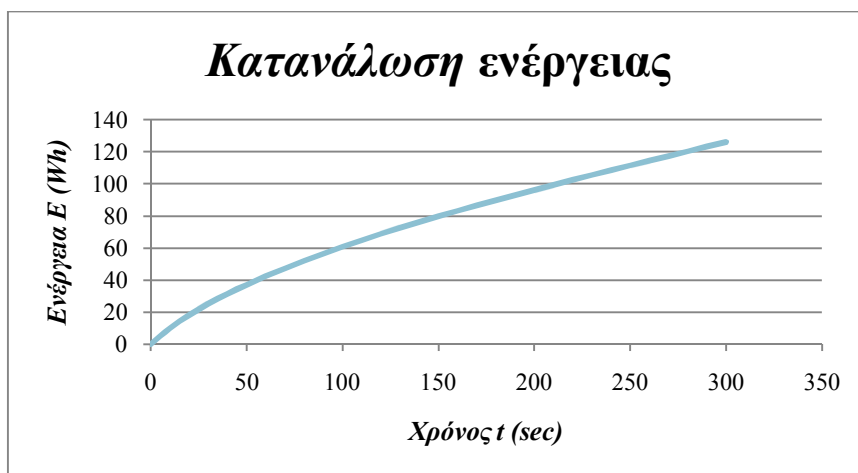
Σχήμα 4-31: Καταναλισκόμενη ενέργεια για το δοκίμιο Νο.1 (Χωρίς πάγο).



Σχήμα 4-32: Καταναλισκόμενη ενέργεια για το δοκίμιο No.2 (Χωρίς πάγο).



Σχήμα 4-33: Καταναλισκόμενη ενέργεια για το δοκίμιο No.3 (Χωρίς πάγο).



Σχήμα 4-34: Καταναλισκόμενη ενέργεια για το δοκίμιο No.4 (Χωρίς πάγο).





*Σχήμα 4-35: Καταναλισκόμενη ενέργεια για το δοκίμιο No.5 (Χωρίς πάγο).*

Στα διαγράμματα 4-31 έως 4-35 επιλέχθηκε ένα κοινό χρονικό διάστημα (300sec) για την απεικόνιση της καταναλισκόμενης ενέργειας, ως ένα κοινό μέτρο σύγκρισης των ενεργειών που καταναλώνει καθένα από τα πέντε δοκίμια. Από τα πέντε αυτά διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι το δοκίμιο No.1, το οποίο είναι το θερμικό καλώδιο με την μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής θερμικής ισχύος, είναι αυτό που καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια (~285 Wh) σε σχέση με τα άλλα τέσσερα δοκίμια. Ακολουθούν κατά φθίνουσα σειρά θερμικής ικανότητας τα δοκίμια No. 2 με ~250 Wh, No.4 με ~120 Wh, No. 3 και No.5 με ~ 60 Wh. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού το θερμικό καλώδιο με την μεγαλύτερη θερμική ισχύ απορροφά περισσότερο ρεύμα για να αποδώσει περισσότερη θερμότητα και κατ' επέκταση καταναλώνει και περισσότερη ενέργεια.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] "Explosionproof Industrial Electric Heating Systems Guide", Tsuba Explosionproofing Company, Switzerland, Edition August 2001.
- [2] "Projektierungsrichtlinien für Beheizungen mit Wärmekabeln Guide", Tsuba Explosionproofing Company, Switzerland, Edition August 2001.
- [3] "Installation of Heating Cables Guide", Tsuba Explosionproofing Company, Switzerland, Edition August 2010.
- [4] "Electrical Trace Heating Industry Council Guidelines", <http://www.ethic-global.com/>.
- [5] Roy E. Barth, Charles M. Bonorden, Paul A. House, and Ben C. Johnson, "Heat Tracing Technology for the 21st Century", Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2000.
- [6] N.R. Rafferty, Peter Baen, D.O. Brown, William Hanthorn, "Considerations for Application of Mineral Insulated Electrical Resistance Heating Cable", Copyright Material IEEE Paper No. PCIC-2005-12.
- [7] "Heat Tracing Applications & Selection Guidelines", Chromalox Company Manual, 2009.
- [8] Jim Thompson, Ed Shuler, Paul Van Hoorickx, "Advances in Electrical Heat Tracing Engineering Reduce Installed Cost & Improve Reliability", Copyright Material IEEE Paper No. PCIC-98-08.
- [9] "Technical Databook for Industrial Heat Tracing Systems", Tyco Thermal Controls Company, 2009.
- [10] A. Heiligenstein & H. Neubert, "Electric Tank Heating - A General Discussion", Wiegand Industrial Division, Copyright 1998.
- [11] Gary Ashburner "Trace Heating in Hazardous Areas - A Bartec Product History", UK, 2010.
- [12] "Offshore Oil and Gas", Product Application Form, Thermon Manufacturing Co.
- [13] Chet Sandberg, Peter R. Baen, Vince Rowe, John Turner, "Panel Discussion on Electrical Heat Tracing", IEEE Power Engineering Society Meeting, Edmonton, Alberta, Canada, July 1999.
- [14] Peter R. Baen, "Insulate Heat Tracing Systems Correctly", Chemical Engineering Progress, Sept 1994.
- [15] "Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres", International Electrotechnical Commission, Geneva, 2009.
- [16] "Begleitheizung Manual", Klöpper-Therm GmbH & Co. KG, Dortmund, Germany, Dezember 2010.
- [17] "Selection Guide for Self-Regulating Heat Tracing Systems", Tyco Thermal Controls Company, Belgium, 2004.
- [18] Richard H. Hulett, "IEEE Std Toward Harmonization", IEEE Industry Applications Magazine, January 2000.

- [19] C. Sandberg, B. Rafferty, M. Kleinehanding, Juan Jose Hernandez, "Standards, Power Distribution, Monitoring & Control Of Electrical Heat Tracing".
- [20] Chet Sandberg, Henry Zylstra, "Ground Fault Circuit Breakers for Heat Tracing", IEEE PCIC Conference, Indianapolis IN, Sept 1998.
- [21] "Installation and Maintenance Manual for Self-Regulating and Power Limiting Heating Cable Systems", Tyco Thermal Controls Company, Belgium, 1992.
- [22] "Installation, Maintenance and Operation Manual for Mineral Insulated (MI) Series Heating Systems", Tyco Thermal Controls Company, Belgium, 2005.
- [23] "Installation and Maintenance Manual for Constant Wattage Parallel Circuit Heating Cable Systems", Tyco Thermal Controls Company, Belgium, 2001.
- [24] "High-Temperature Heat-Tracing Systems for Non-Hazardous and Hazardous Locations, Installation and Maintenance Guide", Tyco Thermal Controls Company, Belgium, 2005.
- [25] Erickson C. James, "Handbook of Electrical Heating for Industry", IEEE Press, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995.
- [26] "Building Precision Electric Heat & Control Systems for Process Industries", Chromalox Precision Heat & Control, Pittsburgh, USA, 2007.
- [27] Newell R.D., Wilson K., "Why is industry dramatically increasing its use of electric trace heating?", London, UK, 1996.
- [28] Νικόλαος Δ. Παναγιωτόπουλος, "Συστήματα Θέρμανσης και Μικροκλίμα Κατοικημένων Χώρων", Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ), Σχολή Πολυτεχνική, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, 2001.
- [29] Ιωάννης Κ. Νικολός, "Σημειώσεις Μαθήματος Μετάδοση Θερμότητας", Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά, 2007