



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

Μέτρηση του ονομαστικού ρεύματος σε στατικούς ηλεκτρικούς συνδέσμους για γυμνούς αγωγούς ACSR

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Λυράκης Εμμανουήλ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2013



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

Μέτρηση του ονομαστικού ρεύματος σε στατικούς ηλεκτρικούς συνδέσμους για γυμνούς αγωγούς ACSR

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Λυράκης Εμμανουήλ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τη 15η Ιουλίου 2013

.....
Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ν.Ι. Θεοδώρου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Π.Δ. Μπούρκας
Ομότιμος
Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2013

Copyright © Λυράκης Εμμανουήλ, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων, του Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων, της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Καραγιαννόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής Καθηγητές κ. Θεοδώρου και κ. Μπούρκα. Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης στην κ. Πολυκράτη, μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. του εργαστηρίου, για την πολύτιμη βοήθειά της σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του ονομαστικού ρεύματος μέσω της δοκιμής υπερθέρμανσης σε στατικούς ηλεκτρικούς συνδέσμους μέσης τάσης. Συγκεκριμένα έγιναν μετρήσεις σε τρεις συνδέσμους αλουμινίου, δύο συνδέσμους παραλλήλων αγωγών και έναν σύνδεσμο πλάκας αγωγού.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία θεωρητική εισαγωγή στην οποία περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών επαφών και πιο συγκεκριμένα των στατικών ηλεκτρικών επαφών. Αναλυτικότερα περιγράφονται η αντίσταση στένωσης ως όρος, η δύναμη σύσφιξης, οι επικαθίσεις στην επιφάνεια των ηλεκτρικών επαφών και γενικότερα οι παράγοντες που επιδρούν στις ηλεκτρικές επαφές. Τέλος γίνεται αναφορά στις διατάξεις μέτρησης και αξιολόγησης των στατικών ηλεκτρικών επαφών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται ο σκοπός της εργασίας και η σημασία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την πειραματική διαδικασία.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία και αναλύεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε με τα μέρη τα οποία την αποτελούν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τη μορφή διαγραμμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τον σχολιασμό και τα συμπεράσματα που προκύπτουν απ' αυτά.

Τέλος, στο παράρτημα δίνονται οι αναλυτικοί πίνακες των μετρήσεων όπως αυτοί προκύπτουν από την πειραματική διαδικασία.

Λέξεις κλειδιά: ονομαστικό ρεύμα, ηλεκτρικοί σύνδεσμοι, ηλεκτρικές επαφές, δοκιμή υπερθέρμανσης, αντίσταση επαφής, αντίσταση στένωσης

ABSTRACT

The objective of this diploma thesis is to study and report the thermal behavior and response of wedge-connectors during an overheating test, so that the nominal current of these connectors can be found. Three aluminum connectors have been tested, two of which connect parallel conductors, while the third can connect a conductor to a plate.

The first chapter is a theoretical introduction, where the electrical contacts and all their main characteristics are analyzed. An in depth analysis of the electrical contacts, the constriction resistance, the surficial oxides and of all the contaminants and factors which affect electrical contacts, is also included. Finally, methods to measure and evaluate electrical contacts are mentioned.

In the second chapter, the purpose of the thesis is presented, as well as the importance of the experiment results.

In the third chapter, the experiment procedure is explained and the measurement circuit, with its components is presented.

In the fourth chapter, are given the charts with the results of the measurements. In the fifth chapter, is given a summary of the results, with the comments and the conclusions that occur.

In the end, the tables containing the results of the experiment are presented in the appendix.

Keywords: nominal current, wedge connectors, electrical contacts, overheating test, contact resistance, constriction resistance

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	11
1.1 Οι στατικές ηλεκτρικές επαφές	12
1.2 Καθορισμός όρων και εννοιών	13
1.2.1 Επιφάνεια Επαφής	13
1.2.2 Φορτίο Επαφής	13
1.2.3 Αντίσταση επαφής και Αντίσταση στένωσης	15
1.2.4 A-spots	20
1.3 Θερμοκρασία ενός ηλεκτρικά θερμαινόμενου a-spot	23
1.3.1 Σχέση Τάσης-Θερμοκρασίας	23
1.3.2 Η σχέση Τάσης-Θερμοκρασίας με εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία ειδική ηλεκτρική αντίσταση και θερμική αγωγιμότητα	24
1.3.3 Ο Νόμος Wiedemann-Franz	24
1.3.4 Η πτώση τάσης σε μία επαφή σε σχέση με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται	26
1.3.5 Χαρακτηριστική καμπύλη αντίστασης διάβασης-πτώσης τάσης και διαφοράς θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην επαφή	27
1.4 Οξειδία σε επαφές διακοπών και η σημασία της θερμοκρασίας στην αύξηση του πάχους τους	30
1.5 Η επίδραση της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα στην οξείδωση των επαφών	32
1.6 Γαλβανική διάβρωση	33
1.7 Η επίδραση επιφανειακών στρωμάτων στην αντίσταση της στένωσης και επαφής	34
1.8 Διάβρωση	36
1.9 Η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος	38
1.10 Φυσική διερεύνηση των φαινομένων μεταφοράς στις επαφές	41
1.11 Οι αγωγοί του δικτύου Διανομής	46
1.11.1 Αγωγοί από Χαλκό	46
1.11.2 Αγωγοί από Αλουμίνιο	46
1.11.3 Αγωγοί από Αλουμίνιο – Χάλυβα (ACSR)	47
1.12 Σύνδεσμοι ισχύος	48
1.12.1 Αποδόμηση συνδέσμων και κριτήρια επιλογής τους	48
1.12.2 Τύποι συνδέσμων ισχύος	49
1.13 Οι διατάξεις μέτρησης και αξιολόγησης των στατικών ηλεκτρικών επαφών	50
1.13.1 Η δοκιμή υπερθέρμανσης	50
1.13.1.1 Ονομαστικό ρεύμα αγωγών μέσης τάσης	51

1.13.2 Διηλεκτρικές δοκιμές διακοπών	51
1.13.3 Δοκιμή μηχανικής αντοχής	52
1.13.4 Δοκιμή υπό τριπολικό βραχυκύκλωμα	52
2. Σκοπός της εργασίας	53
3. Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.....	55
3.1 Πειραματική διάταξη.....	55
3.1.1 Ο αυτομετασχηματιστής	56
3.1.2 Ο μετασχηματιστής έντασης	57
3.1.3 Οι αγωγοί	58
3.1.4 Αμπερόμετρο – Μετρητής Ρεύματος	59
3.1.5 Μετρητής τάσης - Βολτόμετρο	60
3.1.6 Μετρητές θερμοκρασίας	61
3.2 Οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι.....	62
3.3 Πειραματική διαδικασία	65
3.4 Βαθμονόμηση Θερμομέτρων	69
4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων	71
4.1 Μετρήσεις για σύνδεσμο RIVIMETAL GR-261A (ACSR 95 – ACSR 16-50)	72
4.2 Μετρήσεις για σύνδεσμο SL B3 (I AL35-70 - II AL 16-50)	78
4.3 Μετρήσεις για σύνδεσμο πλάκας-αγωγού	89
5. Σχόλια και Συμπεράσματα	97
5.1 Ονομαστικό ρεύμα υπό εξέταση συνδέσμων	97
5.2 Διαφορές στο ονομαστικό ρεύμα ίδιων συνδέσμων	97
5.3 Το ονομαστικό ρεύμα των συνδέσμων σε σύγκριση με τη το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας των αγωγών	98
5.4 Θερμοκρασιακή συμπεριφορά των υπό μέτρηση σημείων των συνδέσμων	99
5.4.1 Σημεία σύσφιξης αγωγών	99
5.4.2 Λοιπά σημεία μέτρησης.....	99
Βιβλιογραφία	101
Παράρτημα Α	102
Πίνακας 1 - RIVIMETAL GR-261A (ACSR 95 – ACSR 16-50)	103
Πίνακας 2 - SL B3 (I AL35-70 - II AL 16-50)	104
Πίνακας 3 - Σύνδεσμος πλάκας-αγωγού	108

1. Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι και επαφές είναι ένα βασικό τμήμα των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Σύνδεσμοι διαφόρων τύπων ευρίσκονται σε κάθε ηλεκτρική διάταξη και συσκευή και η αξιόπιστη λειτουργία τους είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία κάθε συστήματος. Στις παλαιότερες μορφές τους είχαν την ικανότητα να άγουν συνήθως ρεύματα έως μερικές εκατοντάδες Ampere. Οι σύγχρονες ηλεκτρικές επαφές έχουν τη δυνατότητα να άγουν ηλεκτρικά ρεύματα που βρίσκονται σε μία ευρύτατη περιοχή που εκτείνεται από τα μA ($10^{-6}A$) έως τα MA (10^6A).

Οι σύνδεσμοι μεταξύ των ρευματοφόρων μερών στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και κυκλώματα διακρίνονται σε μόνιμους και λυόμενους. Με τον όρο μόνιμοι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι εννοούνται αυτοί που τα δύο μέρη τους συνδέονται μεταξύ τους σε μόνιμη βάση. Τέτοιοι σύνδεσμοι είναι οι συνδέσεις των καλωδίων στους ακροδέκτες με συγκόλληση ή πίεση. Λυόμενοι σύνδεσμοι είναι αυτοί που έχουν τη δυνατότητα αποσυναρμολόγησης. Τα δύο μέρη τους συνδέονται συνήθως με κοχλίες και ελατήρια και τέτοιοι είναι οι συνδέσεις μεταξύ ζυγών, οι συνδέσεις μεταξύ των εξαρτημάτων ενός πίνακα κλπ. Λυόμενοι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι θεωρούνται επίσης οι επαφές των διακοπών γενικά καθώς και οι επαφές μεταξύ ασφαλειών και ασφαλειοθηκών.

Οι ηλεκτρικές επαφές διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις στατικές ηλεκτρικές επαφές (stationary electrical contacts) και τις ηλεκτρικές επαφές που έχουν ισχύ διακοπής (switching electrical contacts). Οι στατικές ηλεκτρικές επαφές, δηλαδή οι επαφές που δεν έχουν ισχύ διακοπής, μπορούν να χειρίζονται μόνο όταν το κύκλωμα έχει τεθεί εκτός τάσης μέσω ενός διακόπτη φορτίου ή ισχύος ανάλογα με το είδος παροχής της τάσης. Αντίθετα οι επαφές με ισχύ διακοπής χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητά τους να διακόπτουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος και σαν συνέπεια να υφίστανται και να αντέχουν το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται και την παραγόμενη ισχύ διακοπής.

1.1 Οι στατικές ηλεκτρικές επαφές

Οι επαφές αυτού του τύπου, αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως “stationary contacts”. Οι αποζεύκτες, γειωτές, ασφαλειοαποζεύκτες και ασφαλειοθήκες θεωρούνται στατικές ηλεκτρικές επαφές. Ως στατικές επαφές θεωρούνται επίσης και οι επαφές των αυτόματων διακοπών, των διακοπών φορτίου καθώς και γενικά όλων των διακοπών που έχουν ισχύ διακοπής όταν όμως αυτές βρίσκονται στη στατική τους κατάσταση.

Η κατασκευή των επαφών αυτών στην πράξη βασίζεται συνήθως στην κατασκευή ενός δοκιμίου, μέσω του οποίου επιδιώκεται η μείωση της αντίστασης διάβασης έτσι ώστε κατά τη λειτουργία των επαφών αυτών υπό ονομαστικό ρεύμα να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των δοκιμών υπερθέρμανσης, μηχανικής αντοχής και αντοχής στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Η τιμή της αντίστασης διάβασης επηρεάζεται κυρίως από το είδος των υλικών, τη δύναμη σύσφιξης των επαφών και γενικά από τη γεωμετρία του λυομένου συνδέσμου, από την οποία εξαρτάται η απαγωγή της θερμότητας Joule. Πολύ μεγάλη σημασία για τη διαμόρφωση της τιμής της αντίστασης διάβασης έχουν οι ξένες επικαθίσεις σε αυτές, οι οποίες μπορεί να είναι χημικές ενώσεις όπως οξείδια, οργανικές ουσίες, σκόνη κ.λ.π.

1.2 Καθορισμός όρων και εννοιών

Ως ηλεκτρική επαφή ορίζεται μία λυόμενη σύνδεση δύο αγωγών η οποία έχει τη δυνατότητα να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Η λυόμενη σύνδεση αποτελείται από δύο μέρη, την κινητή και τη σταθερή επαφή. Ως ανοικτή επαφή θεωρείται όχι μόνο αυτή, που έχει τεθεί, λόγω χειρισμού, στη θέση εκτός, αλλά και εκείνη στην οποία τα δύο μέρη έχουν μονωθεί ηλεκτρικά λόγω ξένων επικαθίσεων. Η δύναμη η οποία συγκρατεί τα δύο μέρη της επαφής μεταξύ τους καλείται δύναμη σύσφιξης των επαφών.

1.2.1 Επιφάνεια επαφής

Τα μέταλλα από τα οποία κατασκευάζονται συνήθως οι επαφές έχουν, για λόγους διευκόλυνσης της διάβασης του ρεύματος, μεγάλη ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Για το λόγο αυτό η σκληρότητα των μετάλλων αυτών δεν είναι μεγάλη, και υπό την επίδραση των δυνάμεων σύσφιξης παραμορφώνονται ελαστικά και πλαστικά στις περιοχές που εφάπτονται υπό την επίδραση της δύναμης σύσφιξης. Αποτέλεσμα των παραμορφώσεων αυτών είναι η δημιουργία ορισμένων περιοχών πάνω στο λυόμενο σύνδεσμο, οι οποίες φέρουν το φορτίο σύσφιξης της επαφής, χωρίς αυτό να σημαίνει αναγκαστικά ότι μέσω αυτών των περιοχών γίνεται διέλευση του ρεύματος. Το σύνολο των περιοχών αυτών δίνει τη **επιφάνεια σύσφιξης** A_b . Η κατανομή των παραπάνω περιοχών είναι στατιστική και εξαρτάται κυρίως από το είδος των υλικών και την τραχύτητα των επιφανειών.

Ως **πραγματική επιφάνεια επαφής** A_c εννοούμε την επιφάνεια μέσω της οποίας γίνεται τελικά η διέλευση του ρεύματος από το ένα μέρος της επαφής στο άλλο. Η επιφάνεια αυτή είναι, λόγω των ξένων επικαθίσεων στις επαφές (κυρίως οξείδια, μετάλλων και σκόνη), μικρότερη από την A_b . Όταν παρατηρεί κανείς μία ηλεκτρική επαφή νομίζει ότι τα δύο μέρη της εφάπτονται σε μία πολύ ευρύτερη επιφάνεια από το σύνολο των περιοχών επαφής A_b που προαναφέρθηκαν. Αυτή η μακροσκοπικά παρατηρούμενη επιφάνεια ονομάζεται **φαινόμενη επιφάνεια επαφής** A_a και είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από το σύνολο των επί μέρους επιφανειών πραγματικής επαφής A_c , οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα.

Γενικά ισχύει:

$$A_a > A_b > A_c \quad (1.2.1 - 1)$$

1.2.2 Φορτίο επαφής

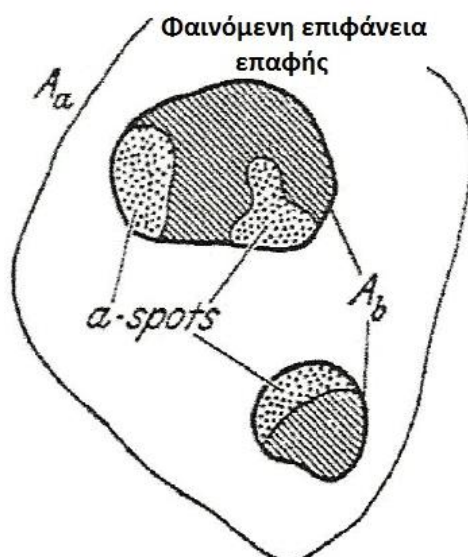
Η δύναμη η οποία κρατάει τα μέρη της επαφής συνδεδεμένα είναι το μηχανικό φορτίο ή απλά το φορτίο, P . Αν θεωρητικώς τα μέρη της επαφής ήταν απεριόριστως σκληρά, τότε καμία δύναμη δε θα μπορούσε να τα φέρει σε επαφή μεταξύ τους σε περισσότερα από τρία σημεία. Εφόσον, όμως, τα πραγματικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις επαφές μπορούν να παραμορφωθούν, τα σημεία μεγεθύνονται σε μικρές περιοχές, ενώ ταυτόχρονα νέα σημεία επαφής μπορεί να

εμφανιστούν. Το σύνολο των περιοχών ή των σημείων αυτών είναι η περιοχή που φέρει το φορτίο, A_b , πάνω στην οποία η πίεση, p , είναι πεπερασμένη. Η περιοχή A_b μπορεί να σχηματιστεί μόνο με ελαστική παραμόρφωση. Όμως λόγω της ανομοιογένειας, τα μέρη της επαφής, παρόλο που ονομαστικά-ιδανικά είναι επίπεδα, στην πραγματικότητα έρχονται σε επαφή σε περιοχές που παράγονται πλαστικά.

Η σχέση μεταξύ της φέρουσας το φορτίο επιφάνειας A_b , του φορτίου της επαφής και της μέσης πίεσης, \bar{p} , είναι:

$$P = \bar{p} A_b \quad (1.2.2 - 1)$$

Η κατά τόπους πίεση, p , διαφέρει από σημείο σε σημείο καθώς κάποια σημεία δέχονται πλαστική παραμόρφωση ενώ άλλα δέχονται ελαστική. Σε πολλές περιπτώσεις, ωστόσο, ολόκληρη η περιοχή A_b συμπεριφέρεται πλαστικά. Τότε, η μέση πίεση προσεγγίζει τη σκληρότητα H .



Σχήμα 1.2.2-1: Φαινόμενη επιφάνεια επαφής A_a , φέρουσα το φορτίο επιφάνεια A_b , που περιέχουν μονωτικά σημεία (σκιασμένο μέρος) και άγοντα σημεία ή α -spots (τελείες)

Από την οπτική της αγωγιμότητας ρεύματος, η φέρουσα το φορτίο περιοχή αποτελείται από τρία διαφορετικά μέρη:

1. Τμήματα με *μεταλλική επαφή*. Το ρεύμα περνά μέσα από αυτά χωρίς αισθητή μεταβολή αντίστασης στη διασύνδεση, όπως συμβαίνει μεταξύ διαφορετικών κρυσταλλιτών σε ένα συμπαγές μέταλλο.
2. *Ημι-μεταλλικά σημεία*. Αυτά είναι περιοχές καλυμμένες με κάποιο στρώμα επαρκώς λεπτό έτσι ώστε να είναι εύκολα διαπερατό από το ρεύμα μέσω του φαινομένου σήραγγος, ανεξαρτήτως της ειδικής αντίστασης του υλικού του στρώματος.
3. Περιοχές καλυμμένες από σχετικά *παχιά στρώματα*, ειδικά όσον αφορά ορατά θαμπά στρώματα (οξειδία, σουλφίδια κλπ). Κατά κανόνα οι περιοχές αυτές δεν άγουν και είναι πρακτικά μονωμένες.

Η ονομασία **a-spot** για τις άγουσες περιοχές της επαφής, που αναφέρεται στην ακτίνα a μίας κυκλικής επιφάνειας επαφής, είναι ένας γενικά αποδεκτός όρος.

Το σχήμα 1.2.2-1 απεικονίζει διαφορετικά είδη επιφανειών επαφής. Οι αναλογίες μεταξύ αυτών των επιφανειών διαφοροποιούνται, και μπορεί να προκύψει ότι $A_a = A_b = A_c$. Για παράδειγμα, αν δύο κύλινδροι από καθαρό μέταλλο, των οποίων η διάμετρος είναι μερικά mm, έρθουν κάθετα σε επαφή υπό ένα επαρκές φορτίο, $50N$, η πλαστική παραμόρφωση θα οδηγήσει σε μία φέρουσα το φορτίο περιοχή A_b που είναι συγχρόνως και η περιοχή που άγει.

Η σχέση μπορεί να γραφεί και ως:

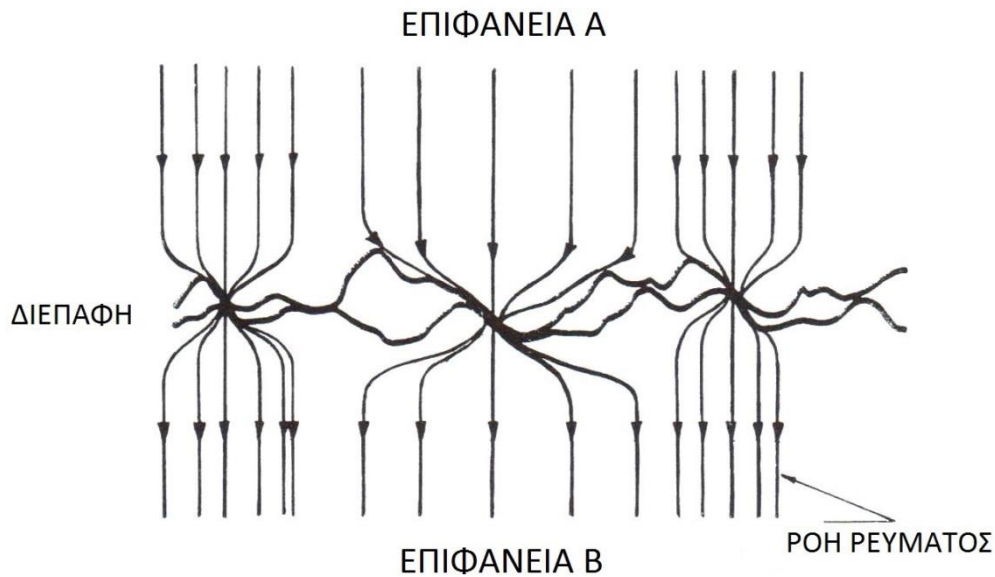
$$P = \xi \cdot H \cdot A_b$$

όπου συνήθως $0,2 < \xi < 1$ και το H είναι η «σκληρότητα της επαφής».

1.2.3 Αντίσταση επαφής και αντίσταση στένωσης

Η έκφραση «αντίσταση επαφής» χρησιμοποιείται συχνά. Αυτός ο όρος επινοήθηκε σε μία εποχή όταν υπήρχε η πεποίθηση ότι η μεταλλική επιφάνεια της επαφής, ευθυνόταν για την παρατηρούμενη αντίσταση. Στην πραγματικότητα, αυτό που μετράται ως αντίσταση επαφής R , είναι η αντίσταση στένωσης R_c , κάτι το οποίο είναι συνέπεια του περιορισμού της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από μικρά αγωγιμα σημεία. Φυσικά, η στένωση διευρύνεται ως όρος και στα δύο μέρη της επαφής.

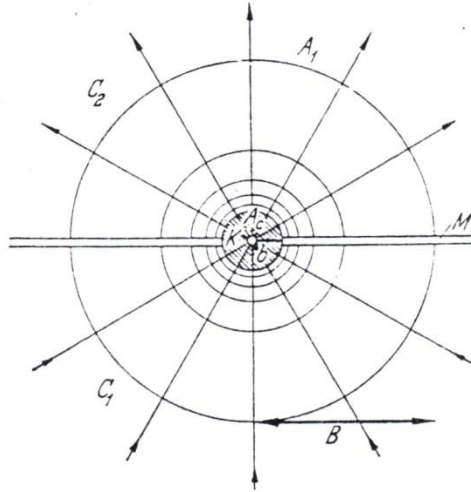
Όλες οι στερεές επιφάνειες είναι τραχιές σε μικροσκοπική κλίμακα. Η επιφανειακή αυτή μικρο-τραχύτητα αποτελείται από κορυφές και κοιλάδες των οποίων το σχήμα, οι διακυμάνσεις σε ύψος και τα λοιπά γεωμετρικά χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τη διαδικασία διαμόρφωσης της επιφάνειας. Γι' αυτό και η επαφή μεταξύ δύο μηχανικών μερών συμβαίνει σε διακριτά σημεία τα οποία παράγονται από τη μηχανική επαφή των εξογκωμάτων των δύο επιφανειών, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2.3-1. Επομένως, για όλα τα στερεά υλικά, η περιοχή της πραγματική επαφής είναι ένα μικρό μόνο κλάσμα της ονομαστικής περιοχής επαφής, για ένα ευρύ φάσμα φορτίων. Η μέθοδος παραμόρφωσης των εξογκωμάτων της επαφής είναι είτε ελαστική είτε πλαστική ή μίγμα πλαστικής-ελαστικής ανάλογα με τις τοπικές μηχανικές δυνάμεις που ασκούνται. Σε μία μαζική ηλεκτρική διασύνδεση όπου τα στοιχεία σύζευξης είναι μέταλλα, οι επιφάνειες επαφής καλύπτονται συχνά από κάποιο οξειδίο ή από άλλα μονωτικά στρώματα. Γενικότερα, η διασύνδεση γίνεται ηλεκτρικά αγωγίμη μόνο όταν παράγονται μέταλλο-προς-μέταλλο σημεία επαφής, όπου τα μονωτικά στρώματα στις επιφανειακές ανωμαλίες έχουν υποστεί ρήξη. Σε μία τυπική μαζική ηλεκτρική ζεύξη, η περιοχή αυτή της ηλεκτρικής επαφής είναι, επομένως, μικρότερη από την επαφή πραγματικής μηχανικής επαφής.



Σχήμα 1.2.3-1: Σχηματικό διάγραμμα μίας ηλεκτρικής διεπαφής

Σε μία ηλεκτρική ζεύξη, οι γραμμές του ηλεκτρικού ρεύματος στρεβλώνονται αυξανόμενα όσο πλησιάζουν στη διασύνδεση της επαφής και οι γραμμές ροής συσσωρεύονται για να περάσουν μέσα από τα διακριτά σημεία επαφής ή *a-spots* όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2.3-1. Η στένωση του ηλεκτρικού ρεύματος στα *a-spots* μειώνει την επιφάνεια και την ποσότητα του υλικού που πραγματικά άγει και ως λογικό επακόλουθο αυξάνει την ηλεκτρική αντίσταση. Αυτή η αύξηση της αντίστασης ορίζεται ως **αντίσταση στένωσης** της διασύνδεσης. Συχνά, η παρουσία στρωμάτων ρύπων σχετικά μεγάλης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης στις επιφάνειες επαφής αυξάνει την αντίσταση των *a-spots* πέραν της τιμής της αντίστασης στένωσης. Η συνολική αντίσταση διασύνδεσης που προκαλείται από τη στένωση και από την αντίσταση των στρωμάτων καθορίζει την αντίσταση επαφής της σύνδεσης.

Το κυριότερο μέρος της αντίστασης στένωσης εντοπίζεται στις άμεσα γειτονικές περιοχές των μικρών αγώγιμων σημείων. Τα σημεία μέτρησης της τάσης της επαφής θα είναι, επομένως, πάντα σε μακροσκοπικές αποστάσεις από την επιφάνεια της επαφής. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτή η απόσταση καλύπτει τη συνολική εμβέλεια στην οποία οι γραμμές της ροής ρεύματος παρεκκλίνουν του ιδανικού ευθέος «μονοπατιού» εξαιτίας της στένωσης. Γι' αυτό το λόγο, η μέτρηση της αντίστασης δεν καταδεικνύει άμεσα αν η μετρούμενη αντίσταση είναι απαραίτητως τοποθετημένη εντός της επιφάνειας επαφής, ή αν, λίγο πολύ, έχει το χαρακτήρα μίας αντίστασης στένωσης. Πρέπει να δειχθεί ότι η αντίσταση στένωσης μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει της αγώγιμης περιοχής της επαφής, και όταν η μετρούμενη αντίσταση είναι μεγαλύτερη από την υπολογιζόμενη, για μία γνωστή περιοχή, συμπεραίνεται ότι η περιοχή αυτή είναι καλυμμένη με ένα στρώμα που παράγει μία επιπρόσθετη αντίσταση. Συμβατικά η έκφραση «αντίσταση επαφής» διατηρείται ανεξάρτητα από το αν υπάρχει απλά μία καθαρή αντίσταση στένωσης, ή αν ένα επιπλέον στρώμα συμβάλλει επίσης στην αντίσταση της αγώγιμης περιοχής.



Σχήμα 1.2.3-2: Μοντέλο που απεικονίζει μία στένωση ρεύματος με σφαιρική συμμετρία. Η αντίσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ισοδυναμικών επιφανειών είναι το 1/6 της αντίστασης στένωσης σε ένα μέρος της επαφής

Απεικονίζεται η αντίσταση στένωσης με έναν υπολογισμό υπό απλοποιημένες συνθήκες: Θεωρείται μία κυκλική επιφάνεια επαφής, με ίδιο υλικό στα δύο μέρη της και τέλεια συμμετρία, δηλαδή χωρίς διαταραχές από θερμοηλεκτρικές επιδράσεις. Τα μέρη της επαφής θεωρούνται ημι-άπειρα. Ακόμα και με αυτές τις υποθέσεις, ο ακριβής υπολογισμός είναι περιστασιακός. Παρά ταύτα, χρησιμοποιώντας το φανταστικό μοντέλο που εικονίζεται στο σχήμα 1.2.3-2, το πραγματικό σχήμα των γραμμών της ροής προσεγγίζεται με ένα πολύ απλούστερο υπολογισμό.

Στο μοντέλο η επιφάνεια της επαφής έχει αντικατασταθεί από μία σφαίρα, K, άπειρης αγωγιμότητας, της οποίας η ακτίνα, b, επιλέγεται ελαφρώς μικρότερη της ακτίνας, a, της κυκλικής περιοχής. Οι γραμμές της ροής του ρεύματος αρχίζουν ακτινικά και κατανέμονται συμμετρικά γύρω από τη σφαίρα K, έτσι ώστε να σχηματίσουν τις ισοδυναμικές επιφάνειες σαν ημισφαίρια ομόκεντρα της K.

Η αντίσταση dR μεταξύ των ημισφαιρίων με ακτίνες r και r+dr είναι:

$$dR = \frac{\rho dr}{2\pi r^2} \quad (1.2.3 - 1)$$

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση του υλικού της επαφής. Στη συνέχεια γίνεται ολοκλήρωση στο ημισφαίριο το οποίο διέρχεται από το σημείο όπου το δυναμικό αξιοποιείται για τη μέτρηση της τάσης της επαφής. Η ακτίνα, B, του ημισφαιρίου αυτού θα είναι μεγαλύτερη από την b. Τα πιο απομακρυσμένα μέρη συνεισφέρουν ελάχιστα στο ολοκλήρωμα. Μπορεί, λοιπόν, κάλλιστα να επιλεγθεί το άπειρο σαν το άνω όριο και να ληφθεί η αντίσταση στένωσης σε ένα από τα μέρη της επαφής.

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \int_b^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{\rho}{2\pi b} \quad (1.2.3 - 2)$$

Η συνολική αντίσταση στένωσης **R** είναι διπλάσια σε μέγεθος, γι' αυτό:

$$R = \frac{\rho}{\pi b} \quad (1.2.3 - 3)$$

Η εξίσωση (1.2.3-3) βασίζεται στο τεχνητό μοντέλο (Σχήμα 1.2.3-2) και γι' αυτό το λόγο είναι απλά προσεγγιστική. Η σωστή τιμή της αντιστάσεως μίας επίπεδης επαφής με ακτίνα α είναι:

$$R = \frac{\rho}{2\alpha} \quad (1.2.3 - 4)$$

Γίνεται αντιληπτό ότι οι σχέσεις (1.2.3-3) και (1.2.3-4) ορίζουν το ίδιο αποτέλεσμα αν:

$$2\alpha = \pi b \quad (1.2.3 - 5)$$

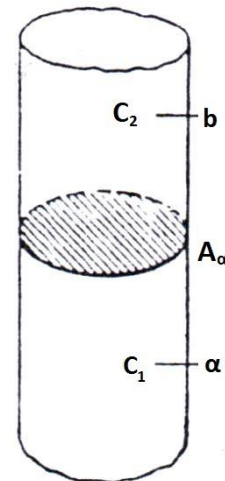
Στο σχήμα 1.2.3-3, οι κύλινδροι C_1 και C_2 είναι τα μέρη της επαφής. Τοποθετούνται ο ένας πάνω στον άλλο, η βάση $A_{\alpha 1}$ απέναντι στην $A_{\alpha 2}$, σχηματίζοντας έτσι τη φαινόμενη επιφάνεια επαφής A_α . Αρχικά, υποτίθεται ότι οι επιφάνειες $A_{\alpha 1}$ και $A_{\alpha 2}$ είναι καθαρά μεταλλικές αλλά, λόγω της ανομοιογένειας τους, έχουν επαφή μόνο σε ένα μικρό μέρος της A_α που ονομάζεται A_c . Εξαιτίας της ροής του ρεύματος η οποία περνάει μέσα από τη στένωση A_c , εμφανίζεται μία αντίσταση στένωσης.

Η τάση U_{ab} μπορεί να μετρηθεί ανάμεσα στα σημεία a και b όταν ένα ρεύμα I περνά μέσα από την επαφή. Επομένως η αντίσταση μεταξύ των ισοδυναμικών επιφανειών που περιέχουν τα a και b αντίστοιχα είναι:

$$R_{ab} = \frac{U_{ab}}{I}$$

Ας θεωρηθεί ένας στερεός κύλινδρος παρόμοιος με αυτόν του μοντέλου εκτός του ότι η συνολική περιοχή A_α είναι τέλεια αγωγική έτσι ώστε οι γραμμές του ρεύματος να ρέουν ευθεία μέσω αυτής. Σε αυτή την περίπτωση αν η αντίσταση μεταξύ των ισοδυναμικών επιφανειών που περιέχουν τα σημεία a και b , είναι ίδια όπως στο παραπάνω μοντέλο R_{ab}^0 , τότε εξ ορισμού, η αντίσταση στένωσης και η τάση στένωσης είναι:

$$\begin{aligned} R &= R_{ab} - R_{ab}^0 \\ U &= R I \end{aligned} \quad (1.2.3 - 6)$$



Σχήμα 1.2.3-3: Η φαινόμενη επιφάνεια επαφής A_α είναι η κοινή βάση των κυλίνδρων οι οποίοι έχουν πραγματική επαφή μόνο σ' ένα τμήμα της A_α

Στην περίπτωση μίας καθαρής μεταλλικής επαφής, δηλαδή χωρίς στρώματα επικαθίσεων στην επαφή, η αντίσταση επαφής R , είναι απλά μία αντίσταση στένωσης. Αν έχουμε παρουσία επιπρόσθετων στρωμάτων και τα δύο μέρη έχουν διαφορετικά μέταλλα, η αντίσταση επαφής R , είναι το άθροισμα των αντιστάσεων στένωσης R_1 και R_2 των δύο μελών αντίστοιχα και της αντίστασης του στρώματος R_f .

$$R = R_1 + R_2 + R_f \quad (1.2.3 - 7)$$

Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό, η αντίσταση επαφής δεν είναι μία αντίσταση μετάβασης, αλλά μία επιπλέον αντίσταση στο κύριο μέρος των μελών της επαφής, που προκαλείται από τη στενότητα των γραμμών του ρεύματος που περνάνε μέσα από τα a-spots. Σ' αυτήν την αντίσταση προστίθεται και η αντίσταση του στρώματος που καλύπτει τα a-spots αυτά. Τα R_1 και R_2 είναι τάξης μεγέθους $\frac{\rho_1}{na}$ και $\frac{\rho_2}{na}$, όπου a είναι μία μέση γραμμική διάσταση των a-spots, n είναι ο αριθμός τους και ρ_1, ρ_2 οι ειδικές αντιστάσεις των μελών C_1 και C_2 .

Η αντίστοιχη έκφραση για την R_f είναι:

$$R_f = \frac{\sigma}{A_c} \quad (1.2.3 - 8)$$

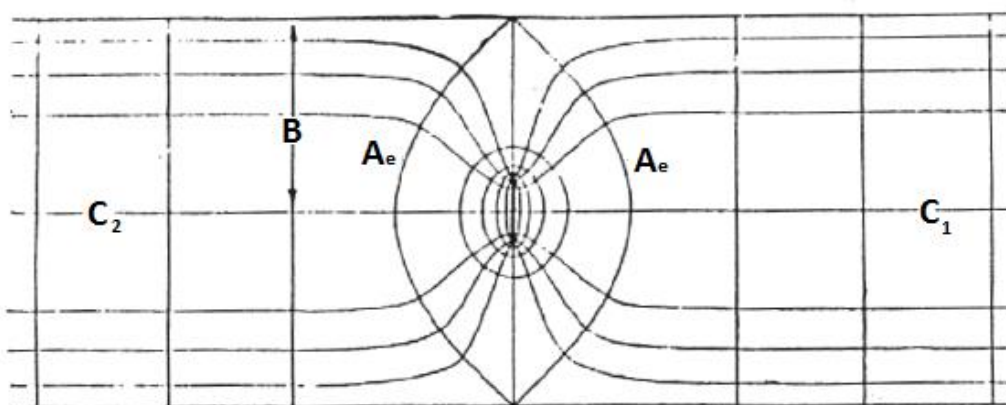
στην περίπτωση ενός αγωγίμου φιλμ ομοιόμορφα διανεμημένου πάνω στην αγωγίμη περιοχή A_c , όπου σ η αντίσταση ανά τετραγωνικό εκατοστό του φιλμ. Με το σ να ποικίλλει κατά μήκος του στρώματος ισχύει:

$$\frac{1}{R_f} = \int \frac{dA_c}{\sigma} \quad (1.2.3 - 9)$$

Με ρ την ειδική αντίσταση του υλικού του φιλμ και s το πάχος του ισχύει:

$$\sigma = \rho_f \cdot s \quad (1.2.3 - 10)$$

Οι περιοχές αυτές εντός των μελών C_1 και C_2 (σχ. 1.2.3-4) όπου, εξαιτίας του μικρού μεγέθους των σημείων επαφής, οι γραμμές της ροής του ρεύματος παρεκκλίνουν αισθητά της ευθείας πορείας τους, ονομάζονται περιοχές στένωσης ή απλά στενώσεις. Εντός των περιοχών στένωσης, το βαθμωτό δυναμικό είναι σχετικά μεγάλο αλλά σχετικά μικρό εκτός της στένωσης. Με άλλα λόγια, η αντίσταση R_{ab}^0 στην εξίσωση (1.2.3-6) είναι σχετικά μικρή, πολλές φορές και αμελητέα συγκρινόμενη με την R_{ab} . Σαν αποτέλεσμα, δεν είναι απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης των σημείων μέτρησης a και b .



Σχήμα 1.2.3-4: Γραμμές της ροής ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες μίας αντίστασης στένωσης

Το σχήμα 1.2.3-4 δείχνει το σύστημα των ισοδυναμικών επιφανειών και των γραμμών ροής του ρεύματος όταν και τα δύο μέρη αποτελούνται από το ίδιο μέταλλο, και η A_c αντιπροσωπεύει ένα ενιαίο κυκλικό a-spot στη μέση του A_a . Στην πράξη η στένωση μπορεί να θεωρηθεί περιορισμένη από ορισμένες επιφάνειες στο μεγαλύτερο μέρος των μελών, όπως για παράδειγμα η A_e στο σχήμα. Τέτοιες

επιφάνειες ονομάζονται *ακραίες επιφάνειες*. Σύμφωνα με το σχήμα, η απόσταση του A_e από το a-spot είναι της ίδιας τάξεως μέγεθος όπως και η ακτίνα r του κυλίνδρου.

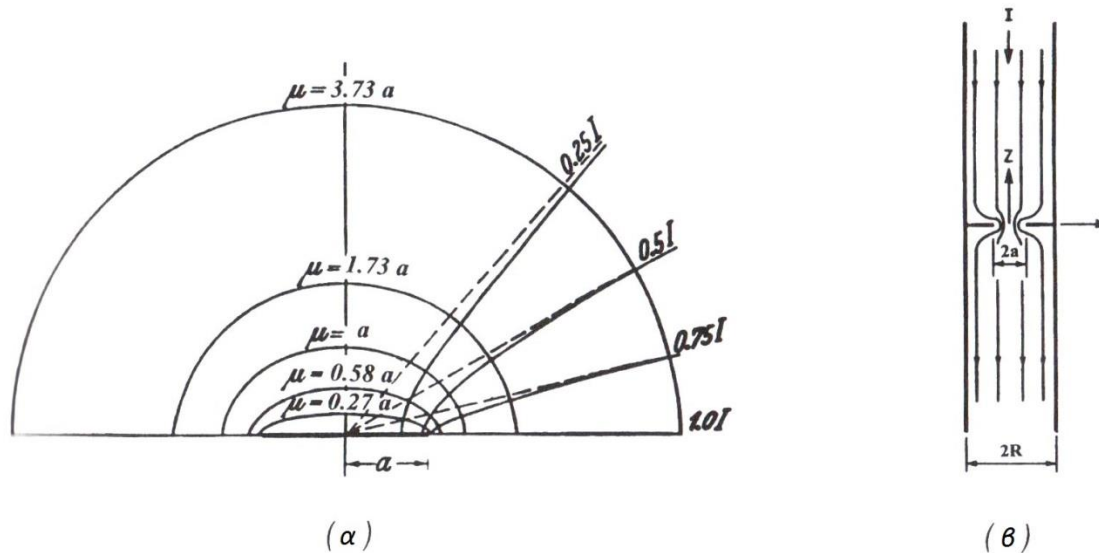
1.2.4 A-spots

Κυκλικά a-spots

Για μία κυκλική στένωση που βρίσκεται μεταξύ δύο ημιάπειρων στερεών (Σχήμα 1.2.4-1(α)) αποδεικνύεται ότι οι ισοδυναμικές επιφάνειες των μελών της επαφής αποτελούνται από ελλειψοειδή που καθορίζονται από την εξίσωση:

$$\frac{r^2}{a^2 + \mu^2} + \frac{z^2}{\mu^2} = 1$$

όπου μ είναι μία παράμετρος και οι r, z είναι κυλινδρικές συντεταγμένες.



Σχήμα 1.2.4-1: (α) Ισοδυναμικές επιφάνειες και γραμμές ροής ρεύματος κοντά σε μία ηλεκτρική στένωση. Η παράμετρος μ είναι ο κάθετος άξονας της κάθετης ελλειψοειδούς επιφανείας.

(β) Ηλεκτρικά αγώγιμος κύλινδρος ακτίνας R που φέρει κυκλική στένωση ακτίνας a .

Η αντίσταση μεταξύ της ισοδυναμικής επιφάνειας με κάθετο άξονα μήκους μ και της αντίστασης δίνεται ως :

$$R_\mu = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^\mu \frac{d\mu}{(\alpha^2 + \mu^2)} = \left(\frac{\rho}{2\pi\alpha}\right) \tan^{-1} \left(\frac{\mu}{\alpha}\right) \quad (1.2.4 - 1)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση του αγωγού. Σε αποστάσεις επαρκώς απομακρυσμένες από τη στένωση όπου το μ είναι πολύ μεγάλο, η αντίσταση στένωσης για καθένα από τα μέρη της επαφής, δηλαδή η αντίσταση διάδοσης, δίνεται από τον τύπο:

$$R_S = \frac{\rho}{4a} \quad (1.2.4 - 2)$$

και η συνολική αντίσταση στένωσης για ολόκληρη την επαφή είναι, επομένως, διπλάσια της αντίστασης διάδοσης:

$$R_c = \frac{\rho}{2a} \quad (1.2.4 - 3)$$

Στην περίπτωση που το άνω και το κάτω μέρος της επαφής αποτελούνται από υλικά με ειδικές αντιστάσεις ρ_1 και ρ_2 αντίστοιχα, τότε η αντίσταση μετάδοσης για καθένα από τα μέρη της επαφής είναι $\rho_i = 4a$ όπου $i = 1,2$. Η αντίσταση στένωσης, τότε, γίνεται:

$$R_c = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a} \quad (1.2.4 - 4)$$

Μη κυκλικά a-spots

Υπό συνθήκες υπό τις οποίες η τοπογραφία της επιφανείας των μελών σύζευξης δεν είναι ισοτροπική, η υπόθεση ότι τα a-spots συμπεριφέρονται σαν κυκλικά ενδέχεται να είναι άκυρες και αν οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα. Έχει αποδειχθεί από τον Holm ότι η αντίσταση διάδοσης $R_S(a, b)$ που σχετίζεται με ένα ελλειπτικό a-spot με ημιάξονες a και b δίνεται από τον τύπο:

$$R_S(a, b) = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{d\mu}{\sqrt{(\alpha^2 + \mu^2)(b^2 + \mu^2)}} \quad (1.2.4 - 5)$$

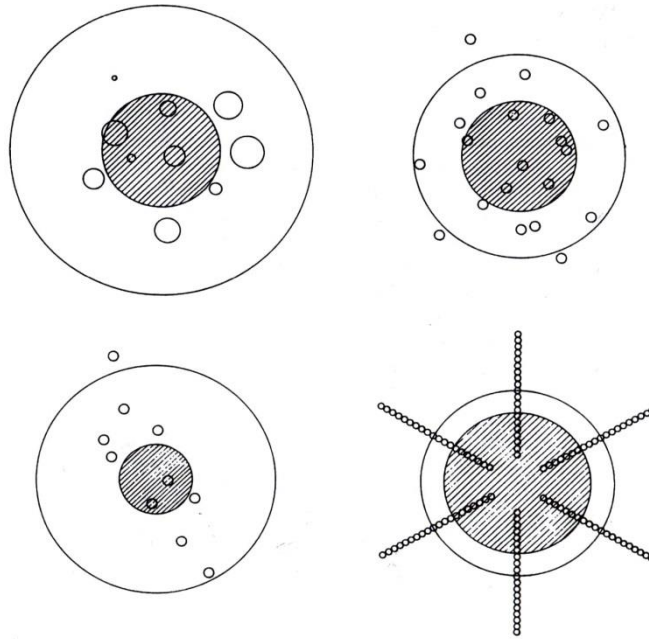
Και μπορεί να εκφραστεί σαν:

$$R_S(a, b) = \left(\frac{\rho}{4\alpha_c} \right) f(\gamma) \quad (1.2.4 - 6)$$

όπου $\gamma = \sqrt{a/b}$ είναι η τετραγωνική ρίζα της αναλογίας της στένωσης, $f(\gamma)$ ένας παράγοντας μορφής και α_c η ακτίνα ενός κυκλικού σημείου με περιοχή πανομοιότυπη με αυτή του a-spot.

Πολλαπλά σημεία επαφής

Στην πράξη, μία ηλεκτρική ζεύξη περιλαμβάνει ένα πλήθος σημείων επαφής (a-spots) μέσα από τα οποία περνάει το ηλεκτρικό ρεύμα από το ένα μέρος του συνδέσμου στο άλλο. Τα σημεία αυτά σχηματίζονται από την επαφή των εξογκωμάτων των συζευγμένων επιφανειών. Η επαφή μεταξύ ονομαστικά επίπεδων επιφανειών συμβαίνει σε συμπλέγματα από a-spots. Η θέση αυτών των συμπλεγμάτων καθορίζεται από την κυμάτωση μεγάλης κλίμακας των επιφανειών επαφής, ενώ των σημείων από την επιφανειακή τραχύτητα μικρής κλίμακας. Όπως όμως έχει αναφερθεί για να είναι ηλεκτρικά αγωγίμο ένα σημείο πρέπει τα μονωτικά στρώματα της επαφής όπως τα στρώματα οξειδίου να έχουν υποστεί ρήξη.



Σχήμα 1.2.1-2: Συμπλέγματα α -spots με αντίστοιχες ακτίνες ισοδυνάμων μονών επαφών (σκιασμένη περιοχή) και ακτίνα Holm (εξωτερική ακτίνα)

Στην απλούστερη περίπτωση ενός μεγάλου αριθμού n από κυκλικά α -spots εντός ενός μόνο συμπλέγματος η αντίσταση επαφής είναι:

$$R_c = \rho \left(\frac{1}{2na} + \frac{1}{2a} \right) \quad (1.2.4 - 7)$$

όπου a είναι η μέση α -spot ακτίνα που ορίζεται ως $\sum a_i/n$, ενώ α η ακτίνα του συμπλέγματος, η οποία ορίζεται μερικές φορές ως η ακτίνα Holm (Σχήμα 1.2.4-2).

1.3 Θερμοκρασία ενός ηλεκτρικά θερμαινόμενου a-spot

Ο ορισμός της αντίστασης στένωσης ως $\rho/2a$ είναι έγκυρος, όσο το ηλεκτρικό ρεύμα που περνά μέσα από τη στένωση είναι επαρκώς μικρό ώστε κάθε φαινόμενο παραγωγής θερμότητας πάνω στην αντίσταση στένωσης να είναι αμελητέο. Υπό αυτές τις συνθήκες, η πτώση τάσης κατά μήκος της στένωσης που παράγεται από ένα ηλεκτρικό ρεύμα I μπορεί να δοθεί απλά ως $\rho I/2a$. Όταν, όμως, παράγεται θερμότητα αξιόλογου μεγέθους σε Joule εντός της στένωσης, ο «συνωστισμός» των γραμμών του ρεύματος μέσα από το a-spot παράγει ένα θερμικό βαθμωτό φυσιολογικό ως προς τη στένωση. Το φαινόμενο αυτό περιπλέκει τη σχέση μεταξύ πτώσης τάσης κατά μήκος της επαφής, ηλεκτρικού ρεύματος και της διάστασης του a-spot.

Με το πέρασμα ενός ηλεκτρικού ρεύματος, η θερμοκρασία ενός a-spot αυξάνει πολύ γρήγορα σε ένα σημείο σχεδόν-ισορροπίας.

1.3.1 Σχέση Τάσης-Θερμοκρασίας

Η συμβατική αντιμετώπιση των ηλεκτρικά θερμαινόμενων επαφών σε θερμική ισορροπία υποθέτει ότι οι εξωτερικές επιφάνειες των αγωγών είναι θερμικά μονωμένες από το εξωτερικό περιβάλλον. Η θερμότητα που παράγεται μέσα σε ένα a-spot μπορεί, επομένως, να διαχέεται μόνο με αγωγή μέσω των μελών της επαφής. Αποδεικνύεται, λοιπόν, ότι οι γραμμές του ηλεκτρικού και του θερμικού ρεύματος ακολουθούν την ίδια διαδρομή, και ως εκ τούτου το ηλεκτρικό δυναμικό και οι ισοθερμικές επιφάνειες στο εσωτερικό των αγωγών συμπίπτουν. Αυτή η μοναδική σχέση μεταξύ των ροών του ηλεκτρικού και του θερμικού ρεύματος οδήγησε τον Kohlrausch να διαφορίσει την ακόλουθη σχέση μεταξύ της πτώσης τάσης V κατά μήκος της επαφής και της μέγιστης θερμοκρασίας T_m στη περιοχή διασύνδεσης της επαφής:

$$V = \sqrt{2 \int_{T_1}^{T_m} \lambda_1 \rho_1 dT} + \sqrt{2 \int_{T_2}^{T_m} \lambda_2 \rho_2 dT} \quad (1.3.1 - 1)$$

όπου λ και ρ είναι αντίστοιχα η θερμική αγωγιμότητα και η ηλεκτρική ειδική αντίσταση των αγωγών, οι εκθέτες 1 και 2 αναφέρονται στους δύο αγωγούς που έρχονται σε επαφή, και T_1 και T_2 αναφέρονται στις θερμοκρασίες των μελών που έρχονται σε επαφή. Οι ποσότητες λ και ρ γενικά μεταβάλλονται ανάλογα με τη θερμοκρασία. Δεδομένου του ότι οι γραμμές ροής του ηλεκτρικού ρεύματος συνωστίζονται περισσότερο στο a-spot, η μέγιστη θερμοκρασία T_m εμφανίζεται είτε μέσα στα όρια του a-spot είτε στο άμεσο περιβάλλον του. Για μία μονομεταλλική επαφή όπου $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ και $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, η T_m εμφανίζεται ακριβώς στο a-spot και η σχέση καταλήγει:

$$V = 2 \sqrt{2 \int_{T_1}^{T_m} \lambda \rho dT} \quad (1.3.1 - 2)$$

Πάνω από ένα φάσμα θερμοκρασιών όπου οι ποσότητες λ και ρ εξαρτώνται λίγο πλέον από τη θερμοκρασία, η εξίσωση (1.3.1-2) αποδίδει τη γνωστή μορφή της σχέσης τάσης-θερμοκρασίας ($V - T$) για μονομεταλλικές ηλεκτρικές επαφές:

$$(T_m - T_1) = \frac{V^2}{8\lambda\rho} \quad (1.3.1 - 3)$$

Η ποσότητα $(T_m - T_1)$ στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (1.3.1-3) ορίζεται ως υπερθερμοκρασία επαφής, δηλαδή ως η απόκλιση της θερμοκρασίας του a-spot από τη θερμοκρασία του συνολικού συνδέσμου.

1.3.2 Η σχέση Τάσης-Θερμοκρασίας με εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία ειδική ηλεκτρική αντίσταση και θερμική αγωγιμότητα

Συχνά, η εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τη θερμοκρασία μπορεί να εκφραστεί ως $\lambda = \lambda_0(1 - \beta T)$ και $\rho = \rho_0(1 + \alpha T)$ αντίστοιχα, πάνω από ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, όπου ο εκθέτης 0 αναφέρεται στην τιμή στους 0°C και τα β και α είναι οι θερμοκρασιακές συνιστώσες της θερμικής αγωγιμότητας και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμική αγωγιμότητα των μετάλλων μειώνεται, αυξανόμενης της θερμοκρασίας ενώ αντίστοιχα η ειδική ηλεκτρική αυξάνεται. Λαμβάνοντας λοιπόν αυτά υπόψιν, οι σχέσεις που δείχνουν την εξάρτηση των λ και ρ από τη θερμοκρασία παράγει την ακόλουθη σχέση $V-T$ από τη σχέση (1.3.1-1):

$$V^2 = 8\lambda_0\rho_0 \left\{ (T_m - T_1) + (a - \beta) \frac{(T_m^2 - T_1^2)}{2} - \alpha\beta \frac{(T_m^3 - T_1^3)}{3} \right\} \quad (1.3.2 - 1)$$

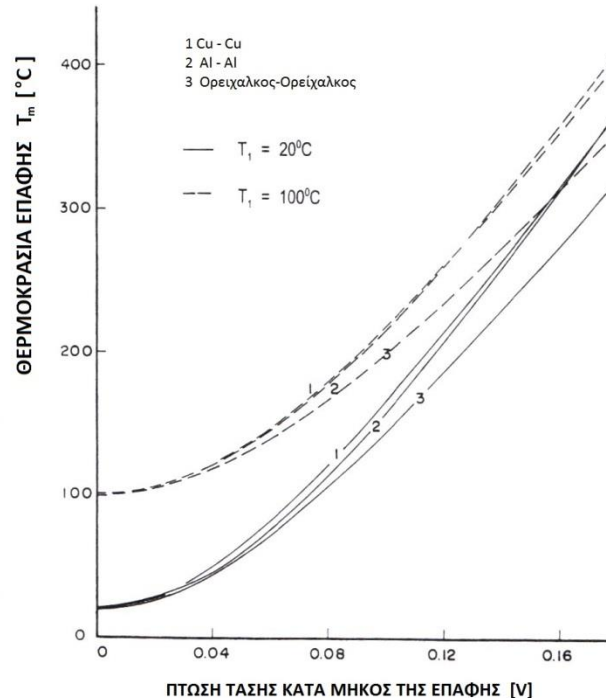
1.3.3 Ο Νόμος Wiedemann-Franz

Η εξίσωση (1.3.2-1) είναι μία ακριβής απεικόνιση της σχέσης $V-T$, που ισχύει για ολόκληρο το φάσμα θερμοκρασιών στο οποίο η ειδική αντίσταση και η θερμική αγωγιμότητα μεταβάλλονται γραμμικά με τη θερμοκρασία. Για τους σκοπούς, όμως, ενός μηχανικού η σχέση αυτή είναι δύσκολο να διαχειριστεί.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι όλες οι καμπύλες στο σχήμα 1.3.3-1 που σχετίζονται με την ίδια θερμοκρασία συνολικού αγωγού βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη. Μπορεί να επιβεβαιωθεί, ακόμα, ότι οι $V-T$ καμπύλες που αντιστοιχούν σε πολλά μέταλλα πέφτουν επίσης πολύ κοντά στις καμπύλες αυτές. Αυτή η εκπληκτική παρατήρηση οφείλεται, εν μέρει, στον νόμο Wiedemann-Franz, ο οποίος δηλώνει ότι οι αναλογίες της θερμικής αγωγιμότητας και της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης με την θερμοκρασία είναι τέτοιες ώστε τα λ και ρ σχετίζονται με τη σχέση:

$$\lambda\rho = LT \quad (1.3.3 - 1)$$

όπου L είναι η σταθερά Lorentz ($2,45 \times 10^{-8} V^2 K^{-2}$) και T είναι η απόλυτη θερμοκρασία. Παρόλο που αυτή η σχέση παρέχει μία λογική περιγραφή των ιδιοτήτων της θερμικής και ηλεκτρικής μεταφοράς στα μέταλλα σ' ένα μεγάλο φάσμα θερμοκρασιών για τις συνηθισμένες ηλεκτρικές επαφές, δεν είναι καθολικά έγκυρη.



Σχήμα 1.3.3-1: Σχέση Τάσης-Θερμοκρασίας για ηλεκτρικές επαφές χαλκού-χαλκού, αλουμινίου-αλουμινίου και ορείχαλκου-ορείχαλκου για θερμοκρασίες T_1 20° C και 100° C

Αν η σχέση (1.3.3-1) ισχύει, τότε η εξίσωση (1.3.1-2) αμέσως δίνει την αυστηρά έγκυρη $V-T$ σχέση:

$$V^2 = 4L(T_m^2 - T_1^2) \quad (1.3.3 - 2)$$

η οποία είναι ανεξάρτητη από τα υλικά της επαφής.

Η εξίσωση (1.3.3-2) μπορεί να απλοποιηθεί στη μορφή της εξίσωσης (1.3.1-3) με μαθηματικό επαναπροσδιορισμό και ανακατάταξη των όρων. Ορίζοντας ως $(T_m + T_1)/2$ τη μέση θερμοκρασία T_{avg} μέσα στην επαφή, η αποτίμηση της (1.3.3-1) συναρτήσει της T_{avg} αποδίδει:

$$\lambda_{avg} \rho_{avg} = \frac{L(T_m + T_1)}{2}$$

$$\text{Όμως, } (T_m^2 - T_1^2) = (T_m - T_1) \times (T_m + T_1) = (T_m - T_1) 2\lambda_{avg} \rho_{avg} / L$$

Αντικαθιστώντας αυτή την έκφραση στην (1.3.3-2), προκύπτει:

$$(T_m - T_1) = \frac{V^2}{8\lambda_{avg} \rho_{avg}}$$

και η σχέση V-T (1.3.1-3) ανακτάται με τις φυσικές παραμέτρους λ και ρ που αποτιμήθηκαν στη μέση θερμοκρασία του συνδέσμου.

Επειδή η εξίσωση (1.3.3-2) είναι ανεξάρτητη των ειδικών ιδιοτήτων θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υλικών της επαφής, εφαρμόζεται εξίσου καλά και σε μονομεταλλικές και σε διμεταλλικές επαφές, αρκεί και τα δύο υλικά τις επαφής να εμπίπτουν στον νόμο Wiedemann-Franz. Η εγκυρότητα του νόμου Wiedemann-Franz δεν εξασφαλίζει απαραίτητα ότι η μέγιστη θερμοκρασία επαφής εμφανίζεται στο σημείο της φυσικής διεπαφής.

1.3.4 Η πτώση τάσης σε μία επαφή σε σχέση με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται

Η θερμική και ηλεκτρική ροή υπακούουν σε παρεμφερείς νόμους. Η θερμική ενέργεια ρέει σε συνάρτηση με τις θερμοκρασιακές διαφορές και αντίστοιχα το ηλεκτρικό ρεύμα σε συνάρτηση προς τη διαφορά δυναμικού. Σε συμμετρικά συστήματα ηλεκτρικών επαφών, η θερμική ροή ακολουθεί την ίδια διεύθυνση με τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Ως εκ τούτου υπάρχει μία σχέση μεταξύ θερμοκρασιακής διαφοράς και διαφοράς δυναμικού.

Για τη διατύπωση μίας ενεργειακής σχέσης, που διέπει μία επαφή, έχουν γίνει οι παρακάτω παραδοχές:

- Σαν είσοδος του ηλεκτρικού ρεύματος νοείται η πραγματική επιφάνεια επαφής, και σαν έξοδος μία επιφάνειας αρκετά μακριά από την είσοδο ώστε η ροή σε αυτή να μην επηρεάζει τη θερμική και ηλεκτρική ροή στο άμεσο περιβάλλον της επαφής.
- Το σύστημα των δύο μερών της ηλεκτρικής επαφής είναι συμμετρικό.

Η δεύτερη παραδοχή σημαίνει ότι τα δύο μέρη της επαφής είναι από το ίδιο υλικό, το οποίο είναι ιστροπικό, δηλαδή ότι η ειδική αντίσταση ρ , και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ , εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία. Σημαίνει επίσης ότι η επιφάνεια επαφής είναι ισοθερμική και ισοδυναμική (ταυτόχρονα για τα δύο μέρη της επαφής) και ότι αυτή έχει την υψηλότερη θερμοκρασία του συστήματος, το οποίο καθώς είναι συμμετρικό δεν έχουμε ροή θερμότητας από το ένα μέρος της επαφής προς το άλλο.

Κάτω από αυτές τις παραδοχές ως συνάρτηση μεταξύ θερμοκρασίας T και τάσης U , για μία συμμετρική αντίσταση στένωσης, έχει προταθεί η σχέση:

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T) \lambda(T) dT = \frac{U^2}{8} \quad (1.3.4 - 1)$$

όπου ΔT η διαφορά της θερμοκρασίας των σημείων επαφής από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Εάν χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του γινομένου $\overline{\rho\lambda}$ τότε η σχέση (1.3.4-1) γίνεται:

$$\overline{\rho\lambda} \cdot \Delta T = \frac{U^2}{8} \quad (1.3.4 - 2)$$

ή

$$U = \sqrt{8 \cdot \overline{\rho\lambda} \cdot \Delta T} \quad (1.3.4 - 3)$$

Η σχέση (1.3.4-3) δίνει τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να αναπτυχθεί σε επαφές λόγω της αντίστασης στένωσης για δεδομένη πτώση τάσης.

Σε περίπτωση που μέρος της παραγόμενης θερμότητας διαφεύγει προς το περιβάλλον μέσω (όπως συμβαίνει στην πράξη), τότε η σχέση (1.3.4-1) γίνεται:

$$\overline{\rho\lambda} \cdot \Delta T \leq \frac{U^2}{8} \quad (1.3.4 - 4)$$

και

$$U \geq \sqrt{8 \cdot \overline{\rho\lambda} \cdot \Delta T} \quad (1.3.4 - 5)$$

Θεωρώντας το νόμο των Wiedemann-Franz-Lorenz, έχουμε :

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T) \lambda(T) dT = \int_{T_0}^T L T dT = \frac{L}{2} (T^2 - T_0^2) \leq \frac{U^2}{8} \quad (1.3.4 - 6)$$

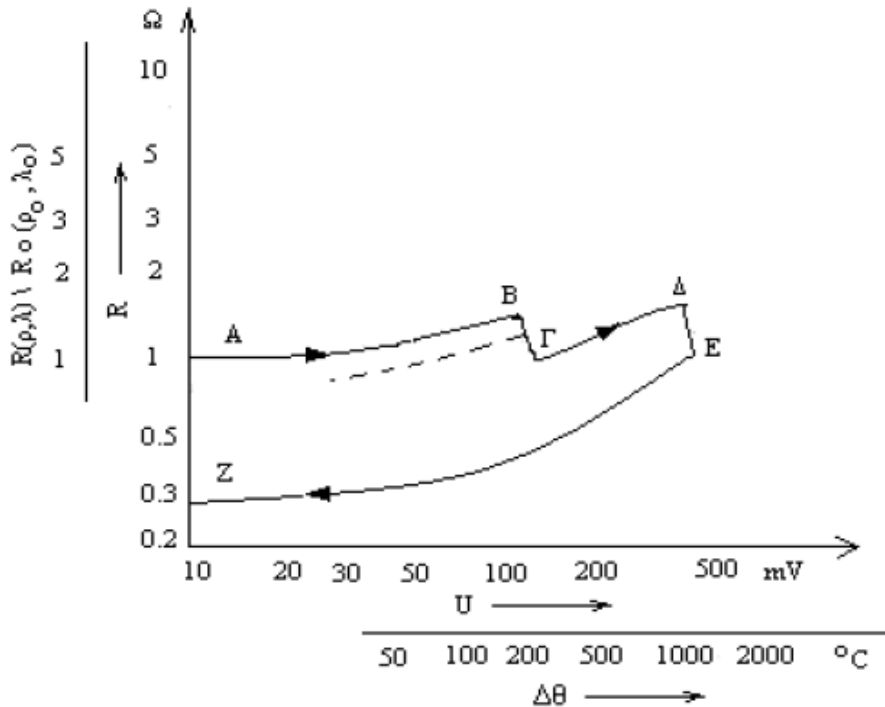
ή

$$U \geq 2 \sqrt{L(T^2 - T_0^2)} \quad (1.3.4 - 7)$$

με T_0 τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

1.3.5 Χαρακτηριστική καμπύλη αντίστασης διάβασης-πτώσης τάσης και διαφοράς θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην επαφή

Ένα παράδειγμα διαγράμματος, που αφορά την αντίσταση διάβασης σε συνάρτηση με την πτώση τάσης ή τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο λυόμενο σύνδεσμο, ανάλογα με τη δύναμη σύσφιξης και την τιμή του ρεύματος δίνεται στο σχήμα (1.3.5-1). Εκεί φαίνεται ότι οι συναρτήσεις $R = f(U)$ και $R = f(\Delta T)$ είναι αύξουσες στην περιοχή των πρακτικών εφαρμογών ($\Delta T < 50^\circ\text{C}$). Η κλίμακα που σχεδιάζονται οι χαρακτηριστικές αυτές είναι λογαριθμική. Στον άξονα των x δίνεται συνήθως η πτώση τάσης στην επαφή και ταυτόχρονα η διαφορά θερμοκρασίας (τα μεγέθη αυτά συνδέονται με τη σχέση (1.3.4-5)). Στον άξονα των y δίνεται επίσης ο λόγος $R(\rho, \lambda)/R_0(\rho_0, \lambda_0)$ δηλαδή το πηλίκο της αντίστασης διάβασης R σε θερμοκρασία T (όπου η ειδική αντίσταση έχει την τιμή ρ και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας έχει την τιμή λ) προς την αντίσταση διάβασης R_0 σε θερμοκρασία χώρου T_0 (με ειδική αντίσταση ρ_0 και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ_0).



Σχήμα 1.3.5-1: Τυπική χαρακτηριστική $R=f(U)$ ή $R=f(\Delta\theta)$ για μία συμμετρική καινούργια επαφή από χαλκό με δύναμη σύσφιξης 100gr. Γεωμετρία επαφής: κύλινδρος – κύλινδρος.

Στη χαρακτηριστική του σχήματος (1.3.5-1) διακρίνει κανείς τις περιοχές (AB, ΒΓ, ΓΔ, ΔΕ και ΕΖ).

Στο τμήμα AB η αντίσταση διάβασης αυξάνει με τη θερμοκρασία. Η αύξηση της αντίστασης διάβασης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$R_c(T) \approx R_c(T_0) \left(1 + \frac{2}{3} \alpha (T - T_0) \right) \quad (1.3.5 - 1)$$

Στην περιοχή ΒΓ η αντίσταση διάβασης γίνεται μικρότερη. Η μείωση αυτή μπορεί να αιτιολογηθεί από την αύξηση της επιφάνειας A_c (προς την οποία η R είναι αντιστρόφως ανάλογη), λόγω μείωσης της σκληρότητας του υλικού από την αποκρυστάλλωση, που υφίσταται κατά την ανόπτηση. Όπως φαίνεται από το σχήμα 1.3.5-1 η περιοχή της θερμοκρασίας ανόπτησης για χαλκό είναι από 190°C έως 200°C. Η περιοχή αυτή για τον άργυρο είναι 180°C έως 185°C.

Στο τμήμα ΓΔ της χαρακτηριστικής $R = f(\Delta T)$ η επιφάνεια A_c φαίνεται ότι έχει σταθερή τιμή μετά την ανακρυστάλλωση και γι' αυτό η αντίσταση διάβασης αυξάνει σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Η ΓΔ είναι πρακτικά παράλληλη προς την AB. Σε αρκετά υλικά επαφών η παραπάνω αύξηση είναι σύντομη ή δεν υπάρχει, γιατί συνεχίζεται η ανακρυστάλλωση με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Στο σημείο Δ της χαρακτηριστικής συμβαίνει η τήξη του υλικού (η θερμοκρασία τήξης του χαλκού είναι 1083°C). Η επιφάνεια A_c αυξάνει και υπάρχει μεταλλική συνέχεια μεταξύ των δύο μερών της επαφής, λόγω συγκόλλησής της. Η

αύξηση της επιφάνειας A_c και η συγκόλληση των επαφών συνεπάγονται μείωση της αντίστασης διάβασης στην επαφή και αυτό φαίνεται στο τμήμα της καμπύλης ΔΕ.

Όταν από το σημείο Ε της χαρακτηριστική μειωθεί η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, τότε η αντίσταση διάβασης γίνεται μικρότερη (τμήμα ΕΖ). Η ΕΖ είναι πρακτικά παράλληλη προς την ΑΒ.

Το τμήμα ΑΒ της χαρακτηριστικής αποδίδει την ιδανική συμπεριφορά των επαφών (σταθερή επιφάνεια A_c), τόσο κατά την αύξηση όσο και τη μείωση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος. Στην πράξη όμως η επιφάνεια A_c δεν έχει σταθερή τιμή γιατί η σκληρότητα των υλικών της επαφής μεταβάλλεται από τις αυξομειώσεις της θερμότητας που παράγεται, σε συνδυασμό με θλιπτικές τάσεις.

Από τη χαρακτηριστική $R = f(U)$ ή $R = f(\Delta T)$ μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι περιοχές τιμών της θερμοκρασίας και της πτώσης τάσης σε μία επαφή, που συνεπάγονται ανακρυστάλλωση στα υλικά των επαφών (περιοχή ΒΓ), αποτελεί την έναρξη της αποσταθεροποίησης της επαφής. Πέρα από αυτή την περιοχή οι επαφές που λειτουργούν υπό ονομαστικό ρεύμα, πρέπει να θεωρούνται ότι έχουν ουσιαστικά καταστραφεί. Η θεωρία που διατυπώθηκε για τη χαρακτηριστική του σχήματος 1.3.5-1 αφορά καθαρές επαφές χωρίς αξιόλογο στρώμα επικαθίσεων σε αυτές. Σε περιπτώσεις που το στρώμα των επικαθίσεων έχει σημαντικό πάχος και καλύπτει μεγάλο ποσοστό της επιφάνειας A_c , η χαρακτηριστική αυτή δεν ισχύει και παρατηρείται εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στα αρχικά στάδια λειτουργίας τους, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία.

1.4 Οξείδια σε επαφές διακοπών και η σημασία της θερμοκρασίας στην αύξηση του πάχους τους

Η οξείδωση των μέταλλο-προς-μέταλλο επαφών εντός των ορίων της διεπαφής θεωρείται ως ο πιο σοβαρός μηχανισμός αποσύνθεσης που βλάπτει τους μηχανικούς συνδέσμους. Στην περίπτωση του χαλκού έχει αποδειχθεί ότι παρουσία οξυγονούχων ατμοσφαιρών η συνεχής οξείδωση των μεταλλικών επαφών μπορεί να προκαλέσει ταχεία αύξηση στην αντίσταση της επαφής σε μία υψηλή τιμή ακόμα κι αν η τιμή αυτή κρατήθηκε χαμηλά για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα.

Οι επικαθίσεις σε μία ηλεκτρική επαφή είναι αιτία αύξησης της αντίστασης διάβασης και επομένως ο κύριος λόγος κακής λειτουργίας της. Οι επικαθίσεις, ανάλογα με τη σύνθεση τους, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: σε χημικές ενώσεις (όπως π.χ. τα οξείδια μετάλλου της επαφής) και σε διάφορα παρασιτικά στοιχεία (όπως σκόνη, τα λιπαντικά και υδρατμοί). Ανάλογα με το πάχος τους οι επικαθίσεις διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- επικαθίσεις με πάχος λίγων ατόμων (όπως ένα στρώμα μίας ή δύο στιβάδων μορίων νερού)
- προστατευτικές επικαθίσεις, που είναι χημικές ενώσεις, και οι οποίες δεν αυξάνονται όταν αποκτήσουν ένα μικρό πάχος. Οι επικαθίσεις αυτές θεωρείται ότι προστατεύουν την επιφάνεια της επαφής.
- επικαθίσεις που είναι χημικές ενώσεις στις οποίες συμμετέχει το μέταλλο της επαφής των οποίων το πάχος αυξάνει με το χρόνο.

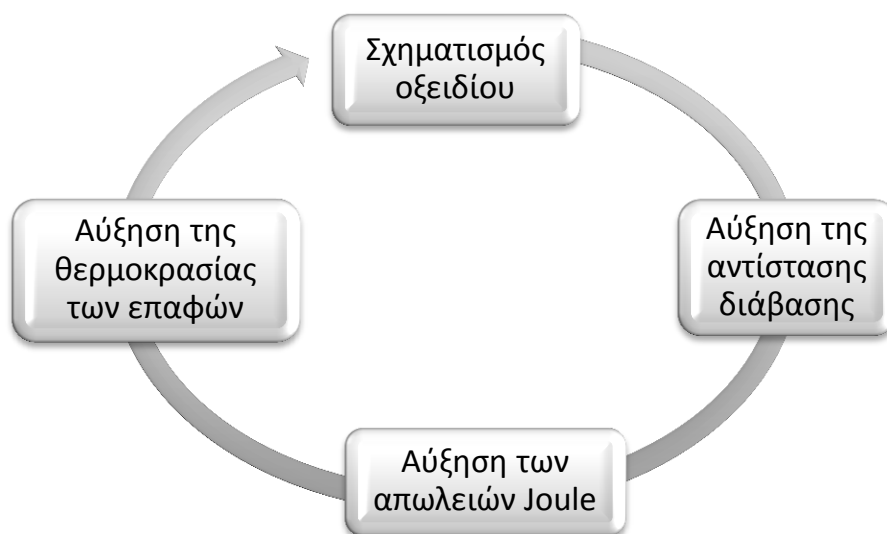
Για τις επικαθίσεις με πάχος λίγων ατόμων γίνεται διάκριση, σε αυτές που τα άτομα τους ενώνονται με το μέταλλο της επαφής μέσω δυνάμεων Van der Waals και δεσμούς της τάξης των 0,05 eV και εκείνες που ενώνονται με ελεύθερους δεσμούς ατόμων της επιφάνειας του μετάλλου με ενέργεια από 1 eV έως 8 eV.

Ορισμένες χημικές ενώσεις στην επιφάνεια της επαφής αυξάνουν από 10 έως 100 Å και προστατεύουν με αυτόν τον τρόπο την επιφάνεια των μετάλλων της επαφής από την επίδραση του οξυγόνου της ατμόσφαιρας καθώς και από άλλα χημικά στοιχεία. Το ανοξείδωτο ασάλι και το αλουμίνιο έχουν εξαιρετικά προστατευτικά οξείδια και ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία. Αντίθετα τα οξείδια του χαλκού και του νικελίου δεν προστατεύουν αποτελεσματικά τα αντίστοιχα μέταλλα αλλά συνεχίζουν να αυξάνονται αργά αλλά συνεχώς στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στην περίπτωση των επαφών αλουμινίου, η οξείδωση θεωρείται γενικά ως ένα λιγότερο πιθανός μηχανισμός αποδόμησης καθώς η ανάπτυξη οξειδίου είναι αυτοπεριοριζόμενη, φτάνοντας το οριακό πάχος των 10nm μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό το πάχος είναι κατά πολύ μικρότερο από τη διάμετρο των σημείων επαφής, τα οποία θεωρείται ότι είναι πολύ μεγαλύτερα των 10nm για τραχείες

επιφάνειες. Το οξείδιο αλουμινίου διαμορφώνεται ως ένα διπλό στρώμα όταν η γυμνή επιφάνεια του αλουμινίου εκτίθεται στην οξυγονούχα ατμόσφαιρα. Αυτό το διπλό στρώμα αποτελείται από ένα πολύ λεπτό, μη πορώδες, εσωτερικό στρώμα φραγμού δίπλα στο μέταλλο και ένα παχύτερο, λίγο πολύ πορώδες εξωτερικό στρώμα πάνω από αυτό. Το στρώμα φραγμού, το οποίο είναι εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία φτάνει στο μέγιστο πάχος του μέσα σε λίγα μs, ενώ το εξωτερικό μεγαλύτερο μέρος του στρώματος αναπτύσσεται βραδύτερα και εξαρτάται από τη σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στη δημιουργία οξειδίων και γενικά επικαθίσεων στις επαφές παρουσιάζει ενδιαφέρον δεδομένου ότι το φαινόμενο ανακυκλώνεται κατά τη σειρά που απεικονίζεται στο σχήμα 1.4-1.



Σχήμα 1.4-1 Απλοποιημένη παράσταση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη δημιουργία οξειδίων

1.5 Η επίδραση της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα στην οξείδωση των επαφών

Το πάχος του στρώματος της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα εξαρτάται από την τραχύτητα των επιφανειών της επαφής. Στον άργυρο, αυτό το στρώμα θεωρείται ότι είναι μικρότερο από 50Å. Στρώματα νερού του πάχους αυτού δεν αντέχουν την πίεση των δύο μερών της επαφής και γι' αυτό διατάσσονται περιφερειακά στην επιφάνεια A_c και στα πιθανά κενά που υπάρχουν. Έχει υποστηριχθεί ότι λεπτά στρώματα νερού, ανάμεσα σε μεταλλικές επιφάνειες αφ' ενός και οξειδία και άνθρακας αφ' ετέρου μπορούν να δημιουργήσουν τοπικά ηλεκτρικά στοιχεία, τα οποία οξειδώνουν τις επαφές. Αυτή η διεργασία χρειάζεται μικρότερο χρόνο από την οξείδωση της επαφής στον ατμοσφαιρικό αέρα. Για να συμβεί όμως αυτό απαιτούνται μεγάλες ποσότητες υγρασίας (πάνω από 70%) και λεπτά ασυνεχή στρώματα νερού (που μπορούν με ιόντα να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα), ή υγροσκοπικά τεμάχια σκόνης.

Υπάρχει ακόμα η άποψη, ότι τα στρώματα νερού και των στερεών λιπαντικών σε μία επαφή επηρεάζουν ελάχιστα την αντίσταση διάβασης γιατί ο κύριος όγκος τους απομακρύνεται με το κλείσιμο του λυόμενου συνδέσμου και μένουν μόνο απλές στοιβάδες ατόμων, οι οποίες είναι αγωγίμες λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος. Στερεά κατάλοιπα όμως μαύρου χρώματος και μικρού πάχους (έως 10Å), που έχουν γίνει αναπόσπαστο μέρος της επιφάνειας της επαφής παρουσιάζουν στην πράξη μεγάλη αντίσταση και μπορούν να γίνουν αιτία αύξησης της αντίστασης διάβασης. Μία ερμηνεία μπορεί να δοθεί από τη μείωση των δυνατοτήτων απαγωγής θερμότητας, που έχουν γενικά οι επιφάνειες μαύρου χρώματος, συγκριτικά προς επιφάνειες με άλλες αποχρώσεις. Οι επικαθίσεις αυτές είναι συνήθως άμορφες οργανικές ουσίες μεγάλου μοριακού βάρους που προέρχονται από οργανικούς ατμούς, οι οποίοι παράγονται στους οργανικούς μονωτές που χρησιμοποιούνται στη στήριξη των ηλεκτρικών επαφών. Ο πολυμερισμός είναι πολύ διαδεδομένος στους υδρογονάνθρακες και έχει επισημανθεί ότι πάρα πολλά μονωτικά υλικά παράγουν ατμούς κατά τον πολυμερισμό τους. Τέλος όταν σε μία επαφή δημιουργούνται τοπικά μικρές ηλεκτρικές εκκενώσεις τότε τα οργανικά στρώματα που προαναφέρθηκαν απανθρακώνονται με αποτέλεσμα από τα λεπτά στρώματα άνθρακα να διευκολύνεται η εκδήλωση ηλεκτρικών εκκενώσεων μεγαλύτερης ενέργειας.

1.6 Γαλβανική διάβρωση

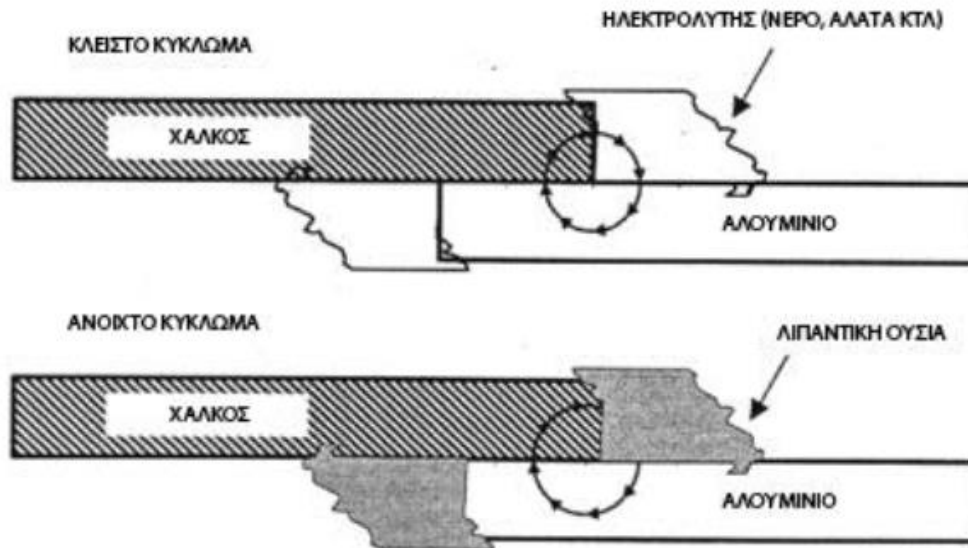
Σε ένα διμεταλλικό σύστημα, η γαλβανική διάβρωση είναι ένα από τους πιο σοβαρούς μηχανισμούς υποβάθμισης. Όποτε ανόμοια μέταλλα είναι συζευγμένα παρουσία διαλυμάτων που περιέχουν ιονισμένα άλατα, τότε συναντάται το φαινόμενο της γαλβανικής διάβρωσης. Το μέταλλο με το αρνητικότερο ηλεκτρολυτικό δυναμικό είναι ανοδικό και θα καταναλωθεί από την γαλβανική διάβρωση.

Στην περίπτωση συνδέσεων αλουμινίου-χαλκού, το αλουμίνιο (ανοδικό συστατικό) διαλύεται και αποθηκεύεται στην κάθοδο χαλκού με τη μορφή ενός πολύπλοκου ένυδρου οξειδίου αλουμινίου, με μία ταυτόχρονη εξέλιξη υδρογόνου στην κάθοδο. Η διαδικασία αυτή θα συνεχιστεί για όσο είναι παρών ο ηλεκτρολύτης ή μέχρι το αλουμίνιο καταναλωθεί εξ' ολοκλήρου.

Οι συνδέσεις αλουμινίου-χαλκού επηρεάζονται από τη διάβρωση με δύο τρόπους:

- ή η επιφάνεια επαφής μειώνεται δραστικά, προκαλώντας ηλεκτρική βλάβη
- ή ο σύνδεσμος διαβρώνεται σοβαρά, προκαλώντας μηχανική βλάβη

Τις περισσότερες φορές η βλάβη οφείλεται στον συνδυασμό αυτών των δύο αποτελεσμάτων. Το σχήμα 1.6-1 απεικονίζει σχηματικά τη διαδικασία της γαλβανικής διάβρωσης.



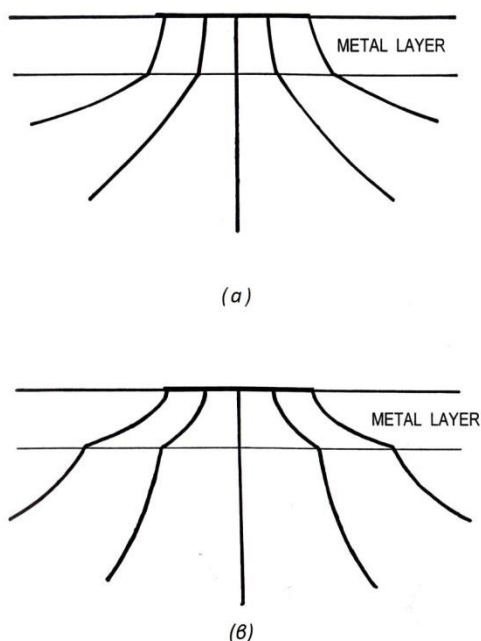
Σχήμα 1.6-1: Περίπτωση γαλβανικής διάβρωσης σε επαφή χαλκού-αλουμινίου (περιπτώσεις ανοικτού (κάτω) και κλειστού κυκλώματος(πάνω))

1.7 Η επίδραση επιφανειακών στρωμάτων στην αντίσταση της στένωσης και επαφής

Η παρουσία ενός στρώματος στο σημείο διασύνδεσης μίας ηλεκτρικής ζεύξης επηρεάζει την αντίσταση της επαφής με ποικίλους τρόπους. Αν το στρώμα αυτό εμφανίζεται αρχικά σε μία από τις επιφάνειες επαφής και είναι ηλεκτρικά αγώγιμο, τότε η αντίσταση στένωσης ενός *a-spot* μπορεί να μειωθεί είτε να αυξηθεί σε σύγκριση με την αντίσταση που παράγεται από το πανομοιότυπο *a-spot* πάνω στην ακάλυπτη, γυμνή επιφάνεια. Το τι θα συμβεί ακριβώς εξαρτάται από την ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υλικού του στρώματος σε σχέση με αυτή του υποστρώματος.

Τα ηλεκτρικά αγώγιμα επιχρίσματα (γαλβανισμός) χρησιμοποιούνται συνήθως για να ελαχιστοποιήσουν την ηλεκτρική αντίσταση της επαφής. Η αντίσταση επαφής ενδέχεται να μειωθεί μέσω της δράσης αρκετών μηχανισμών όπως η μείωση της σκληρότητας της επιφάνειας, η εξάλειψη των ηλεκτρικά μονωτικών επιφανειακών στρωμάτων οξειδίων κλπ. Τα αγώγιμα επιχρίσματα χρησιμοποιούνται επίσης για να προστατεύουν τις επιφάνειες των επαφών από την αμαύρωση και την οξείδωση, την διάβρωση, τη μηχανική φθορά.

Θα ήταν αναμενόμενο η αντίσταση της επαφής να εξαρτάται από την ειδική ηλεκτρική αντίσταση της επιμετάλλωσης σε σχέση με αυτή του υποστρώματος και στην αναλογία της ακτίνας του *a-spot* προς το πάχος της επιμετάλλωσης. Υπό συνθήκες όπου η ειδική αντίσταση του υλικού της επιμετάλλωσης είναι μεγαλύτερη από αυτή του υποστρώματος, το ηλεκτρικό ρεύμα προερχόμενο από το *a-spot* εξαπλώνεται περισσότερο μέσα στο υπόστρωμα απ' ό,τι στην επιμετάλλωση όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7-1α.



Σχήμα 1.7-1: Κατανομή του ρεύματος σε μία μεταλλική επιφάνεια υπό συνθήκες
α) η αντίσταση στρώματος είναι μεγαλύτερη από αυτή του
β) Η αντίσταση του στρώματος είναι μικρότερη από αυτή του υποστρώματος

Σε αυτή την περίπτωση η πτώση δυναμικού στην άμεση γειτονία του *a-spot* στο υπόστρωμα είναι αμελητέα σε σύγκριση με την πτώση δυναμικού κατά μήκος του φιλμ σε μία κατεύθυνση κάθετη προς τη διεπαφή στρώματος/υποστρώματος. Συνεπώς η διεπαφή καθορίζει μία σχεδόν ισοδυναμική επιφάνεια και κατά συνέπεια η πυκνότητα ρεύματος στο στρώμα είναι ομοιόμορφη κατά μήκος του *a-spot* και η αντίσταση διάδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$R_s = \frac{\rho}{4a}$$

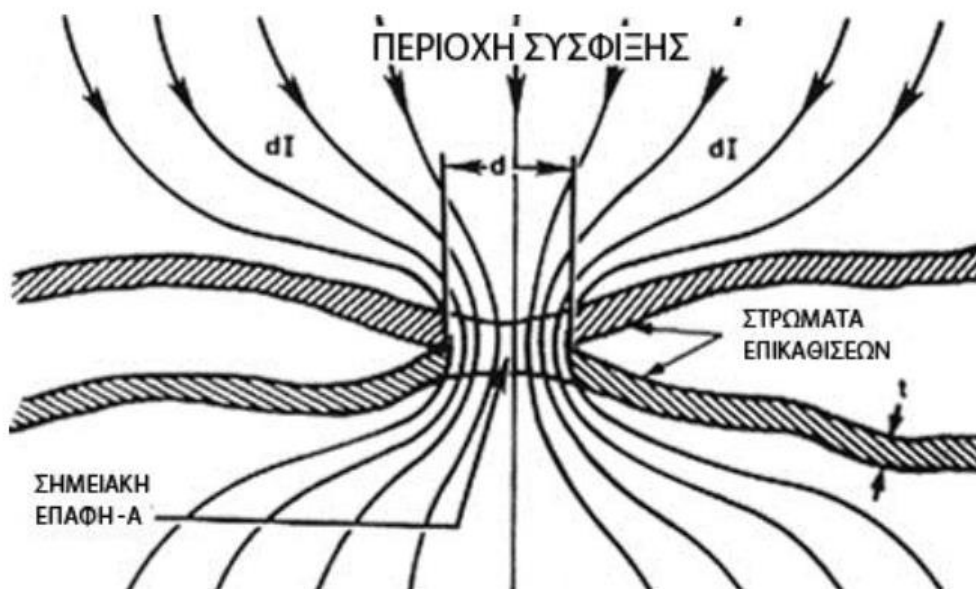
όπου ρ η ειδική αντίσταση του υποστρώματος. Καθώς το ρεύμα περνά

από το στρώμα της περιοχής πa^2 , πάχους d^2 , και ειδικής αντίστασης ρ_f , η αντίσταση του επιπρόσθετου στρώματος είναι περίπου $\rho_f d / \pi a^2$. Η συνολική αντίσταση τότε δίνεται από τη έκφραση:

$$R_t = \left(\frac{\rho}{4a}\right) \left\{ 1 + \left(\frac{4}{\pi}\right) \left(\frac{\rho_f}{\rho}\right) \left(\frac{d}{a}\right) \right\} \quad (1.7.1 - 1)$$

Αν η ειδική αντίσταση της επιμετάλλωσης, όμως, είναι μικρότερη από αυτή του υποστρώματος, οι γραμμές του ρεύματος εξαπλώνονται σε μεγαλύτερο βαθμό μέσα στο στρώμα απ' ότι στο υπόστρωμα και η αντίσταση μετάδοσης μειώνεται αυξανόμενου του πάχους του στρώματος (Σχήμα 1.7-1β).

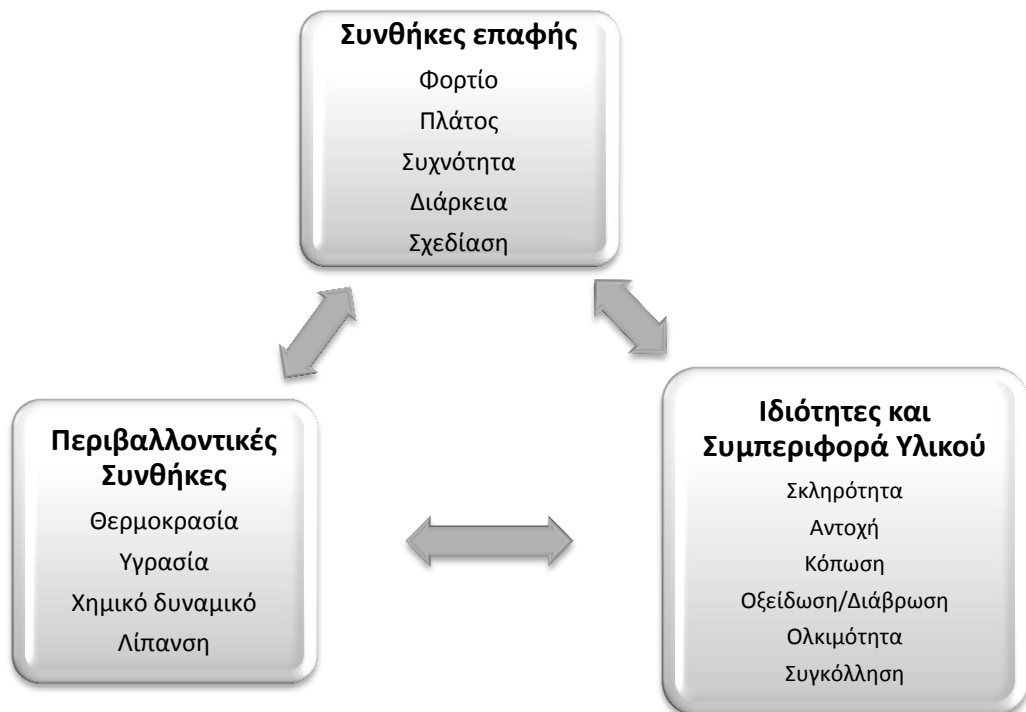
Στην περίπτωση των επιμεταλλωμένων επαφών, όπου το πάχος της επιμετάλλωσης είναι συγκρίσιμο με τη διάμετρο του a-spot, η επιμετάλλωση εισάγει έναν πρόσθετο παράγοντα στην αντίσταση της επαφής. Αυτό συμβαίνει επειδή η στένωση έγκειται εν μέρει στην επιμετάλλωση και εν μέρει στον όγκο του αγωγού. Σαν αποτέλεσμα, η ροή του ρεύματος διαθλάται καθώς διασχίζει το όριο, όπως απεικονίζεται και σχηματικά στο σχήμα 1.7-2.



Σχήμα 1.7-2: Σχηματική απεικόνιση μίας διαμόρφωσης a-spot μεταξύ επιμεταλλωμένων επιφανειών

1.8 Διάβρωση

Η διάβρωση είναι ένα συχνό πρόβλημα μεγάλης πρακτικής σημασίας που μπορεί να επηρεάσει μία ευρεία γκάμα ηλεκτρικού εξοπλισμού πράγμα που μπορεί να συνεπάγεται δαπανηρή αντικατάσταση εξαρτημάτων και ακόμα πιο ακριβό εξοπλισμό σε βάθος χρόνου. Η διαδικασία ορίζεται ως μία επιταχυνόμενη φθορά της επιφανείας που λαμβάνει χώρα στο σημείο διασύνδεσης των υλικών που έρχονται σε επαφή και υπόκεινται σε μικρές κινήσεις ταλάντωσης. Η απαραίτητη κίνηση ταλάντωσης των μελών που έρχονται σε επαφή μπορεί να παραχθεί από μηχανικές δονήσεις, διαφορική θερμική διαστολή των σε επαφή μετάλλων, από χαλάρωση λόγω φορτίου, και επίσης από θέρμανση του συνδέσμου από το άνοιγμα και κλείσιμο των διακοπών ισχύος. Είναι γενικά αποδεκτό ότι η διάβρωση ευθύνεται για πλάτη ολίσθησης όχι μεγαλύτερα από 125 μm .



Σχήμα 1.8-1 Σχηματική απεικόνιση των παραγόντων που επηρεάζουν τη διάβρωση

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση μπορούν να χωριστούν σε 3 ευρείες κατηγορίες:

- συνθήκες της επαφής
- περιβαλλοντικές συνθήκες
- ιδιότητες και συμπεριφορά του υλικού

Όπως μπορεί να φανεί και στο σχήμα 1.8-1 αυτοί οι παράγοντες μπορούν να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους και να επηρεάσουν τόσο τη φύση όσο και το μέγεθος της καταστροφής από διάβρωση.

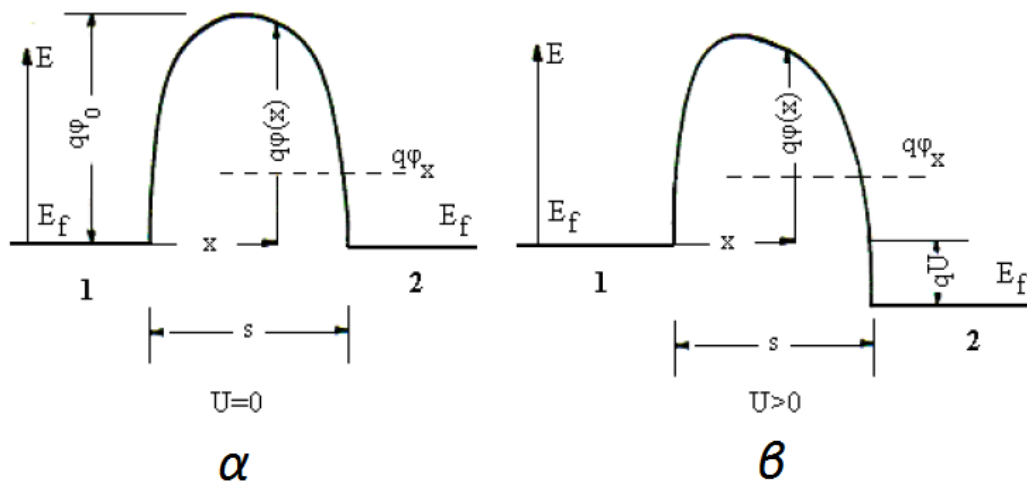
Παρόλο που δεν υπάρχει ακόμα πλήρης ομοφωνία για τους μηχανισμούς της διάβρωσης, ειδικά όσον αφορά τη σχετική σημασία των διαδικασιών που εμπλέκονται, μπορεί να θεωρηθεί εκ του ασφαλούς ότι οι ακόλουθες διαδικασίες λαμβάνουν χώρα:

1. Διακοπή ενός στρώματος οξειδίου στην επιφάνεια από μηχανική δράση εκθέτει το καθαρό μέταλλο το οποίο θα αντιδράσει με το περιβάλλον και θα οξειδωθεί γρήγορα.
2. Η αφαίρεση υλικού από τις επιφάνειες λόγω φθοράς συγκόλλησης, αποκόλλησης ή από διάτμηση των μικροσυγκολλήσεων που σχηματίστηκαν μεταξύ των εξογκωμάτων των επιφανειών που έρχονται σε επαφή.
3. Οξείδωση των ριγισμάτων που προήλθαν από φθορά και διαμόρφωση σκληρών τραχείων σωματιδίων που θα συνεχίσουν να καταστρέφουν τις επιφάνειες «οργώνοντάς» τες.
4. Διαμόρφωση ενός παχέος μονωτικού στρώματος οξειδίων και κομματιών από φθορά ανάμεσα στις δύο επιφάνειες που έρχονται σε επαφή.

1.9 Η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος

Σύμφωνα με την κλασική φυσική, επικαθίσεις πάχους λίγων Angstrom μονώνουν ηλεκτρικά τα δύο μέρη μίας επαφής. Αντίθετα όμως κατά την κβαντική θεώρηση τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μπορούν να περάσουν λεπτά στρώματα μονωτικών υλικών ως κύματα De Broglie. Αυτή η δυνατότητα, που έχουν τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας να μπορούν να διαπεράσουν φράγματα δυναμικού τα οποία έχουν εισαχθεί από ένα λεπτό στρώμα μονωτικού υλικού, ονομάζεται φαινόμενο σήραγγος. Οι Sommerfeld και Bethe έκαναν πρώτοι μία θεωρητική προσέγγιση του θέματος για μερικά mV πτώσης τάσης στα ηλεκτρόδια. Αργότερα, ο R.Holm επεξέτεινε τη θεωρία αυτή για μεγαλύτερες τιμές της πτώσης τάσης από προηγούμενως. Η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το πάχος s του μονωτικού στρώματος μεταξύ δύο ηλεκτροδίων και από την τιμή του φράγματος δυναμικού που εισάγει το παραπάνω λεπτό μονωτικό στρώμα. Αυτά τα δύο μεγέθη δεν είναι ποτέ ακριβώς γνωστά και οι υπολογισμοί που έχουν γίνει έχουν γίνει με απλουστευτικές παραδοχές. Σημασία σε μία επαφή φαίνεται ότι έχει η πυκνότητα ρεύματος, που συνεπάγεται η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος σε αυτή.

Αν θεωρηθεί μία επαφή με επίπεδες επιφάνειες από το ίδιο μέταλλο και με απόσταση s μεταξύ των μερών της (λόγω των επικαθίσεων), τότε τα επίπεδα δυναμικού στην περιοχή της επαφής δίδονται στο σχήμα 1.9-1. Τα επίπεδα Fermi των δύο μεταλλικών μερών της επαφής (E_f) συμπίπτουν, όταν δεν υπάρχει διαφορά



Σχήμα 1.9-1: Το φράγμα δυναμικού σε ένα κενό s δύο επαφών από το ίδιο υλικό 1 και 2 τα δύο μέρη της επαφής:

(α) χωρίς την επιβολή διαφοράς δυναμικού

(β) με την επιβολή διαφοράς δυναμικού U

δυναμικού μεταξύ τους. Τα φράγματα δυναμικού στην επιφάνεια κάθε μέρους της επαφής επεκτείνονται στη μεταξύ τους απόσταση s και διαμορφώνουν το φράγμα δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Σε περίπτωση που η απόσταση s είναι αρκετά μεγάλη, η μέγιστη τιμή του ύψους του φράγματος δυναμικού φ_0 της επαφής ισούται με το έργο εξόδου Φ του μετάλλου (οι μονάδες μέτρησης των οποίων δίνονται συνήθως σε eV ή σε V). Όταν το πλάτος s είναι μικρό τότε τα

φράγματα δυναμικού στην επιφάνεια των δύο μεταλλικών μερών της επαφής αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε μικρότερες τιμές με αποτέλεσμα η μέγιστη τιμή του φράγματος δυναμικού της επαφής να γίνεται μικρότερη από το έργο εξόδου Φ ($\varphi_0 < \Phi$). Για ένα ηλεκτρόνιο μάζας m με ταχύτητα v_0 το οποίο πλησιάζει στο φράγμα δυναμικού του σχήματος 1.9-1α ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{1}{2}mv_x^2 = e\varphi_x \quad (1.9 - 1)$$

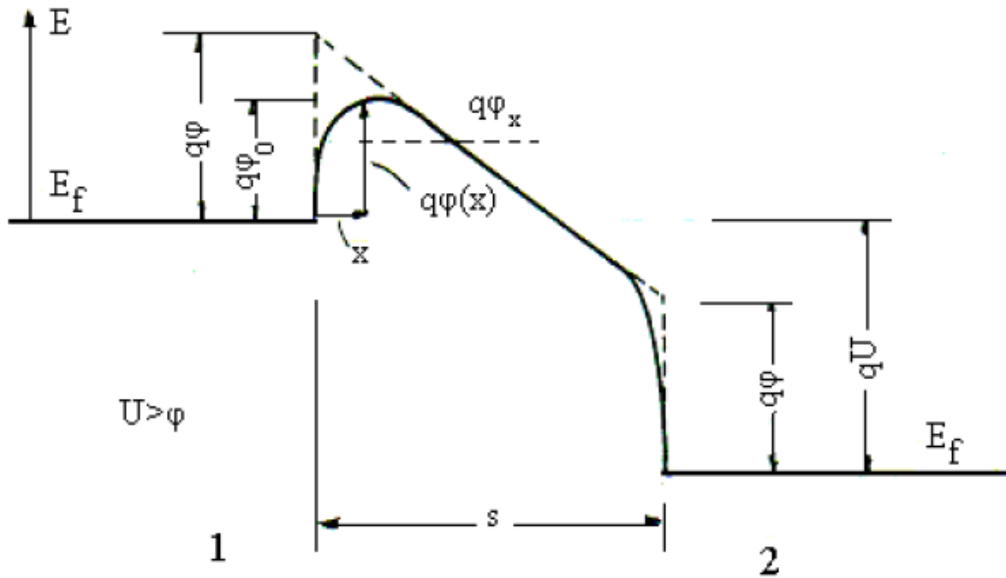
όπου φ_x το δυναμικό του ηλεκτρονίου και e το φορτίο του. Σε περίπτωση που $\varphi_x > \varphi_0$ τότε το ηλεκτρόνιο θα βρεθεί στο άλλο μέρος της επαφής, όπου και θα αποδώσει το περίσσειμα της ενέργειας τους υπό μορφή ακτινοβολίας. Αυτό είναι γνωστό ως θερμιονική εκπομπή. Εάν το $\varphi_x < \varphi_0$ τότε κατά την κλασική φυσική ανακλάται το ηλεκτρόνιο πάνω στο φράγμα. Σύμφωνα όμως με τη κβαντική θεωρία υπάρχει μία πιθανότητα το παραπάνω ηλεκτρόνιο να περάσει το φράγμα δυναμικού και να βρεθεί στο άλλο μέρος της επαφής. Αυτή η πιθανότητα εξαρτάται από ένα συντελεστή διάβασης $D(\varphi_x)$ για τον οποίο ισχύει η σχέση:

$$D(\varphi_x) = \exp \left[\frac{-4\pi}{h} \int_0^s \sqrt{2m[\varphi(x) - \varphi_x]} dx \right] \quad (1.9 - 2)$$

όπου h η σταθερά του Planck και $\varphi(x)$ η συνάρτηση του φράγματος δυναμικού της επαφής. Η παραπάνω σχέση βασίζεται στην κατά προσέγγιση λύση της εξίσωσης Schrödinger, όπως αυτή έγινε από τους Brillouin-Wentzel-Kramer.

Όταν το ηλεκτρόνιο διαπεράσει το φράγμα δυναμικού λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος, τότε δεν χάνει την ενέργειά του (όπως συμβαίνει στη θερμιονική εκπομπή), αλλά αυτή παραμένει αμετάβλητη γιατί η συχνότητα de Broglie είναι σταθερά. Η ενέργεια όμως, που πιθανώς του δόθηκε από το πεδίο αποδίδεται στην άνοδο. Κατά την εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος, που προαναφέρθηκε, τα ηλεκτρόνια περνάνε το φράγμα δυναμικού από δεξιά προς αριστερά τόσο συχνά όσο και προς την αντίθετη διεύθυνση με αποτέλεσμα να μην μπορεί να παρατηρηθεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Αν μεταξύ των δύο μερών του σχήματος 1.9-1α υπάρχει μία διαφορά δυναμικού U , τότε όπως φαίνονται στο σχήμα 1.9-1β οι στάθμες Fermi διαφοροποιούνται μεταξύ τους κατά U , με αποτέλεσμα μία ροή ηλεκτρικού ρεύματος από την επαφή με το υψηλό δυναμικό προς την επαφή με το χαμηλό δυναμικό. Αυτό συμβαίνει γιατί το ρεύμα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας, λόγω εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος, δεν είναι ίσο και κατά τις δύο διευθύνσεις με αποτέλεσμα η διαφορά του αριθμού των φορέων μεταξύ των δύο μερών της επαφής να μπορεί να μετρηθεί ως ηλεκτρικό ρεύμα. Από τις σχέσεις (1.9-1) και (1.9-2) φαίνεται ότι μόνο η ταχύτητα του ηλεκτρονίου v_x , που είναι κάθετη στο φράγμα δυναμικού, λαμβάνεται υπ' όψιν στους υπολογισμούς του συντελεστή διάβασης $D(\varphi_x)$ και επομένως και στον προσδιορισμό της πυκνότητας ρεύματος. Σε ένα καρτεσιανό σύστημα με συντεταγμένες x , y και z τα ηλεκτρόνια με υψηλές ταχύτητες v_y στη διεύθυνση y και v_z στη διεύθυνση z αλλά μικρή ταχύτητα v_x στη διεύθυνση x έχουν μικρή

πιθανότητα να διαπεράσουν το φράγμα δυναμικού, αν και έχουν υψηλή συνολική ενέργεια.



Σχήμα 1.9-2: Το φράγμα δυναμικού μεταξύ δύο όμοιων μεταλλικών ηλεκτροδίων που απέχουν μεταξύ τους κατά s για $U > \Phi$ (1 και 2: τα δύο μέρη της επαφής)

Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις εκδήλωσης του φαινομένου σήραγγος σε ένα σύστημα μέταλλο-μονωτή-μέταλλο (MIM) υπό την επίδραση συνεχούς τάσης:

- Η πρώτη περίπτωση αφορά πολύ μικρές τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης U σε σχέση με το μέγιστο ύψος του φράγματος δυναμικού $\phi_0 \gg U > 0$. Το φαινόμενο θεωρείται ότι είναι ωμικό.
- Στη δεύτερη περίπτωση η τιμή της εφαρμοζόμενης συνεχούς τάσης είναι μεγαλύτερη από προηγουμένως και ισχύει ότι $\phi_0 > U$. Η πυκνότητα του ρεύματος J αυξάνει μη γραμμικά σε σχέση με την τιμή της τάσης U .
- Η τρίτη περίπτωση (εκπομπή πεδίου) αφορά μεγαλύτερες τιμές της τάσης από προηγουμένως, υπό την προϋπόθεση ότι ισχύει $U > U_0$. Η πυκνότητα του ρεύματος J αυξάνει ραγδαία με την αύξηση της τάσης U στο σύστημα.

Στο σχήμα 1.9-2 φαίνονται οι ενεργειακές στάθμες που αφορούν την περίπτωση αυτή. Παρατηρούμε ότι το μέγιστο ύψος του φράγματος δυναμικού ϕ_0 είναι αρκετά μικρότερο από το έργο εξόδου Φ . Σε αυτή την περίπτωση τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μπορούν να μετακινούνται επάνω από το φράγμα δυναμικού.

Ως ειδική αντίσταση σήραγγος ρ_T (tunnel resistivity) του παραπάνω συστήματος των δύο ηλεκτροδίων έχει οριστεί το πηλίκο:

$$\rho_T = \frac{U}{J} \quad (1.9 - 3)$$

Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από το πάχος s , από το έργο εξόδου Φ του μετάλλου των ηλεκτροδίων και τη σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ , των επικαθίσεων. Η τιμή ρ_T εξαρτάται επίσης από τη μορφή που έχει το φράγμα δυναμικού. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ισχύει γενικά:

$$\rho_T = f(s, \Phi, U, \epsilon_r, \phi(x)) \quad (1.9 - 4)$$

1.10 Φυσική διερεύνηση των φαινομένων μεταφοράς στις επαφές

Οι φυσικές ερμηνείες που αφορούν τα προαναφερθέντα φαινόμενα σχετίζονται άμεσα με την μεταφορά των ηλεκτρικών φορέων μέσα από τις διάφορες περιοχές επαφής (A_c), οι οποίες διαπερνώνται από υψηλές πυκνότητες ρεύματος.

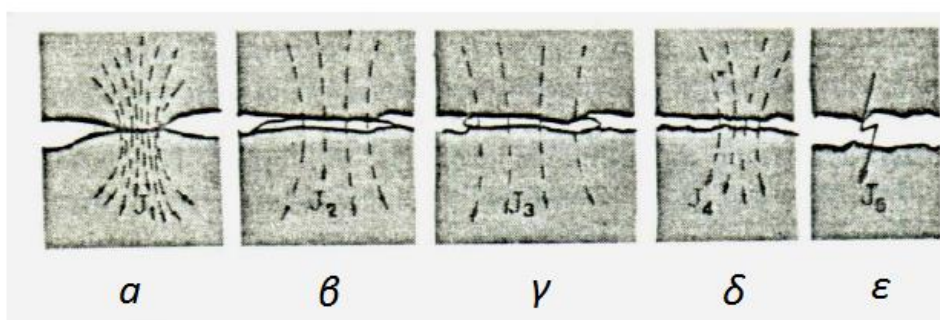
Τύπος Επαφής	Υλικό επαφών	Με θερμική καταπόνηση		Χωρίς θερμική καταπόνηση		Γραμμική παρεμβολή στις τιμές I^* , ΔU^*	
		I (A)	ΔU (mV)	I^* (A)	ΔU^* (mV)	I^* (A)	ΔU^* (mV)
Αποζεύκτης 500V/100A	Άργυρος	37	19	44	21	37	17,6
Αποζεύκτης 500V/100A	Χαλκός	26	13	36	16	26	11,5
Αποζεύκτης 20kV/200A	Χαλκός	48	21	52	22	48	20,3
Αποζεύκτης 20kV/100A	Ορείχαλκος	67	24	73	24	67	22,0

Πίνακας 1.10-1: Μετρήσεις σε επαφές εμπορίου που αφορούν προσδιορισμό τιμών ρεύματος και πτώσης τάσης πέραν των οποίων αναπτύσσεται μη γραμμική συμπεριφορά

Η παρατηρούμενη μείωση της οριακής (κατωφλικής) τιμής της τάσης, για την ανάπτυξη μη γραμμικών φαινομένων στον πίνακα 1.10-1, πριν και μετά τη γήρανση των επαφών φαινομενικά δεν θα μπορούσε να αποδοθεί σε τρόπους ηλεκτρονικής αγωγιμότητας διαμέσου λεπτών στρωμάτων οξειδίων, και γενικά επικαθίσεων. Αυτό γιατί μετά την γήρανση των επαφών το πάχος του οξειδίου αποκτά μεγαλύτερο εύρος και συνεπώς χρειάζεται μεγαλύτερη πεδιακή ένταση προκειμένου να υπάρξει ανάλογη πυκνότητα ρεύματος. Για να γίνει όμως μία λεπτομερής περιγραφή προκειμένου να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα, απαιτούνται όμοιες εντάσεις ρεύματος και για τις δύο περιπτώσεις (πριν και μετά την γήρανση). Για μία δομή Μέταλλο - Μονωτής - Μέταλλο (MIM) η παραπάνω διαπίστωση συμφωνεί με την αναλυτική έκφραση για την ένταση ρεύματος (φαινομένου σήραγγος) η οποία είναι μη γραμμική συνάρτηση αμφοτέρων των μεταβλητών, δηλαδή και της πυκνότητας ρεύματος και του επιβαλλομένου δυναμικού ΔU .

Με βασική αιτία την ανομοιομορφία στην επιφάνεια των επαφών (η οποία μπορεί να είναι μορφολογικής ή ηλεκτροχημικής φύσεως) το πεδίο μεταξύ των επαφών ενδέχεται να παρουσιάζει ανομοιογένειες. Έχει διαπιστωθεί ότι ένα μικρό μέρος της φαινομένης επιφάνειας της επαφής A_a άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Οι γραμμές ροής του ηλεκτρικού ρεύματος υποχρεώνονται να διέλθουν πολύ κοντά η μία στην άλλη ώστε να περάσουν από τις μικρές αγωγίμες περιοχές (οι οποίες απαρτίζουν την επιφάνεια A_c) οι οποίες είναι στατιστικά κατανεμημένες στην

επιφάνεια A_a και οι οποίες συχνά καλύπτονται από στρώμα επικαθίσεων. Το ηλεκτρικό πεδίο ποικίλλει στην περιοχή της επαφής αφού και οι δύο επιφάνειες διαπερνώνται επιλεκτικά από υψηλή πυκνότητα ρεύματος και σύμφωνα με τον νόμο του Ohm θα πρέπει να υπάρχει επιφανειακή πτώση τάσης μεταξύ των σημείων διάβασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Συνεπώς, η διαχωριστική επιφάνεια των δύο μεταλλικών μερών παύει να είναι ισοδυναμική. Εκτός τούτου, η παρουσία ακινήτων φορτίων ανά την επαφή (όπως σταθερά, παγιδευμένα και φορτία ιόντων) εισάγουν κατοπτρικά ηλεκτρικά φορτία τα οποία κατανέμονται σε βάθος Thomas Fermi από την επιφάνεια. Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτουν μεταβολές δυναμικού στην επιφάνεια επαφής ακόμα και όταν δεν εφαρμοστεί εξωτερική τάση, ένα φαινόμενο παρόμοιο με αυτό της εξάντλησης – αναστροφής (*depletion – inversion*) των ημιαγωγικών επιφανειών.



Σχήμα 1.10-2: Μακροσκοπική απεικόνιση δύο μεταλλικών ηλεκτρικών επαφών.

Παρατηρούνται οι ακόλουθες μικροδομές:

α) Ιδεατή επαφή μέταλλο – μέταλλο (M – M)

β) Μικροδομή μέταλλο – μονωτής – μέταλλο (MIM)

γ) Μικροδομή μέταλλο – οξειδίο – μέταλλο (MOM)

δ&ε) Μέταλλο – περιβάλλον υγρό ή αέριο μονωτικό – μέταλλο (MGM)

Οι περιοχές αυτές μπορούν να γίνουν αγώγιμες πέραν μίας κρίσιμης τιμής του τοπικού ηλεκτρικού πεδίου.

J_1, J_2, J_3, J_4, J_5 : οι αντίστοιχες πυκνότητες ηλεκτρικού ρεύματος

Το σχήμα 1.10-2 παρουσιάζει μακροσκοπικά τα δύο μέρη μίας επαφής. Οι περιοχές M – M οι οποίες εφάπτονται ιδανικά χωρίς την παρεμβολή άλλου μέσου (α) είναι διανεμημένες τυχαία ανάμεσα σε περιοχές οι οποίες άγουν δια του φαινομένου σήραγγος (β) και (γ). Οι περιοχές (β) και (γ) ορίζονται από την στατιστική κατανομή της ανάπτυξης οξειδίων του μετάλλου στην περιοχή της επαφής και συμπεριφέρονται σαν λεπτά υμένα υλικών τα οποία πρέπει να τα διαπεράσουν τα ηλεκτρόνια προκειμένου να μεταφερθούν μέσα από την επαφή.

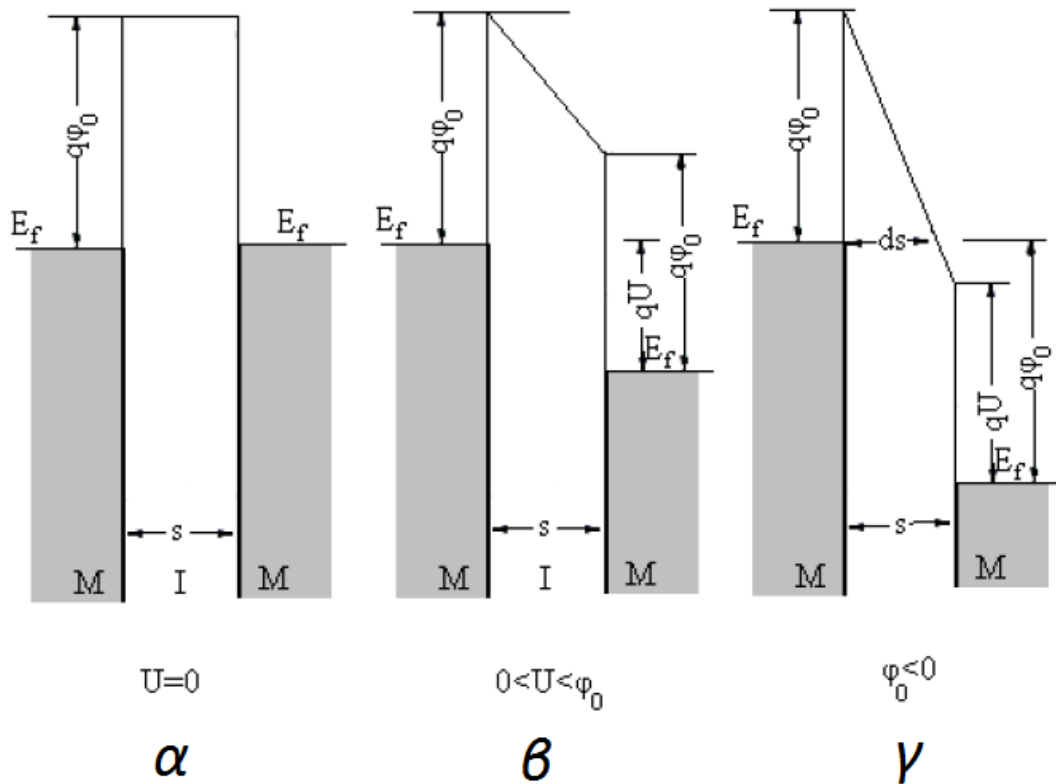
Οι περιοχές που άγουν δια του φαινομένου σήραγγος και έχουν πάχος της τάξης των 50\AA ή και λιγότερο, αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως μικροδομές μέταλλο -οξειδίο - μέταλλο (MOM) ή μέταλλο - μονωτής - μέταλλο (MIM). Έχει παρατηρηθεί ότι οι επαφές των μετάλλων καλύπτονται αμέσως από λεπτό στρώμα οξειδίου (ή άλλων χημικών ενώσεων) πάχους $10 \div 50\text{\AA}$ μόλις έρθουν σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Όταν το πάχος του οξειδίου είναι μικρότερο από τα 50\AA το φαινόμενο σήραγγος λαμβάνει χώρα ακόμα και για φαινομενικά μικρές τιμές

πτώσης τάσης (εντός των προδιαγραφών, δηλαδή $< 55mV$) αφού το ηλεκτρικό πεδίο στις μικροδομές μπορεί να φτάσει μέχρι $1MV/cm$. Αυτή η υψηλή τιμή πεδίου αναμένεται να αναπτύσσεται στις προαναφερθείσες μικροδομές των επαφών αφού σε πειραματικά αποτελέσματα κατά τη βιβλιογραφία παρατηρήθηκε ότι η πτώση τάσης κατά μήκος των επαφών ήταν της τάξης των $50mV$. Αυτή η πτώση τάσης δημιουργεί πεδία της τάξης των $0,1MV/cm$ έως $0,5MV/cm$ ή και περισσότερο (ανάλογα με το πάχος των επικαθίσεων) τα οποία έχουν την δυνατότητα να δημιουργήσουν ακόμη και συνθήκες εκπομπής πεδίου για τη μεταφορά των φορέων μεταξύ των συνδέσμων. Οι διάφορες θέσεις στην επαφή οι οποίες εγχέουν τα φορτία είναι τυχαία κατανομημένες μέσα στην φαινόμενη περιοχή επαφής και ενεργοποιούνται μόλις το τοπικό πεδίο αναπτυχθεί σε τιμές $0,1MV/cm$ περίπου. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι αν και η κλασική θεωρία εκπομπής πεδίου, όπως προτάθηκε από τους Fowler και Nordheim, προβλέπει πεδία της τάξεως των $40MV/cm$, στην πράξη τα απαιτούμενα εφαρμοζόμενα πεδία είναι σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία κατά πολύ μικρότερα. Αυτό έχει αποδοθεί σε ανομοιογένειες του πεδίου στην επιφάνεια των υλικών και την ύπαρξη παγιδευμένων φορτίων τα οποία δημιουργούν τοπικές συνθήκες επαύξησης του πεδίου.

Καθώς η ροή του ρεύματος διαμέσου των επαφών αυξάνει, τα φαινόμενα της επιφανειακής σκέδασης αρχίζουν να κυριαρχούν μόλις η διάβαση του φορτίου διαμέσου των ωμικών κέντρων (spots) φτάσει στον κορεσμό. Τότε η διαφορά δυναμικού κατά μήκος των μικροδομών MIM, MOM και MGM αυξάνει ραγδαία. Για μεγαλύτερες τιμές από μία κρίσιμη τιμή πεδίου, περιοχές της επαφής οι οποίες έχουν ένα σημαντικό πάχος επικαθίσεων μπορούν και αυτές να άγουν. Επίσης περιοχές της επαφής οι οποίες δεν έχουν επικαθίσεις αλλά χωρίζονται από διάκενο (στο οποίο έχει εισχωρήσει το υγρό ή αέριο μονωτικό μέσο που περιβάλλει την επαφή όπως αέρας, λάδι, SF_6 , κλπ) όπως φαίνεται στο σχήμα 1.10-2 (δ) και (ε) μπορούν επίσης να καταστούν αγώγιμες μόλις το πεδίο στα σημεία αυτά γίνει ικανό να εγχέει ηλεκτρόνια (εκπομπή πεδίου). Ιδεατά αυτές οι περιοχές θα έπρεπε να γίνουν ενεργές για τιμές της έντασης ρεύματος πέρα από το ονομαστικό ρεύμα της κάθε επαφής. Τον κύριο παράγοντα αποτελεί το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια αυτά (της εκπομπής πεδίου) αποδίδουν την επιπλέον ενέργεια τους μόλις προσκρούσουν στο θετικό ηλεκτρόδιο σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα ($10^{-12}sec$ τυπικά). Τέτοια φαινόμενα αυξάνουν έντονα τη θερμοκρασία των επαφών, ιονίζουν το διάκενο και αυξάνουν δραστικά την αγωγιμότητα, οδηγώντας στην ανεπιθύμητη δημιουργία τόξων.

Τα ηλεκτρόνια του φαινομένου σήραγγος μόλις μεταφερθούν στο άλλο μέρος του λυόμενου συνδέσμου αποδίδουν επιφανειακούς ρυθμούς ενεργειακών ταλαντώσεων που χαρακτηρίζονται από μη συγκεκριμένα ενεργειακά όρια (*Surface plasmon polaritons*). Οι ρυθμοί αυτοί με την παρουσία της επιφανειακής τραχύτητας μπορούν να μετατραπούν σε φωτόνιο. Η ενέργεια των φωτονίων εξαρτάται από την ενέργεια των ενεργειακών ταλαντώσεων που τα δημιούργησαν. Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποκτηθεί από ένα ηλεκτρόνιο που διαπερνά το φράγμα δυναμικού στο φαινόμενο σήραγγος ισοδυναμεί με το φορτίο του ηλεκτρονίου επί την διαφορά δυναμικού κατά μήκος του φράγματος (δηλαδή την

τοπική πτώση τάσης μεταξύ των δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων). Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία, η πτώση τάσης στις μικροδομές που άγουν, έχει την ίδια τιμή με την συνολική πτώση τάσης κατά μήκος των επαφών όταν παρατηρούνται τα μη γραμμικά φαινόμενα. Κατά την διάρκεια λειτουργίας της επαφής τα παραγόμενα φωτόνια έχουν μέση ενέργεια η οποία αντιστοιχεί στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αυτό συνεπάγεται φαινόμενα αυτοθέρμανσης (*self heating*) κατά την λειτουργία των επαφών. Πτώση τάσης μεγαλύτερη από αυτή που προαναφέρθηκε (σε περιπτώσεις λειτουργίας της επαφής εκτός των προδιαγραφών) συνεπάγεται κατά τη βιβλιογραφία εκπομπή ακτινοβολίας που επεκτείνεται μέχρι τις υπεριώδεις ακτίνες. Γενικά κάθε απόκλιση από τη γραμμικότητα έχει αποδοθεί στην επαύξηση του πεδίου και στην παράλληλη παρουσία των μικροδομών MIM, MOM και MGM οι οποίες μπορούν να καταστούν αγώγιμες πέραν της κατωφλικής πεδιακής τιμής, διαμορφώνοντας την ενεργό διατομή της επαφής, A_c , ανάλογα με την τοπική πεδιακή ένταση. Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζονται και φαινόμενα διαφοράς φάσεως τα οποία οφείλονται στην χωρητική φύση των μικροδομών που ενεργοποιήθηκαν.



Σχήμα 1.10-3: Διάγραμμα δυναμικής ενέργειας των ηλεκτρονίων για συμμετρική δομή MIM και για διαφορετικές τιμές δυναμικού στα ηλεκτρόδια
 α) : Η διαφορά δυναμικού είναι μηδενική. Η επαφή δεν άγει.
 β) : Δεν έχει επιτευχθεί η αναγκαία διαφορά δυναμικού για την εκδήλωση του φαινομένου. Τυχόν ροή ρεύματος οφείλεται σε θερμιονική εκπομπή πάνω από το φράγμα δυναμικού.
 γ) : Η επαφή άγει δια του φαινομένου της σήραγγος, διότι το πάχος s έχει μειωθεί σε ds .

Ειδικότερα η συμπεριφορά μίας μικροδομής MIM η οποία άγει πέρα από ένα κατώφλι εφαρμοζόμενου πεδίου, μπορεί να γίνει κατανοητή με την μελέτη του

ενεργειακού διαγράμματος των επαπτόμενων περιοχών κατά τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Συμμετρική μικροδομή MIM κάτω από μηδενική διαφορά δυναμικού (Σχήμα 1.10-3α). Το σύστημα δεν άγει λόγω του μεγάλου πάχους (Σχήμα 1.10-3β).
- Εφαρμογή μέτριας τιμής πεδίου. Το σύστημα δεν άγει ακόμα λόγω του μεγάλου πάχους (Σχήμα 1.10-3β).
- Εφαρμογή υψηλού ηλεκτρικού πεδίου. Η μονωτική ικανότητα (πάχος) μεταξύ των ηλεκτροδίων έχει μειωθεί και η μικροδομή άγει (Σχήμα 1.10-3γ).

1.11 Οι αγωγοί του δικτύου Διανομής

Οι αγωγοί πρέπει να αντέχουν στη μηχανική και στη θερμική καταπόνηση και στην περίπτωση της μέσης τάσης να μην προκαλούν απώλειες Κορώνα (δηλαδή ηλεκτρική διάσπαση του αέρα περί τον αγωγό). Σαν αγωγοί χρησιμοποιούνται πολύκλιωνα συρματόσχοινα, για λόγους ευκαμψίας. Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται είναι χωρίς μόνωση και κατασκευάζονται από χαλκό (Cu), αλουμίνιο (Al) ή αλουμίνιο-χάλυβα (ACSR). Σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται αγωγοί από άλλα υλικά και κράματα (π.χ. από γαλβανισμένο χάλυβα, φωσφορούχο ορείχαλκο κλπ.). Στη χαμηλή τάση εκσυγχρονίζονται πλέον τα δίκτυα μέσω συνεστραμμένων καλωδίων.

Οι αγωγοί κατασκευάζονται μονόκλωνοι ή πολύκλωνοι. Στα εναέρια δίκτυα δεν χρησιμοποιούνται μονόκλωνοι αγωγοί, γιατί έχουν πολύ μικρότερη μηχανική αντοχή από τους πολύκλωνους. Επίσης οι μονόκλωνοι είναι δύσκαμπτοι και η διατομή τους είναι μέχρι 16 mm^2 . Οι αγωγοί χαλκού και αλουμινίου αποτελούνται από κλώνους της ίδιας διατομής ανά διατομή αγωγού και παίρνουν τη μορφή των συρματόσχοινων. Οι αριθμοί των κλώνων είναι κυρίως 7, 19, 37, 61 κλπ.

1.11.1 Αγωγοί από Χαλκό

Ο χαλκός έχει μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα και καλή μηχανική αντοχή. Η αγωγιμότητα του μειώνεται όταν έχει ξένες προσμίξεις. Επίσης μειώνεται λίγο η αγωγιμότητά του όταν κατεργαστεί εν ψυχρώ. Αυτό όμως του δίνει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή. Ένα άλλο πλεονέκτημά του είναι ότι δεν διαβρώνεται εύκολα και γι' αυτό ενδείκνυται η χρησιμοποίησή του σε δίκτυα που είναι κοντά στη θάλασσα. Σήμερα, επειδή το αλουμίνιο έχει μικρότερο κόστος αντικαθιστά το χαλκό κυρίως στους αγωγούς των εναέριων δικτύων.

1.11.2 Αγωγοί από Αλουμίνιο

Το αλουμίνιο είναι τρεις φορές ελαφρύτερο από τον χαλκό και έχει και μικρότερο κόστος, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω. Μειονεκτεί όμως στο γεγονός ότι έχει το 60% περίπου της αγωγιμότητας του χαλκού, καθώς και μόνο το 50% της μηχανικής αντοχής του.

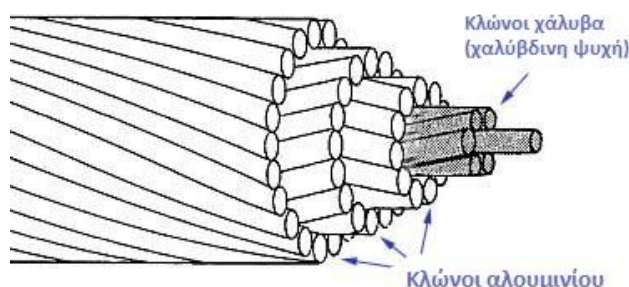
Έτσι ένας αγωγός αλουμινίου με ισοδύναμη διατομή με αγωγό από χαλκό έχει το μισό του βάρους και διάμετρο μεγαλύτερη κατά 1,6 φορές (60% μεγαλύτερη). Τα παραπάνω δείχνουν ότι ο αγωγός από αλουμίνιο δέχεται μεγαλύτερες επιφορτίσεις από τον άνεμο και τον πάγο λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειάς του.

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

αέρα, σε βάθος μέχρι 3 mm. Οι αγωγοί αλουμινίου χρησιμοποιούνται κυρίως στις γραμμές χαμηλής τάσης και μακριά από τη θάλασσα. Στις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης δεν χρησιμοποιούνται γιατί έχουν μικρή μηχανική αντοχή (οι πυλώνες απέχουν πολύ μεταξύ τους και οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις στους αγωγούς είναι πολύ μεγάλες).

1.11.3 Αγωγοί από Αλουμίνιο - Χάλυβα (ACSR)

Το μειονέκτημα των αγωγών αλουμινίου αντιμετωπίζεται με επιτυχία με τους αγωγούς ACSR (Aluminum conductor steel-reinforced cable). Αυτοί έχουν ψυχή από κλώνους με γαλβανισμένο χάλυβα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.11.3-1. Ο χάλυβας αναλαμβάνει τη μηχανική αντοχή και το αλουμίνιο την ηλεκτροδότηση. Το ρεύμα οδεύει κυρίως μέσα από το αλουμίνιο, δηλαδή το ρεύμα μέσα από το χάλυβα είναι αμελητέο.



Σχήμα 1.11.3-1 Αγωγός ACSR

Οι αγωγοί ACSR έχουν περίπου 50% μεγαλύτερη αντοχή από τους αγωγούς χαλκού και είναι 20% ελαφρύτεροι για ισοδύναμη διατομή με το χαλκό. Χρησιμοποιούνται στις γραμμές υψηλής τάσης και μέσης τάσης γιατί μπορεί να γίνει μεγαλύτερο άνοιγμα μεταξύ των θέσεων στήριξης (πυλώνων ή στηλών).

Οι αγωγοί ACSR χαρακτηρίζονται κατά DIN ως εξής: Al/St = διατομή του Al/ διατομή του St. (π.χ. Al/St 185/32 σημαίνει αγωγός με 185 mm^2 Al και 32 mm^2 St). Σε σύνθετους αγωγούς η σχέση διατομών Al/St είναι συνήθως ίση με 6, ενώ σε μεγάλες διατομές μπορεί να φτάσει και το 20. Οι πολύκλωνοι ACSR αγωγοί αποτελούνται από 1 έως 3 στρώματα χαλύβδινων συρμάτων και 1 έως 3 στρώματα συρμάτων αλουμινίου. Τα σύρματα είναι συνεστραμμένα και μάλιστα η διεύθυνση συστρώσεως είναι αντίθετη σε δύο γειτονικά στρώματα, πράγμα που εξασφαλίζει μία καλή συνοχή του συρματόσχοινου.

1.12 Σύνδεσμοι ισχύος

1.12.1 Αποδόμηση συνδέσμων και κριτήρια επιλογής τους

Η σταθερά αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας σε πυκνά κατοικημένες περιοχές επιβάλλει δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας για τα συστήματα μεταφοράς και διανομής τα οποία πρέπει να μεταφέρουν μεγαλύτερο φορτίο απ' ό,τι στο παρελθόν και να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Παρά τη λήψη διαφόρων ανασταλτικών μέτρων συντήρησης, υπάρχουν ακόμα αρκετά προβλήματα που μπορούν να επηρεάσουν την αξιοπιστία του συστήματος. Ο σύνδεσμος είναι γενικά ένας αδύναμος κρίκος στα ΣΗΕ, που εγείρει σοβαρές απορίες για την ικανότητα κάποιων εκ των σχεδίων των συνδέσμων να παρέχουν μακροπρόθεσμες αποτελεσματικές συνδέσεις. Αυτό, και οι κακές πρακτικές εγκατάστασης, είναι ίσως οι πιο συχνές πηγές βλάβης για τη συνολική απόδοση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Πειραματικές αποδείξεις και διάφορες αναφορές προβλημάτων λειτουργίας συνιστούν ότι οι αξιόπιστοι σύνδεσμοι ισχύος δεν λαμβάνονται βάσει της συνήθους εφαρμογής των καθιερωμένων πρακτικών και μεθόδων. Επιπλέον, οι ρυθμοί αποδόμησης των συνδέσμων ισχύος που βρίσκονται εν λειτουργία δεν μπορούν να εκτιμηθούν με ακρίβεια, κάτι που κάνει τον προγραμματισμό της συντήρησης δύσκολο.

Οι αρνητικές συνέπειες της κατάστασης αυτής αντικατοπτρίζονται στις προδιαγραφές των υλικών για ηλεκτρικές συνδέσεις, τη χρήση και τη συντήρησή τους, καθώς και τη γενική αξιοπιστία του συνόλου του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

1.12.2 Τύποι συνδέσμων ισχύος

Η ταξινόμηση των συνδέσμων ισχύος μπορεί να γίνει σύμφωνα με την ικανότητα μεταφοράς ρεύματος, και τη χρηστική τους λειτουργία. Στην πρώτη περίπτωση οι σύνδεσμοι μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες: Συνδέσμους ελαφρού, μέσου και βαρέως τύπου:

1. Οι σύνδεσμοι ελαφρού τύπου είναι επαφές που φέρουν πολύ μικρά ρεύματα (κάτω από 5 A), λειτουργούν σε τάσεις μέχρι 250 V και δεν εμφανίζουν καμία αξιόλογη ηλεκτρική φθορά από ηλεκτρικό τόξο. Η σωστή λειτουργία αυτών των συνδέσμων βασίζεται κυρίως στη διατήρηση σχετικά χαμηλής και σταθερής αντίστασης επαφής και στην επιλογή των υλικών της επαφής. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τους συνδέσμους που προορίζονται για έλεγχο οργάνων, αυτοκίνηση, γενικούς αυτοματισμούς, ράδιο και επικοινωνίες και τηλεπικοινωνιακά συστήματα.
2. Σύνδεσμοι μέσου τύπου είναι αυτοί που φέρουν αισθητά υψηλότερα ρεύματα (άνω των 5 A) και λειτουργούν σε τάσεις μέχρι 1000 V. Γι' αυτή την κατηγορία συνδέσμων η ηλεκτρική φθορά είναι πρωτεύουσας σημασίας. Τα κριτήρια που διέπουν την επιλογή των υλικών της επαφής έτσι ώστε αυτή να ανταποκρίνεται στις δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας είναι η τάση για συγκόλληση, η εύκολη μεταφορά υλικού και η διάβρωση. Οι εφαρμογές αυτής της ομάδας συνδέσμων είναι βιομηχανικές και κυρίως εφαρμογές δικτύου διανομής ενέργειας.
3. Οι σύνδεσμοι βαρέως τύπου φέρουν πολύ υψηλά ρεύματα (τάξης δεκάδων kA) και λειτουργούν σε πολύ υψηλές τάσεις (τάξης των εκατοντάδων kV). Η πιο κοινή χρήση αυτών των συνδέσμων είναι τα συστήματα διανομής και οι συνδέσεις συστημάτων μεταγωγής και προστασίας, όπως διακόπτες.

1.13 Οι διατάξεις μέτρησης και αξιολόγησης των στατικών ηλεκτρικών επαφών

Η αξιοπιστία των στατικών ηλεκτρικών επαφών βασίζεται σε δοκιμές ποιοτικού ελέγχου, ανάλογα με το ονομαστικό τους ρεύμα. Το προαναφερθέν μέγεθος είναι τυποποιημένο και αντικατοπτρίζει τη δοκιμή ανύψωσης της θερμοκρασίας (ή δοκιμή υπερθέρμανσης).

1.13.1 Η δοκιμή υπερθέρμανσης

Η δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας) αφορά την εξακρίβωση του ονομαστικού ρεύματος (μέγιστο ρεύμα συνεχούς λειτουργίας) μίας κατασκευής μέχρι τα προγραμματισμένα όρια συντήρησης. Η τιμή αυτή δεν μπορεί να είναι τυχαία, γιατί πρέπει να ανταποκρίνεται σε προδιαγεγραμμένες τιμές ρεύματος (π.χ.: 10A, 200A, 400A κ.λ.π.). Η δοκιμή διαρκεί συνήθως αρκετές ώρες. Στους μετασχηματιστές π.χ. ελαίου του δικτύου διανομής είναι της τάξης των 24 ωρών και θεωρείται ότι είναι επιτυχής, όταν η θερμοκρασία δεν υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο κατά τις προδιαγραφές όριο (για χαλκό εντός μονωτικού ελαίου η μέγιστη θερμοκρασία είναι κατά VDE 0670 80°C και η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας, ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, 40°C).

Η εξακρίβωση της ικανότητας σε ονομαστικό ρεύμα ενός αγωγού βασίζεται κυρίως, κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης, στη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$ ως προς το περιβάλλον, που αναπτύσσεται σε αυτόν. Η τιμή $\Delta\theta$ θεωρείται ότι έχει σταθεροποιηθεί όταν μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων, που απέχουν μεταξύ τους μία ώρα, η αύξηση της τιμής είναι μικρότερη από 1°C. Η τιμή του ρεύματος, κατά την οποία επιτυγχάνεται η ανωτέρω σταθεροποίηση της θερμοκρασίας, ονομάζεται ονομαστικό ρεύμα I_N της επαφής.

1.13.1.1 Ονομαστικό ρεύμα αγωγών μέσης τάσης

Η διερεύνηση του ονομαστικού ρεύματος των ηλεκτρικών αγωγών μέσης τάσης μέσω της δοκιμής υπερθέρμανσης οφείλει να σχετίζεται άμεσα με την ικανότητα ανταπόκρισης των αγωγών αυτών στις αντιξοότερες των συνθηκών που θα μπορούσαν να εμφανιστούν στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ανάλογα με το είδος του εξοπλισμού διαμορφώνονται οι προδιαγραφές μέτρησης του ονομαστικού ρεύματος μέσω της δοκιμής αυτής. Ανατρέχοντας λοιπόν στις οδηγίες της ΔΕΗ (**Οδηγία διανομής 26**) όσον αφορά τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης, αναφέρονται τα παρακάτω:

- ❖ Οι μέγιστες επιτρεπόμενες φορτίσεις σε συνθήκες συνεχούς λειτουργίας των γυμνών αγωγών των εναερίων δικτύων μέσης τάσης, ώστε να μην προκαλείται μείωση της μηχανικής τους αντοχής, δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Αγωγοί Cu		Αγωγοί ACSR		
Ονομαστική διατομή (mm ²)	Μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση (A)	Ισοδύναμη διατομή χαλκού (mm ²)	Πραγματική διατομή Al/St (mm ²)	Μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση (A)
16	115	16	25/4	136
35	185	35	56/9	224
95	352	95	150/25	448

Οι τιμές του πίνακα έχουν προκύψει με τις εξής παραδοχές:

- Θερμοκρασία αέρα : **40 °C**
- Μέγιστη θερμοκρασία αγωγού για Cu : 70 °C
- Μέγιστη θερμοκρασία αγωγού για ACSR : **80 °C**
- Ταχύτητα αέρα : 0,6 m/sec

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι για τους αγωγούς ACSR το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας εμφανίζεται για $\Delta\theta = 80 - 40 = 40$ °C. Για οποιαδήποτε μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας, θα ετίθετο σε κίνδυνο η ηλεκτρική και μηχανική αντοχή των αγωγών (σε περίπτωση υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος). Με βάση αυτή την παραδοχή μπορεί να διερευνηθεί το ονομαστικό ρεύμα των αγωγών μέσης τάσης μέσω της δοκιμής υπερθέρμανσης για $\Delta\theta = 40$ °C.

1.13.2 Διηλεκτρικές δοκιμές διακοπών

Οι διηλεκτρικές δοκιμές στοχεύουν στην εξακρίβωση της ικανότητας μόνωσης. Η ονομαστική τάση (ή τάση σειράς) κάθε κατασκευής δεν μπορεί να είναι μία τυχαία τιμή, γιατί πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγεγραμμένη διαβάθμιση των τάσεων, που είναι π.χ.: 0,4 kV, 6,6 kV, 15 kV, 20 kV, 150 kV, κ.λ.π. Συνήθως γίνεται αναφορά, εκτός από την ονομαστική τάση (ή τάση σειράς), στη

στάθμη μόνωσης της κατασκευής (μέγιστη τάση λειτουργίας), που είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση (π.χ.: για ονομαστική τάση 20 kV η στάθμη μόνωσης είναι 24 kV). Οι μετρήσεις, που γίνονται για τον έλεγχο της ικανότητας μόνωσης, αφορούν κυρίως τις μέγιστες λειτουργικές καταστάσεις της κατασκευής (κυρίως υπερτάσεις από κεραυνούς και χειρισμούς), από τις οποίες επιβεβαιώνεται η στάθμη μόνωσης.

1.13.3 Δοκιμή μηχανικής αντοχής

Η δοκιμή μηχανικής αντοχής αφορά βασικά την ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα των στατικών επαφών μετά από ένα μεγάλο αριθμό χειρισμών, ενώ παράλληλα ελέγχεται η στιβαρότητα της κατασκευής (ενδεχομένως παραμορφώσεις των επαφών ή τυχόν αποσυναρμολογήσεις ή ακατάλληλα ελατήρια κλπ). Ένας αποζεύκτης π.χ. 20 kV/400 A θα πρέπει να έχει μετά από 1000 πλήρεις κύκλους χειρισμών την ίδια ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα (400 A). Μετά το πέρας δηλαδή της δοκιμής αυτής, θα πρέπει να γίνει η δοκιμή υπερθέρμανσης.

1.13.4 Δοκιμή υπό τριπολικό βραχυκύκλωμα

Με τη δοκιμή σε τριπολικό βραχυκύκλωμα ελέγχεται η καταπόνηση μίας κατασκευής από τις μεγάλες δυνάμεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά το βραχυκύκλωμα. Η δοκιμή διαρκεί ένα δευτερόλεπτο, αρκετό δηλαδή χρόνο, ως προς εκείνον ενεργοποίησης των μέσων προστασίας του δικτύου. Κατά τη δοκιμή μετρώνται οι συνιστώσες του ρεύματος βραχυκύκλωσης, ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ βραχυκύκλωσης, που καθορίζεται από τη θέση της κατασκευής στο δίκτυο. Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής όταν, μετά το πέρας της, δεν έχουν αναιρεθεί η στάθμη μόνωσης και η ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα (δηλαδή, στη συνέχεια πραγματοποιούνται στο συγκεκριμένο δοκίμιο οι διηλεκτρικές δοκιμές και η δοκιμή υπερθέρμανσης).

2. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του ονομαστικού ρεύματος στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων μέσης τάσης, μέσω της μελέτης της θερμικής συμπεριφοράς τους υπό καταπόνηση με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Βασική αιτία για την έρευνα αυτή, είναι η έλλειψη ονομαστικών τιμών για το ρεύμα αυτών των συνδέσμων, καθώς και σαφών προδιαγραφών στους κανονισμούς του δημόσιου φορέα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι σύνδεσμοι αυτοί είναι μεγάλης σημασίας καθώς χρησιμοποιούνται σε όλες τις συνδέσεις μεταξύ των αγωγών του δικτύου διανομής καθώς και στους υποσταθμούς. Ο καθορισμός του ονομαστικού ρεύματος στους συνδέσμους αυτούς θα διασφαλίσει την απρόσκοπτη και χωρίς απώλειες λειτουργία τους.

Απώτερος σκοπός είναι μέσω της παρατήρησης των τιμών της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του συνδέσμου, να εντοπιστεί το ονομαστικό ρεύμα των συνδέσμων αυτών, βάσει του ορισμού του ονομαστικού ρεύματος όπως αυτός περιγράφεται στη δοκιμή υπερθέρμανσης.

Μέσω της εργασίας αυτής και των μετρήσεων που λαμβάνονται, αναμένεται η εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά το κατά πόσον οι σύνδεσμοι που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα μέσης τάσης είναι επαρκείς ως προς την αντοχή τους σε διάφορα πλάτη ρευμάτων. Επίσης εξετάζεται το κατά πόσον οι υπό μέτρηση σύνδεσμοι (ως αντιπροσωπευτικό δείγμα του συνόλου των επαφών που χρησιμοποιείται στο δίκτυο μέσης τάσης) έχουν συγκεκριμένα ονομαστικά μεγέθη και αναζητούνται τυχόν αποκλίσεις μεταξύ ίδιων συνδέσμων.

Τέλος, οι μετρήσεις αυτές μπορούν να αποτελέσουν αφετηρία μίας πιο εκτεταμένης έρευνας που θα προσδοκά στον ακριβή καθορισμό του ονομαστικού ρεύματος όλων των στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων.

3. Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

3.1. Πειραματική διάταξη

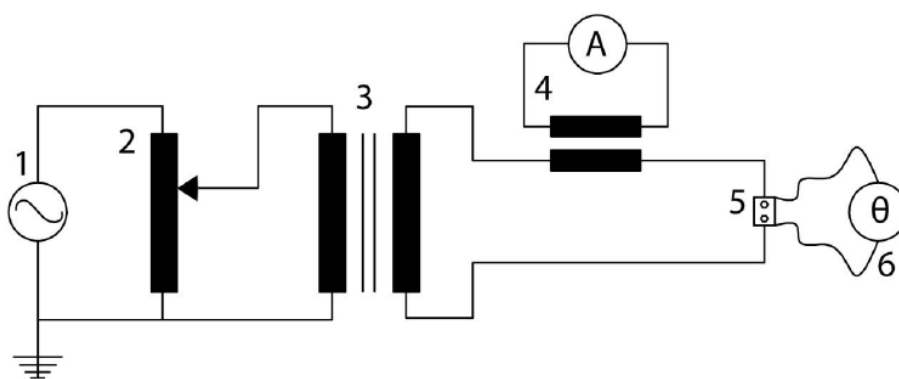
Όπως έχει αναφερθεί, σκοπός των μετρήσεων είναι η εξακρίβωση του ονομαστικού ρεύματος μέσω της δοκιμής της υπερθέρμανσης σε τρεις συνδέσμους μέσης τάσης οι οποίοι θα είναι αντιπροσωπευτικά δείγματα των συνδέσμων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο.

Για το λόγο αυτό ως δοκίμια επιλέχθηκαν :

- 1) Ένας σύνδεσμος, ο οποίος συνδέει δύο αγωγούς ASCR με διατομή από 35 μέχρι 70 mm² και από 16 έως 50 mm² αντίστοιχα.
- 2) Ένας σύνδεσμος, που συνδέει έναν αγωγό ASCR με μία αγωγίμη πλάκα
- 3) Ένας σύνδεσμος που μπορεί να συνδέσει έναν αγωγό ASCR με διατομή από 35 έως 70 mm² με έναν ASCR 95 mm²

Η διατομή και ο τύπος των αγωγών αυτών είναι αντιπροσωπευτικά για το δίκτυο μέσης τάσης. Η θερμική καταπόνηση οφείλεται στο ρεύμα το οποίο διαρρέει τον σύνδεσμο. Έτσι για το συγκεκριμένο πείραμα δεν υπάρχει λόγος η τιμή της τάσης να είναι στα επίπεδα της μέσης τάσης, συνεπώς για λόγους ασφαλείας διατηρείται χαμηλή. Επίσης επιλέχθηκε ως ροπή σύσφιξης τα 20 Nm ως η βέλτιστη βάσει προηγούμενης διερεύνησης [13] που ανέλυε την επίδραση της ροπής σύσφιξης στη θερμική συμπεριφορά του συνδέσμου.

Η διάταξη που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1-1.



Σχήμα 3.1-1: 1: Πηγή τάσης, τάση δικτύου 230 V
2: Μετασχηματιστής μεταβλητής εξόδου (VARIAC)
3: Μετασχηματιστής Έντασης
4: Επαγωγικό Αμπερόμετρο
5: Ηλεκτρικός Σύνδεσμος (δοκίμιο)
6: Ψηφιακό Θερμόμετρο

Ο μετασχηματιστής υποβιβασμού τροφοδοτείται από το δίκτυο χαμηλής τάσης και επιβάλλει στην είσοδο του μετασχηματιστή έντασης (Μ/Σ) τάση 0 V έως

230 V. Έτσι η ένταση στην έξοδο ρυθμίζεται από την ενδιάμεση λήψη του μετασχηματιστή μεταβλητής εξόδου. Στους δύο ακροδέκτες του μετασχηματιστή συνδέονται δύο πανομοιότυποι αγωγοί διατομής. Οι αγωγοί αυτοί συνδέονται ηλεκτρικά μέσω του ηλεκτρικού συνδέσμου, ο οποίος είναι και το αντικείμενο μελέτης. Το ρεύμα μετράται επαγωγικά. Τέλος λαμβάνονται οκτώ μετρήσεις για τη θερμοκρασία, στους δύο αγωγούς, στην επιφάνεια και στο εσωτερικό του σύνδεσμου δεξιά και αριστερά.

3.1.1 Ο Μετασχηματιστής μεταβλητής εξόδου

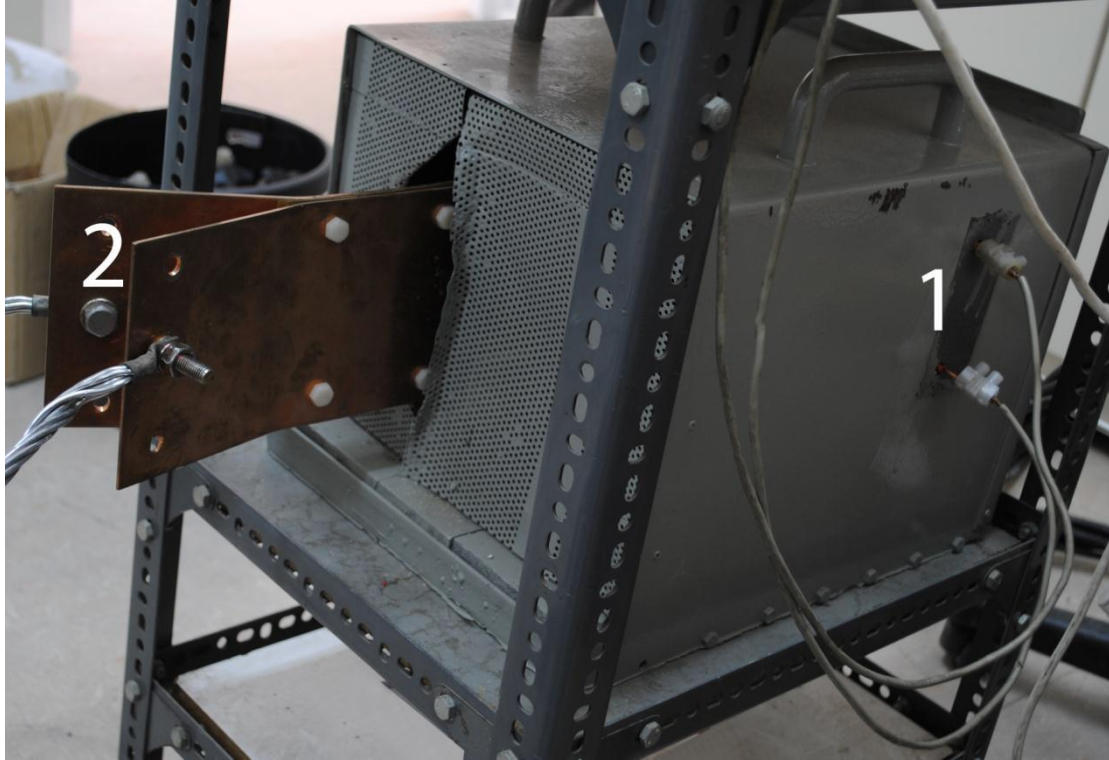
Ο μετασχηματιστής μεταβλητής εξόδου που χρησιμοποιήθηκε (S-260-5 Yamabishi electric Σχήμα 3.1.1-1) έχει τέσσερις ακροδέκτες. Στους δύο ακροδέκτες εισόδου συνδέεται η τάση του δικτύου 230 V. Οι δύο ακροδέκτες εξόδου συνδέονται εσωτερικά του μετασχηματιστή με το ένα άκρο του δευτερεύοντος τυλίγματος και την ενδιάμεση λήψη αντίστοιχα. Η ενδιάμεση λήψη ρυθμίζεται μέσω ποτενσιόμετρου. Με τον τρόπο αυτό η τάση στην έξοδο του μετασχηματιστή μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ 0 V και 230 V.



Σχήμα 3.1.1-1: Η φωτογραφία του μετασχηματιστή μεταβλητής εξόδου ενδιάμεσης λήψης VARIAC

3.1.2 Ο μετασχηματιστής έντασης

Για την προσομοίωση του ρεύματος του δικτύου μέσης τάσης στην πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εικονιζόμενος (Σχήμα 3.1.2-1) μετασχηματιστής ρεύματος του εργαστηρίου μέγιστης ισχύος 1,5kVA.



Σχήμα 3.1.2-1: Φωτογραφία του μετασχηματιστή έντασης
1: Ακροδέκτες εισόδου Μ/Σ
2: Ακροδέκτες εξόδου Μ/Σ

3.1.3 Οι αγωγοί

Οι αγωγοί της διάταξης είναι πολύκλωνοι αγωγοί ASCR διατομής 35mm^2 και 95mm^2 (Σχήμα 3.1.3-1). Οι αγωγοί συνδέονται στους ακροδέκτες εξόδου του μετασχηματιστή έντασης και έχουν μήκος 1m περίπου ο καθένας.



Σχήμα 3.1.3-1: ASCR αγωγοί - Οι εξωτερικοί κλώνοι από αλουμίνιο προσδίδουν μεγάλη ειδική αγωγιμότητα ενώ οι εσωτερικοί από χάλυβα αποτελούν τη "χαλύβδινη ψυχή" που προσδίδει τη μηχανική αντοχή στους αγωγούς

Η σύνδεση με τον σύνδεσμο γίνεται στο μέσο των δύο αγωγών. Τα δύο άκρα του καθενός από τους δύο αγωγούς στερεώνονται με συνδέσμους πλάκας-αγωγού στους ακροδέκτες εξόδου του μετασχηματιστή έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής και να μην υπάρχει επιπρόσθετη αντίσταση στη σύνδεση των αγωγών με τους ακροδέκτες εξόδου του μετασχηματιστή έντασης. Μέσω αυτής της συνδεσμολογίας το συνολικό ρεύμα που διαπερνάει τον σύνδεσμο, διαμοιράζεται στα δύο μέρη κάθε αγωγού τόσο κατά την είσοδο όσο και κατά την έξοδο του ρεύματος από τον αγωγό. Έτσι ενώ ο σύνδεσμος διαπερνάται από το συνολικό ρεύμα $I_{ολ}$, οι αγωγοί που άγουν το ρεύμα προς και από το σύνδεσμο επιβαρύνονται, κάθε φορά, μόνο με το μισό του συνολικού ρεύματος έτσι ώστε η θερμοκρασιακή τους συμπεριφορά να μην επηρεάσει τη δοκιμή υπερθέρμανσης του συνδέσμου. Εφόσον το ονομαστικό ρεύμα των αγωγών είναι - λογικά - σαφώς μικρότερο από αυτό των συνδέσμων, πρέπει να διασφαλιστεί ότι η μετρούμενη θερμοκρασία του συνδέσμου οφείλεται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα στο ρεύμα που διατρέχει τον σύνδεσμο και να περιοριστεί η όποια θερμοκρασιακή συνεισφορά των αγωγών στο μετρούμενο αποτέλεσμα.

3.1.4 Αμπερόμετρο – Μετρητής Ρεύματος

Το είδος του αμπερομέτρου που χρησιμοποιείται στη διάταξη είναι μία ψηφιακή αμπεροτσιμπίδα «AMPROBE μοντέλο AD105A». Μέσα από την αμπεροτσιμπίδα περνούν οι δύο αγωγοί οι οποίοι φέρουν το ρεύμα προς το σύνδεσμο, αν και θα μπορούσαν, κάλλιστα, να περαστούν οι δύο αγωγοί που άγουν το ρεύμα από τον σύνδεσμο πίσω στο μετασχηματιστή έντασης. Στην ψηφιακή του οθόνη εμφανίζεται κάθε φορά το συνολικό ρεύμα που διαπερνά το σύνδεσμο. Απαραίτητη προϋπόθεση ήταν να ρυθμιστεί η μέτρηση σε εναλλασσόμενο ρεύμα.

Παρακάτω (σχήμα 3.1.4-1) απεικονίζονται και επεξηγούνται αναλυτικότερα τα μέρη του αμπερομέτρου.



Σχήμα 3.1.4-1: Αμπεροτσιμπίδα AMPROBE AD105A (1000 A AC/DC)

1. Ψηφιακή οθόνη: 3 ¼ ψηφίων LCD
2. Λουρί καρπού (εμποδίζει την ολίσθηση από το χέρι)
3. ON/OFF
4. Hz: Αυτό το πλήκτρο επιλέγει τη λειτουργία της συχνότητας
5. Πλήκτρο DCA zero: Αντισταθμίζει τον παραμένοντα μαγνητισμό
6. Πλήκτρο DC/AC: Επιλογή μεταξύ AC και DC ρεύματος
7. Μοχλός ανοίγματος τσιμπίδας
8. Πλήκτρο Peak Hold: Κρατά τη μέγιστη μετρούμενη τιμή
9. Τσιμπίδα: Σχεδιασμένη να λαμβάνει το ρεύμα που περνάει μέσα από τον αγωγό

3.1.5 Μετρητής τάσης - Βολτόμετρο

Για να μετρηθεί η τάση στην έξοδο του μετασχηματιστή μεταβλητής εξόδου, δηλαδή στην είσοδο του μετασχηματιστή έντασης, χρησιμοποιήθηκε ένα πολύμετρο στη λειτουργία του βολτομέτρου. Το ακριβές μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το "True RMS Multimeter Extech 430" της "Extech Instruments". Στο σχήμα παρακάτω (Σχήμα 3.1.5-1) αναγράφονται όλα τα μέρη του πολυμέτρου που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 3.1.5-1: True RMS Multimeter Extech 430

1. LCD οθόνη
2. HOLD
3. Πλήκτρο SELECT
4. διακόπτης λειτουργίας
5. Υποδοχές εισόδου mA, μ A και A
6. Υποδοχή εισόδου COM
7. Θετική υποδοχή εισόδου
8. Πλήκτρο Range hold
9. Πλήκτρο Relative
10. Κουμπί Backlight
11. Προστατευτική θήκη

3.1.6 Μετρητές θερμοκρασίας

Το είδος των θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στη μέτρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του συνδέσμου και στους αγωγούς κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης ήταν θερμοστοιχεία τύπου σιδήρου – κοσταντάνης. Η κοσταντάνη αποτελεί κράμα χαλκού και νικελίου. Ο συγκεκριμένος τύπος θερμοστοιχείου χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές. Στο σχήμα 3.1.4-1 φαίνεται το ψηφιακό θερμόμετρο, ενώ στον πίνακα 3.1.4-2 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των θερμοστοιχείων.

Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι το “Model 421502 Dual Input type J/K Digital Thermometer” .



Σχήμα 3.1.4-1: Μοντέλο 421502 ψηφιακό θερμόμετρο τύπου J/K διπλής εισόδου
 1. Είσοδοι θερμοζεύγους
 2. LCD προβολή
 3. Πληκτρολόγιο

Υλικό	Κωδικοί καλωδίων επέκτασης	HEΔ στους 100° C (mV)	Περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας (°C)
+Fe/-CuNi	+Κίτρινο/-Μπλε	5.268	0~ + 850

Πίνακας 3.1.5-2: Πίνακας χαρακτηριστικών θερμοστοιχείου σιδήρου - κοσταντάνης

3.2 Οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι

Οι σύνδεσμοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι σύνδεσμοι αλουμινίου. Πιο συγκεκριμένα:

- i) Ο πρώτος σύνδεσμος (RIVIMETAL GR-261A) (Σχήμα 3.2-1) μπορεί να συνδέσει παράλληλα έναν αγωγό 95mm^2 με έναν άλλο αγωγό ACSR μεταξύ 16 και 50mm^2 . Η σύσφιξη του συνδέσμου πραγματοποιείται μέσω δυο κοχλιών M13.



Σχήμα 3.2-1: Σύνδεσμος αλουμινίου RIVIMETAL GR-261A – (ACSR 95 – ACSR 16-50)

- ii) Ο δεύτερος σύνδεσμος (SL B3 AL 35-70^o – AL16-50^o 2008) (Σχήμα 3.2-2) μπορεί να συνδέσει παράλληλα έναν αγωγό μεταξύ 35 και 70 mm² με έναν άλλο αγωγό ACSR μεταξύ 16 και 50 mm². Η σύσφιγξη του συνδέσμου πραγματοποιείται μέσω δυο κοχλιών M14.



Σχήμα 3.2-2: Σύνδεσμος αλουμινίου SL B3 (AL 35-70 – AL16-50) 2008

- iii) Ο τρίτος σύνδεσμος (Σχήμα 3.2-3) συνδέει μία αγωγή με έναν αγωγό ACSR. Ο αγωγός μπορεί να κυμαίνεται σε ένα μεγάλο εύρος διατομών καθώς οι δύο κοχλίες M17, οι οποίοι χρησιμεύουν στη σύσφιξη του αγωγού, δίνουν μεγάλο περιθώριο επιλογής στη διατομή του αγωγού. Η επαφή του συνδέσμου με την πλάκα επιτυγχάνεται μέσω του επιπέδου μέρους του το οποίο συσφίγγεται μέσω ενός κοχλία με παξιμάδι και ροδέλα.



Σχήμα 3.2-3: Σύνδεσμος αλουμινίου μεταξύ πλάκας και αγωγού ACSR

Όλοι οι σύνδεσμοι φυλάσσονταν σε εσωτερικό χώρο πριν τη διεξαγωγή της δοκιμής υπερθέρμανσης και δεν έχουν εκτεθεί σε εξωτερικές συνθήκες. Έτσι σε όλους τους συνδέσμους οι επικαθίσεις των οξειδίων είναι οι λιγότερες δυνατές.

3.3 Πειραματική διαδικασία

Κατά την πειραματική διαδικασία, στο πειραματικό μοντέλο πραγματοποιήθηκε δοκιμή υπερθέρμανσης στους συνδέσμους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Χρησιμοποιώντας διάφορες τιμές ρεύματος καταπόνησης των συνδέσμων μετρήθηκε η θερμοκρασία σε διαφορετικά σημεία των συνδέσμων αυτών και σύμφωνα με τη θερμοκρασιακή τους συμπεριφορά καθορίστηκε το ονομαστικό ρεύμα τους.

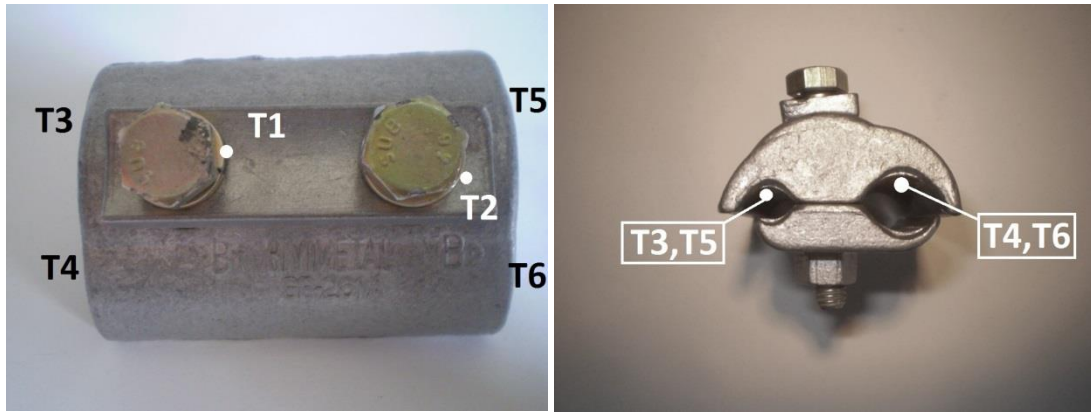
Το αρχικό ρεύμα καταπόνησης του συνδέσμου επιλέχθηκε εμπειρικά. Παρατηρώντας τις ενδείξεις των ψηφιακών θερμομέτρων, στο τέλος κάθε μέτρησης κρινόταν αν το επόμενο ρεύμα καταπόνησης θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο. Η τιμή του ρεύματος ρυθμιζόταν, πάντα, με την βοήθεια του μετασχηματιστή μεταβλητής εξόδου, ο οποίος τροφοδοτούσε τον μετασχηματιστή ρεύματος. Η μέτρηση της γινόταν επαγωγικά με αμπεροτσιμπίδα και όχι άμεσα, επί του κυκλώματος, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα την εισαγωγή κάποιου σφάλματος στις μετρήσεις. Το σφάλμα αυτό, όμως, δεν επηρεάζει τη φύση του προβλήματος, καθώς το ζητούμενο είναι ο σύνδεσμος να διαρρέεται από ρεύμα σταθερό. Για τις ανάγκες αυτές η χρήση της αμπεροτσιμπίδας είναι επαρκής.

Μετρήσεις θερμοκρασίας λαμβάνονταν κάθε φορά από 6 σημεία κάθε συνδέσμου. Τα έξι διαφορετικά σημεία μέτρησης αποσκοπούν στο να διαπιστωθεί σε ποιο μέρος της επαφής εντοπίζεται η μέγιστη θερμοκρασία T_{max} . Σχεδόν κατά κανόνα επιλέγονται σημεία κοντά στις περιοχές σύσφιγξης των συνδέσμων (κοχλίες), όπως και σημεία στα οποία ο αγωγός έρχεται σε επαφή με τον σύνδεσμο, στις περιοχές δηλαδή όπου μέσω της σύσφιγξης του συνδέσμου διαμορφώνονται τα a-spots.

Πέραν αυτών, λαμβάνονταν και δύο μετρήσεις από τα άκρα των αγωγών έτσι ώστε να ελέγχεται κάθε φορά ότι η θερμοκρασία των αγωγών δεν είναι μεγαλύτερη από αυτή των σημείων μέτρησης των συνδέσμων. Έτσι διασφαλίζεται ότι η θερμοκρασιακή συνεισφορά των αγωγών στις μετρήσεις που γίνονται πάνω στο σύνδεσμο περιορίζεται κατά το ελάχιστο δυνατό.

Πιο συγκεκριμένα:

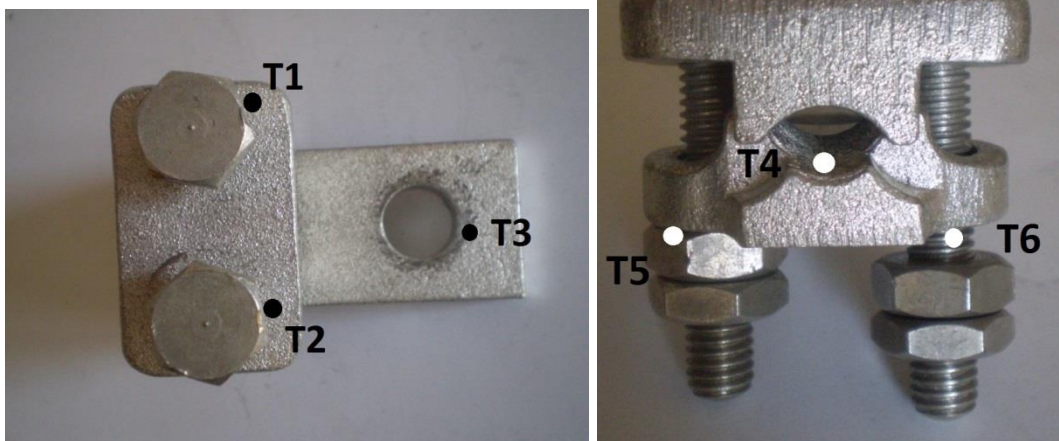
- ❖ Για τους δύο πρώτους συνδέσμους που είναι ίδιου τύπου (παράλληλης σύνδεσης αγωγών) ελήφθησαν μετρήσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3-1:
 - ✓ από τα δύο σημεία όπου σφίγγουν οι κοχλίες επιφανειακά του συνδέσμου (T1, T2)
 - ✓ από τα 4 σημεία όπου εισέρχονται οι αγωγοί στο σύνδεσμο και όπου γίνεται η επαφή συνδέσμου-αγωγού (T3-T6)



Σχήμα 3.3-1: Σημεία μέτρησης της θερμοκρασίας για τους δύο συνδέσμους σύνδεσης παραλλήλων αγωγών (T1-T6)

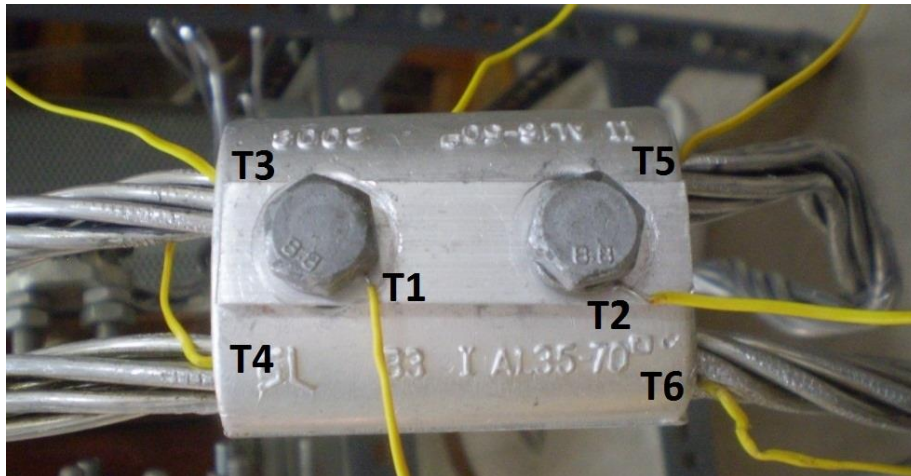
❖ Για τον τρίτο σύνδεσμο που είναι τύπου σύνδεσης πλάκας με αγωγό ελήφθησαν μετρήσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3-2:

- ✓ από τα δύο σημεία όπου σφίγγουν οι κοχλίες τον αγωγό, επιφανειακά του συνδέσμου (T1, T2)
- ✓ από το σημείο όπου ο τρίτος κοχλίας σφίγγει τον σύνδεσμο πάνω στην πλάκα (T3)
- ✓ από το σημείο όπου εισέρχεται ο αγωγός στο σύνδεσμο (T4)
- ✓ από τα δύο σημεία όπου τα περικόχλια (παξιμάδια) συσφίγγουν τον αγωγό (T5, T6)

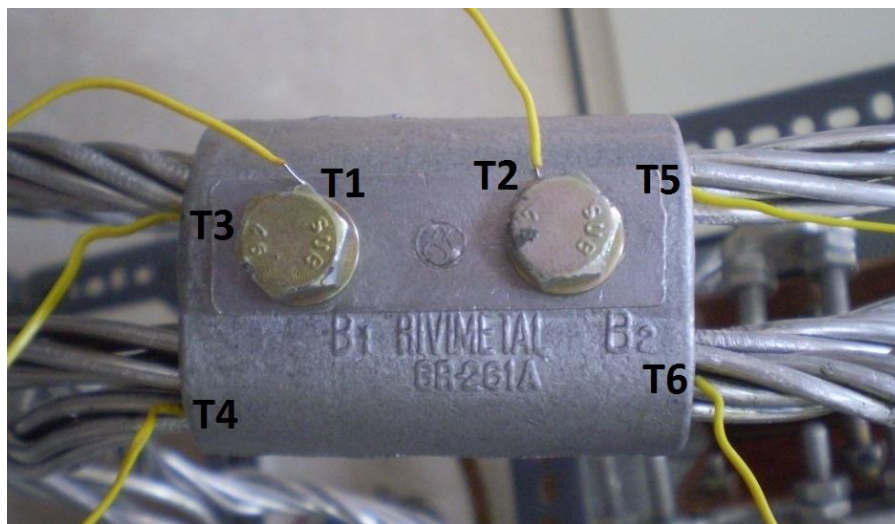


Σχήμα 3.3-2: Σημεία μέτρησης θερμοκρασίας για το σύνδεσμο σύνδεσης αγωγού με πλάκα (T1-T6)

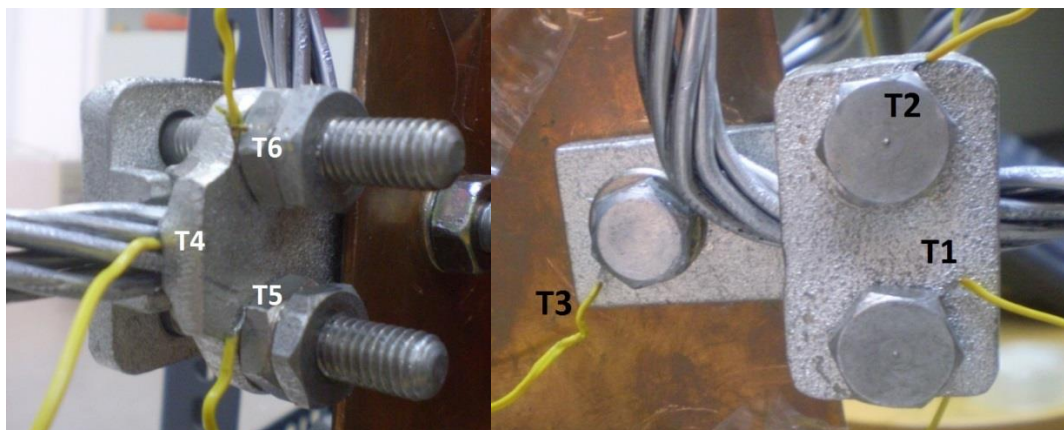
Παρακάτω απεικονίζονται οι διατάξεις μέτρησης με σημειωμένα τα σημεία μέτρησης των συνδέσμων για τους τρεις συνδέσμους, σχήμα 3.3-3 για τον πρώτο, σχήμα 3.3-4 για το δεύτερο και σχήμα 3.3-5 για τον τρίτο.



Σχήμα 3.3-3: Διάταξη μέτρησης συνδέσμου παραλλήλων αγωγών SL B3 AL 35-70⁰ – AL16-50⁰ (2008)



Σχήμα 3.3-4: Διάταξη μέτρησης συνδέσμου παραλλήλων αγωγών RIVIMETAL GR-261A



Σχήμα 3.3-5: Διάταξη μέτρησης συνδέσμου σύνδεσης πλάκας-αγωγού

Θερμοκρασιακές μετρήσεις λαμβάνονταν ανά 15 λεπτά από κάθε σημείο μέτρησης. Το χρονικό αυτό διάστημα επιλέχθηκε εμπειρικά καθώς το απαιτούμενο χρονικό διάστημα της μίας ώρας, κατά το οποίο, σύμφωνα με τον ορισμό, η μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ πρέπει να είναι μικρότερη του 1°C , έτσι ώστε να θεωρηθεί η θερμοκρασία του συνδέσμου ως καταληκτική για ένα συγκεκριμένο ρεύμα, είναι ακριβές πολλαπλάσιο του 15λεπτου το οποίο καθορίστηκε ως διάστημα μεταξύ των μετρήσεων. Πέραν αυτού, κάθε εξεταζόμενη, ως προς τη διαφορά θερμοκρασίας, ώρα περιέχει 5 μετρήσεις (0.00-0.15-0.30-0.45-1.00), αριθμός ο οποίος φαίνεται ικανός έτσι ώστε τα αποτελέσματα να μην μπορούν να αλλοιωθούν από σφάλματα.

Οι δοκιμές επί του εκάστοτε συνδέσμου τερματίζονταν όταν η καταληκτική θερμοκρασία μίας σειράς μετρήσεων ανεδείκνυε διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του συνδέσμου και του περιβάλλοντος περίπου **40 °C**.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, η συγκεκριμένη διαφορά θερμοκρασίας αντιπροσωπεύει τις πιο αντίξοες συνθήκες στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένας αγωγός ACSR. Εκφράζει, λοιπόν, το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας-ονομαστικό ρεύμα για τους αγωγούς ACSR, λόγω του ότι η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία για τους αγωγούς ACSR στα δίκτυα μέσης τάσης είναι 80°C ενώ ως μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος θεωρείται η θερμοκρασία των 40°C . Επομένως, λογικά επιλέχθηκε για τη διερεύνηση του ονομαστικού ρεύματος και των συνδέσμων αγωγών ACSR μέσης τάσης η ίδια διαφορά θερμοκρασίας, εφόσον οι σύνδεσμοι αυτοί είναι κομμάτια του ίδιου κυκλώματος. Τα παραπάνω δεδομένα αυτά έχουν καθιερωθεί από τον ΔΕΔΔΗΕ έτσι ώστε να μη μειώνεται η μηχανική και η ηλεκτρική αντοχή του εξοπλισμού.

Για κάθε σύνδεσμο μέσης τάσης που μετρήθηκε, τα αποτελέσματα επανεξετάστηκαν τουλάχιστον 2 φορές (σε διαφορετικά κομμάτια) για τον καθένα με σκοπό την επαλήθευση ή όχι αυτών. Αυτό σημαίνει πως μετρήθηκαν τουλάχιστον 3 σύνδεσμοι κάθε τύπου έτσι ώστε να διαπιστωθεί η σταθερότητα ή σε αντίθετη περίπτωση, η ανομοιομορφία των αποτελεσμάτων.

Τέλος, σημειώνεται πως ανά τακτά χρονικά διαστήματα γίνονταν μετρήσεις με την αμπεροτσιμπίδα ώστε να διαπιστωθεί πως το ρεύμα παραμένει σταθερό. Σε περίπτωση απόκλισης του ρεύματος από το αρχικά ορισμένο της δοκιμής γίνονταν οι απαραίτητες διορθωτικές κινήσεις. Οι αποκλίσεις της τιμής του ρεύματος παρουσιάζονταν στην πρώτη φάση του πειράματος, πριν σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία, καθώς με τη μεταβολή της θερμοκρασίας αλλάζει και η ειδική αγωγιμότητα τόσο των αγωγών όσο και του συνδέσμου με αποτέλεσμα την μεταβολή του ρεύματος.

3.4 Βαθμονόμηση Θερμομέτρων

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των συνδέσμων χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακά θερμόμετρα θερμοζεύγους. Η ικανότητα των θερμομέτρων αυτών να καταγράφουν τη θερμοκρασία σχεδόν άμεσα με απλή σημειακή επαφή συνεισέφερε έτσι ώστε να υπάρχει ταυτόχρονη απεικόνιση της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς πολλαπλών σημείων του συνδέσμου ανά πάσα στιγμή. Ωστόσο, ως ψηφιακά όργανα, τα θερμόμετρα αυτά εμπεριέχουν κάποιο ποσοστό σφάλματος και δεν μπορούν να προσφέρουν την ακρίβεια και την ορθότητα των αναλογικών θερμομέτρων (υδραργύρου).

Για το λόγο αυτό, πριν τη διεξαγωγή των δοκιμών υπερθέρμανσης στους συνδέσμους, πραγματοποιήθηκε μία σύγκριση των ψηφιακών θερμομέτρων θερμοζεύγους που χρησιμοποιήθηκαν με ένα αναλογικό θερμόμετρο. Η σύγκριση περιελάμβανε μετρήσεις στο εύρος των θερμοκρασιών που ανταποκρίνονταν στις απαιτήσεις των δοκιμών που θα ακολουθούσαν, με απώτερο σκοπό τη βαθμονόμηση των ψηφιακών θερμομέτρων.

Οι μετρήσεις οι οποίες ελήφθησαν (Πίνακας 3.4-1 και 3.4-2) έδειξαν ότι τα ψηφιακά θερμόμετρα είχαν πολύ μεγάλη ακρίβεια όσον αφορά τις μικρές θερμοκρασίες κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Παρόλα αυτά, για υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρήθηκε απόκλιση των ψηφιακών μετρήσεων από τις (ορθές) αναλογικές, η οποία μεγάλωνε αυξανομένης της θερμοκρασίας.

Αναλογικό	Ψηφιακό 1		Αναλογικό	Ψηφιακό 2	
	T1	T2		T1	T2
18,8	18,7	18,6	18,5	18,2	18,2
28	28,6	28,2	29	29,1	29,1
35	35,7	35,6	38	38,7	38,6
42	43,5	43,4	46	47,4	47,4
49,5	51,1	51,1	54,4	56,4	56,4
55	57,7	57,7	60	62,8	62,7
60,5	63,8	63,8	65	68,6	68,2
65	68,3	68,3	69	73	73
70	73,8	73,9			

Πίνακας 3.4-1: Βαθμονόμηση ψηφιακών θερμομέτρων

Αναλογικό	Ψηφιακό 3		Αναλογικό	Ψηφιακό 4
	T1	T2		
19	19	18,9	19	18,7
29	28,9	29,3	28	28,7
33,5	33,5	33,8	32,5	33,2
37,5	38,2	38,2	37,5	38,6
44	45	45	42,5	43,8
49,7	50,9	50,9	46,5	48,3
55,5	58	58,1	52	54,6
61	64	64,2	57,4	60,4
67	70,7	70,7	63	66,4
72	76,3	76	68	72

Πίνακας 3.4-2: Βαθμονόμηση ψηφιακών θερμομέτρων

Για να αντιστοιχηθούν οι μετρήσεις από τα ψηφιακά θερμομέτρα σε πραγματικές τιμές, διαμορφώθηκε μία σειρά από γραμμικούς συντελεστές, ανά βαθμίδα θερμοκρασιών, οι οποίοι φαίνονται παρακάτω:

Από:	Έως:	Συντελεστής
18°C	28°C	1
28°C	38°C	1,02
38°C	48°C	1,03
48°C	55°C	1,045
55°C	65°C	1,05

Επομένως, όταν λαμβάνεται μία μέτρηση από τα ψηφιακά θερμομέτρα, διαιρείται με τον αντίστοιχο συντελεστή, ανάλογα με τη βαθμίδα στην οποία ανήκει.

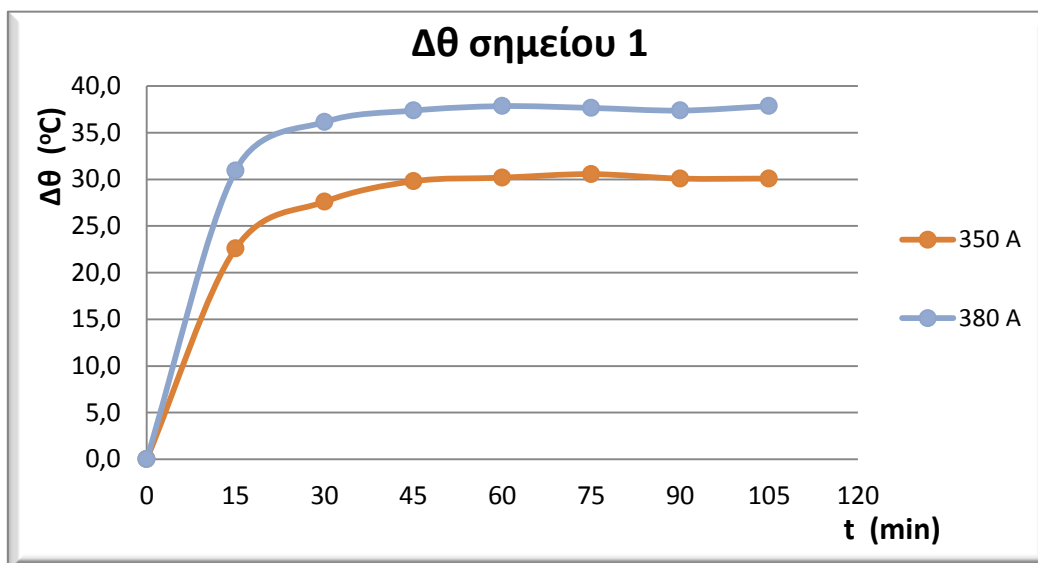
4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία διεξαγωγής του πειράματος. Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή προκύπτουν τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό με τη μορφή διαγραμμάτων. Οι αναλυτικοί πίνακες των μετρήσεων δίνονται στο παράρτημα Α.

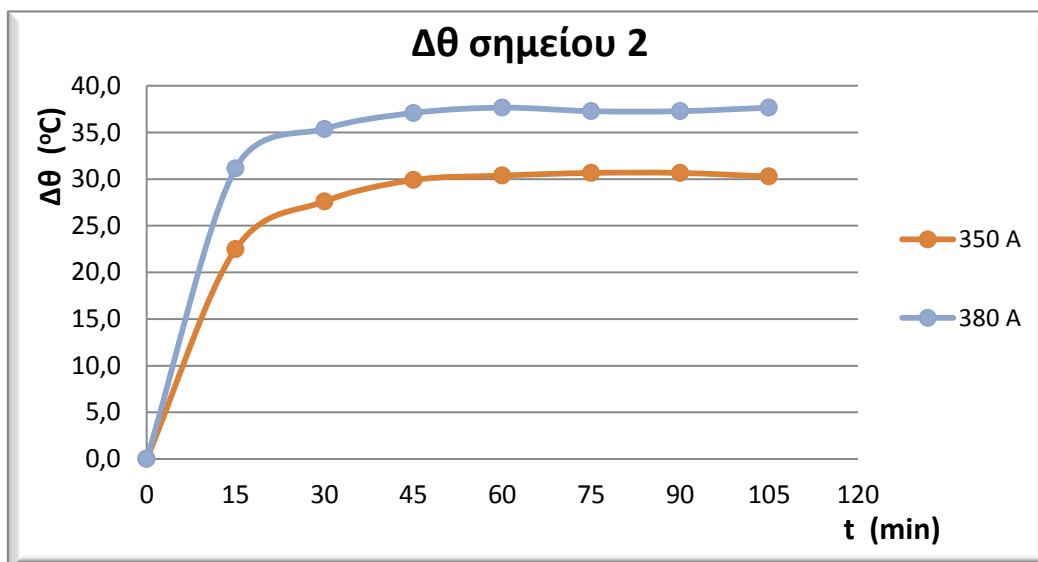
Για κάθε σύνδεσμο παρουσιάζονται 8 γραφήματα μετρήσεων, ένα για κάθε σημείο μέτρησης του συνδέσμου, καθώς και δύο για τη θερμική συμπεριφορά των αγωγών. Πέραν αυτών παρατίθενται και τα γραφήματα μετρήσεων των συνδέσμων που μετρήθηκαν με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Αναλυτικότερα:

- ✓ Στα σχήματα 4.1-1 έως 4.1-8 απεικονίζονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν για τον σύνδεσμο RIVIMETAL GR-261A (ACSR 95 – ACSR 16-50) για διάφορα δοκιμαζόμενα ρεύματα. Στα σχήματα 4.1-9 έως 4.1-16 απεικονίζονται οι μετρήσεις που έγιναν με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων του πρώτου συνδέσμου για δύο ακόμα συνδέσμους ίδιου τύπου.
- ✓ Στα σχήματα 4.2-1 έως 4.2-8 απεικονίζονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν για τον σύνδεσμο SL B3 (I AL35-70 - II AL 16-50) για διάφορα δοκιμαζόμενα ρεύματα. Στα σχήματα 4.2-9 έως 4.2-32 απεικονίζονται οι μετρήσεις που έγιναν με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων του πρώτου συνδέσμου για τρεις ακόμα συνδέσμους ίδιου τύπου.
- ✓ Στα σχήματα 4.3-1 έως 4.3-8 απεικονίζονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν για τον σύνδεσμο πλάκας-αγωγού για διάφορα δοκιμαζόμενα ρεύματα. Στα σχήματα 4.3-9 έως 4.3-24 απεικονίζονται οι μετρήσεις που έγιναν με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων του πρώτου συνδέσμου για δύο ακόμα συνδέσμους ίδιου τύπου.

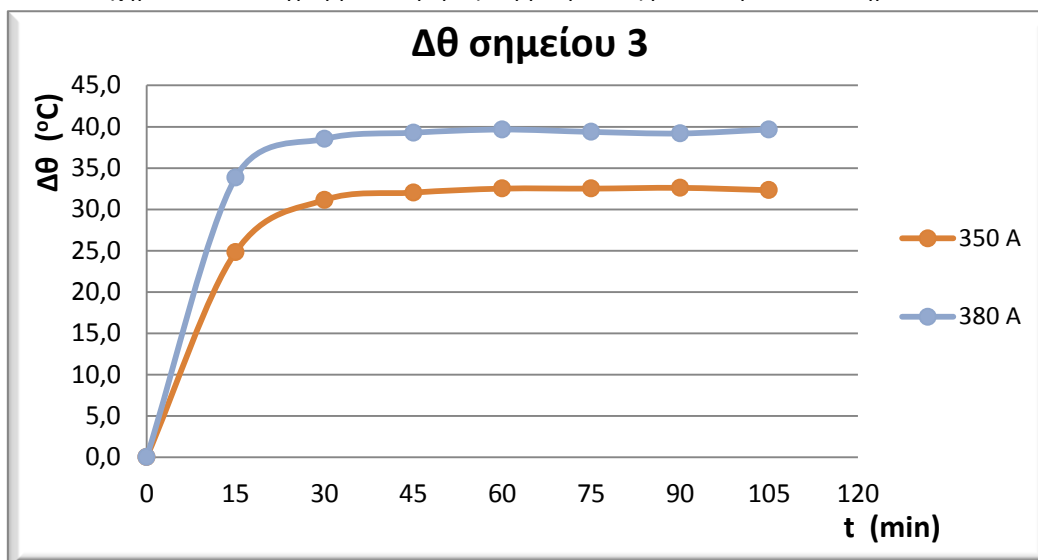
4.1 Μετρήσεις για σύνδεσμο RIVIMETAL GR-261A (ACSR 95 – ACSR 16-50)



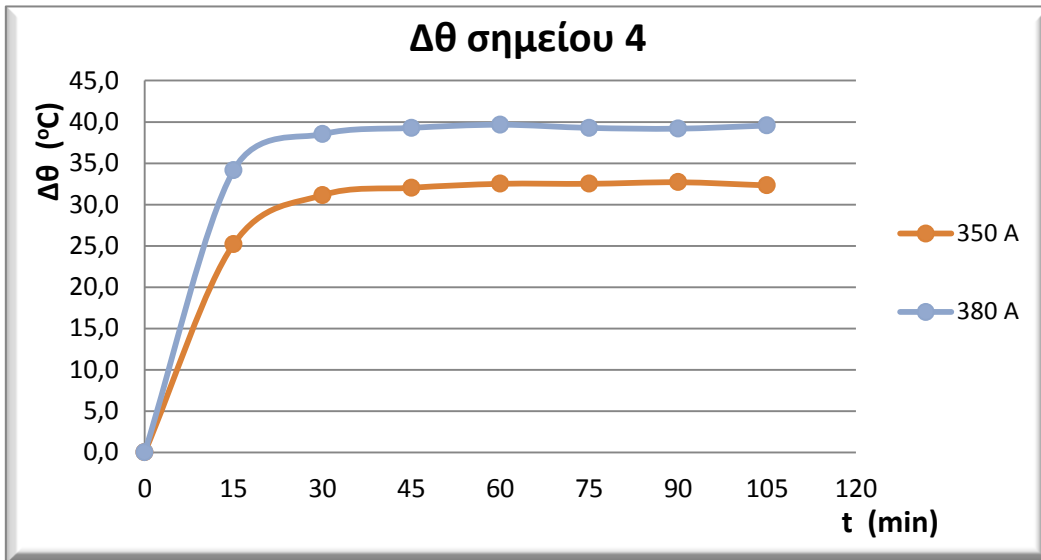
Σχήμα 4.1-1: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 1



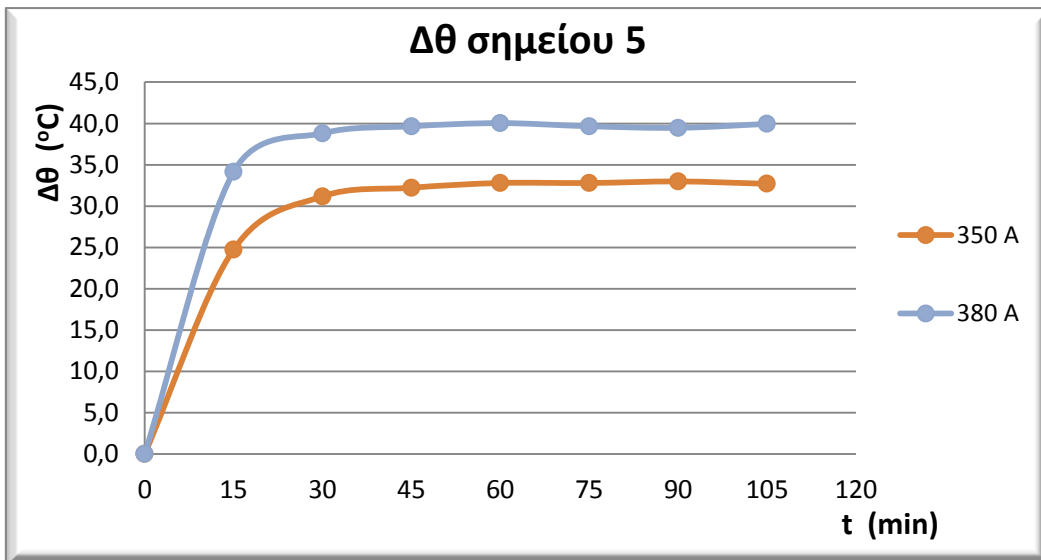
Σχήμα 4.1-2: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 2



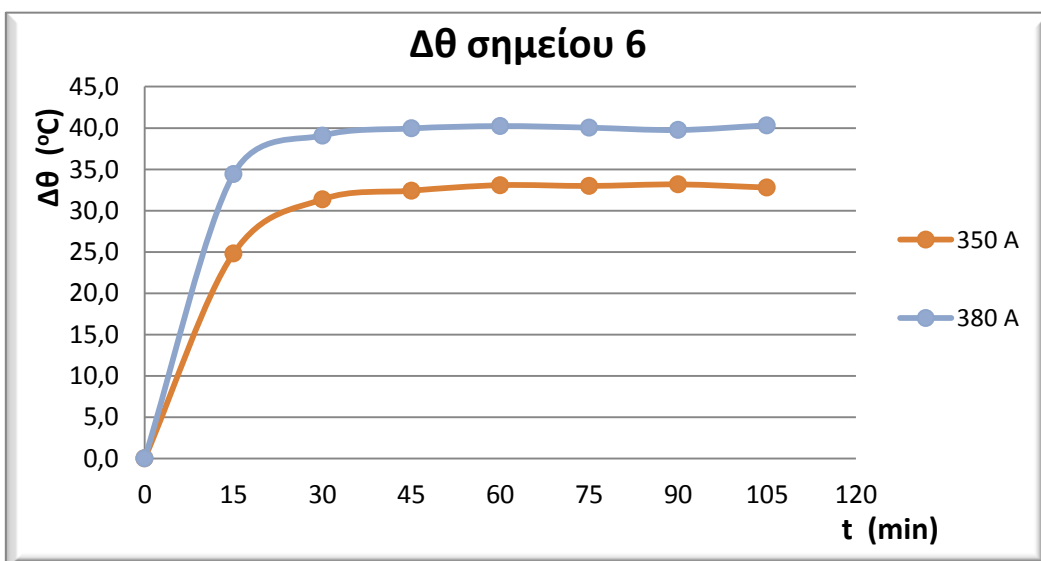
Σχήμα 4.1-3: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 3



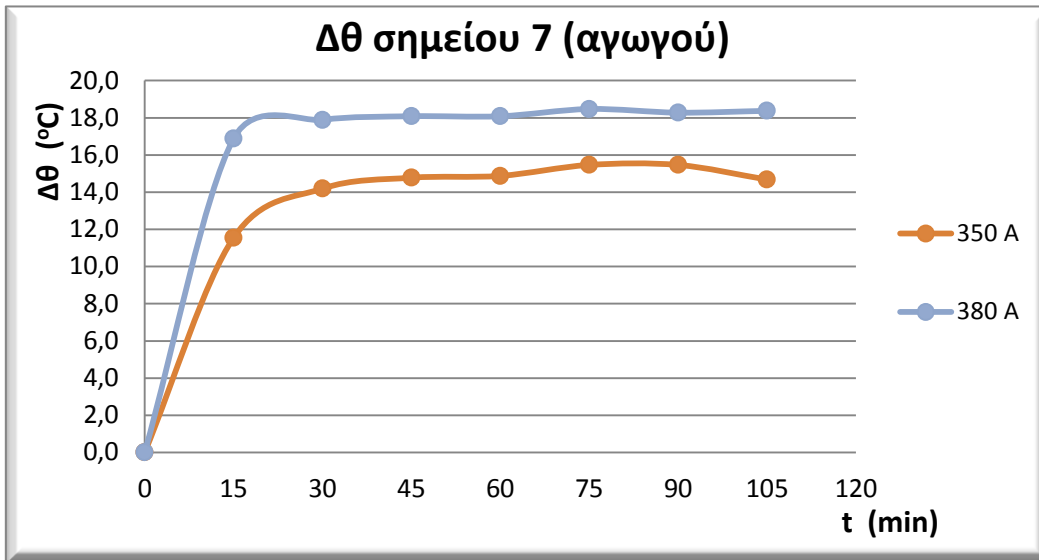
Σχήμα 4.1-4: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 4



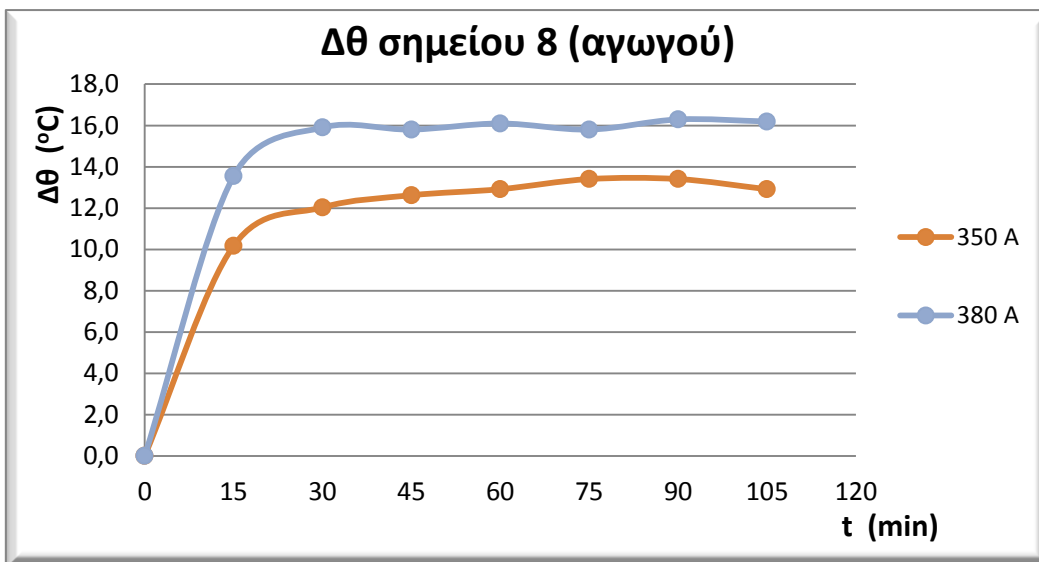
Σχήμα 4.1-5: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 5



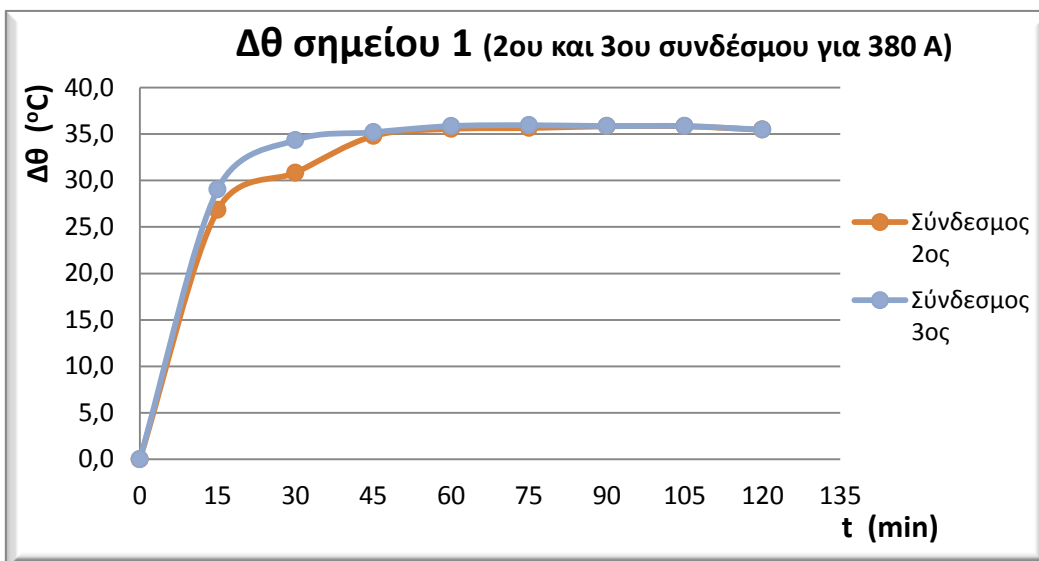
Σχήμα 4.1-6: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 6



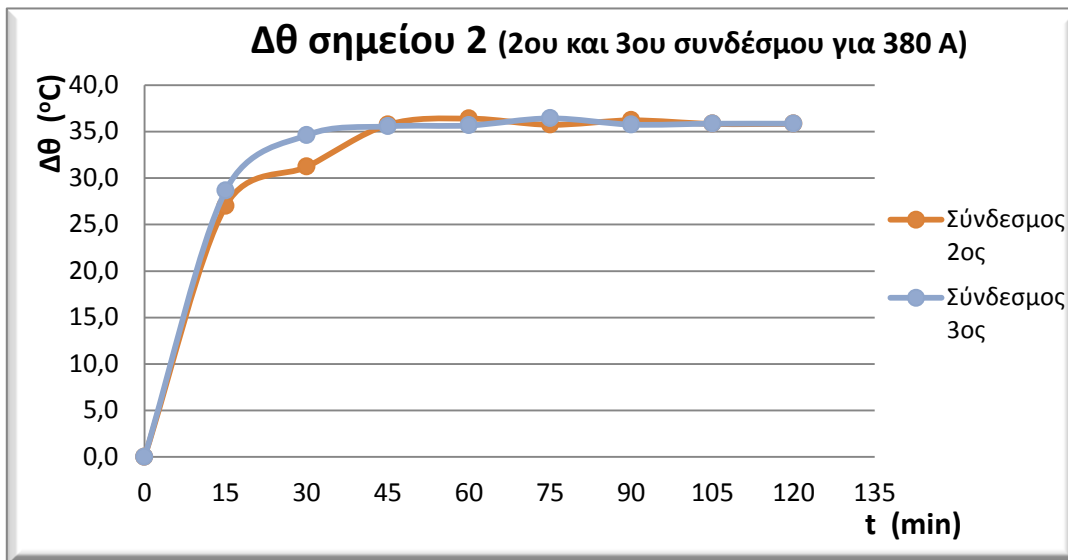
Σχήμα 4.1-7: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 7 (αγωγού)



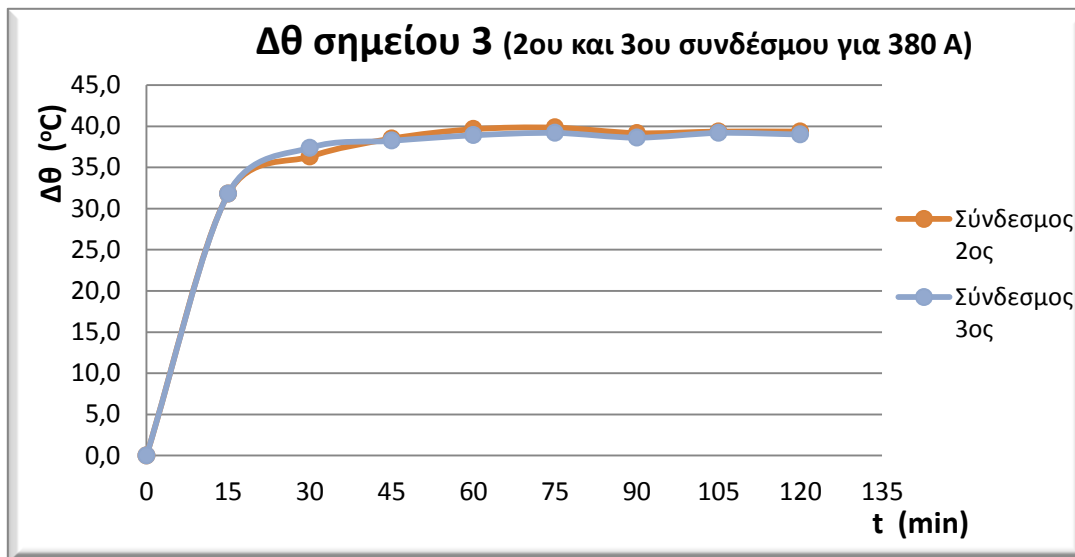
Σχήμα 4.1-8: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 8 (αγωγού)



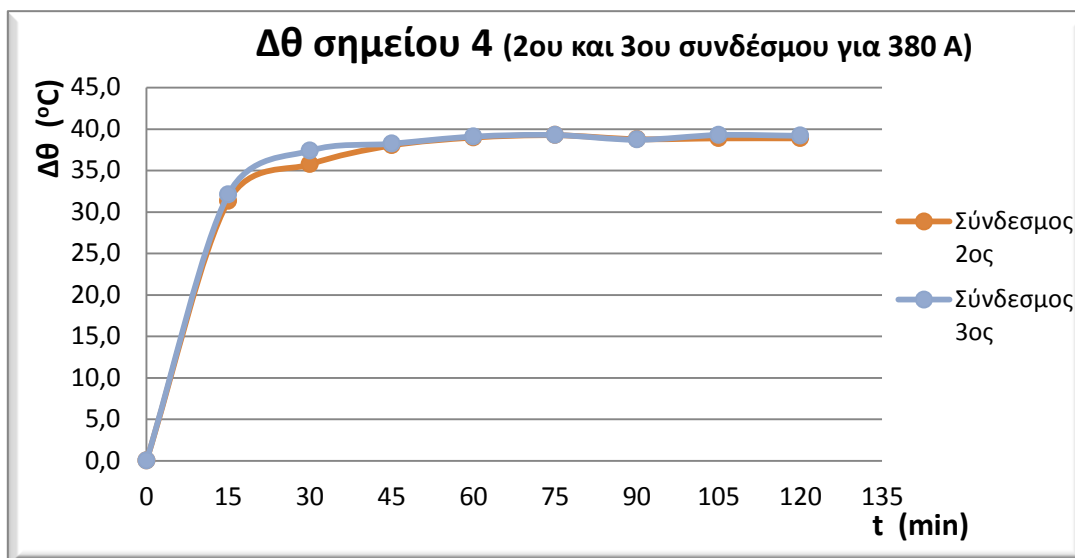
Σχήμα 4.1-9: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 1 για 2^ο και 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



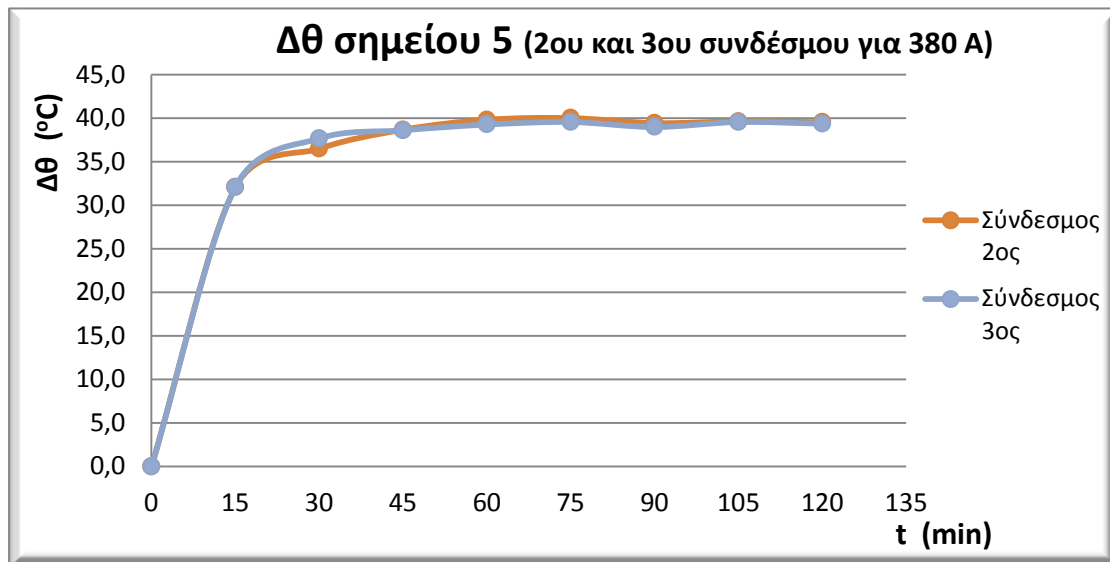
Σχήμα 4.1-10: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 2 για 2^ο και 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



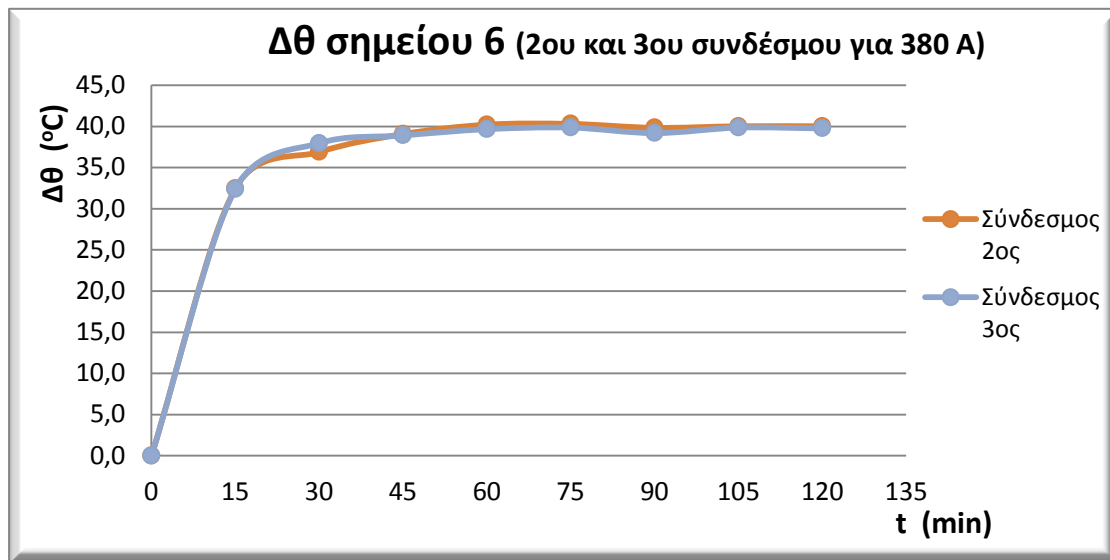
Σχήμα 4.1-11: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 3 για 2^ο και 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



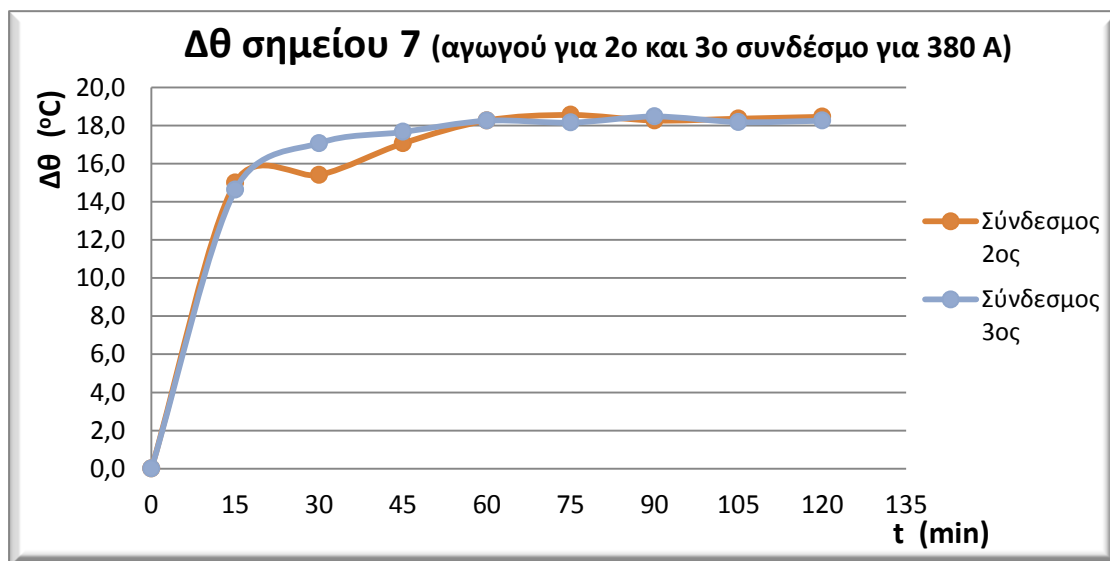
Σχήμα 4.1-12: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 4 για 2^ο και 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



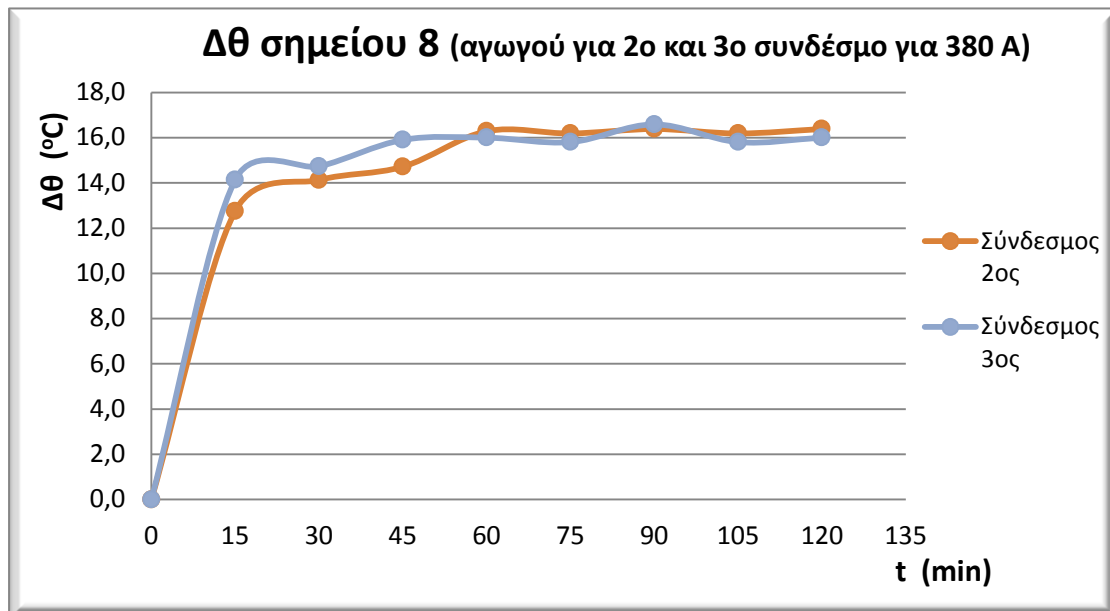
Σχήμα 4.1-13: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 5 για 2^ο και 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



Σχήμα 4.1-14: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 6 για 2^ο και 3^ο ομοειδή σύνδεσμο

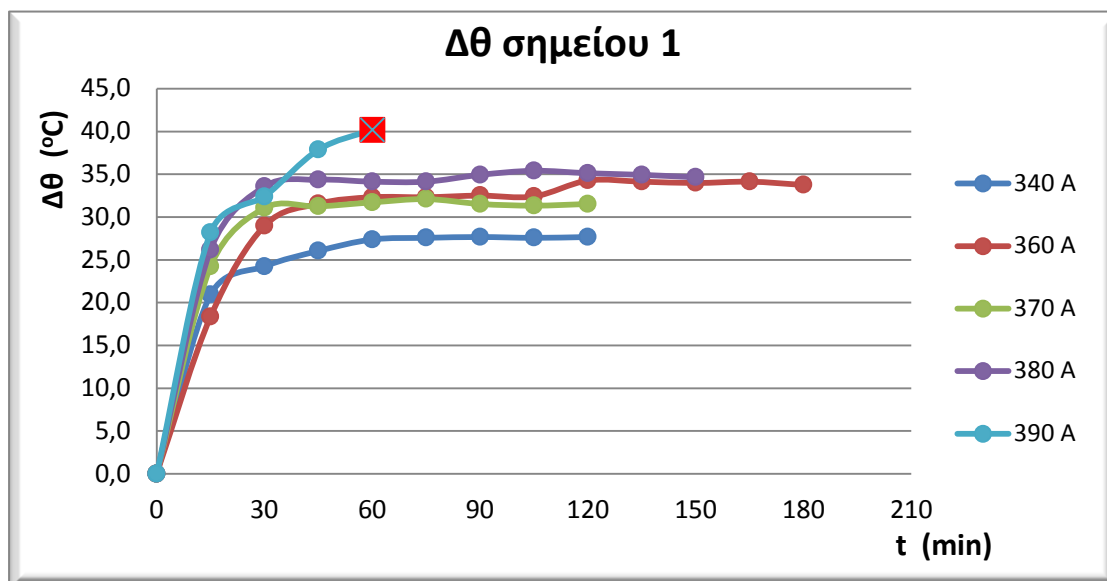


Σχήμα 4.1-15: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 7 (αγωγού) για 2^ο και 3^ο ομοειδή σύνδεσμο

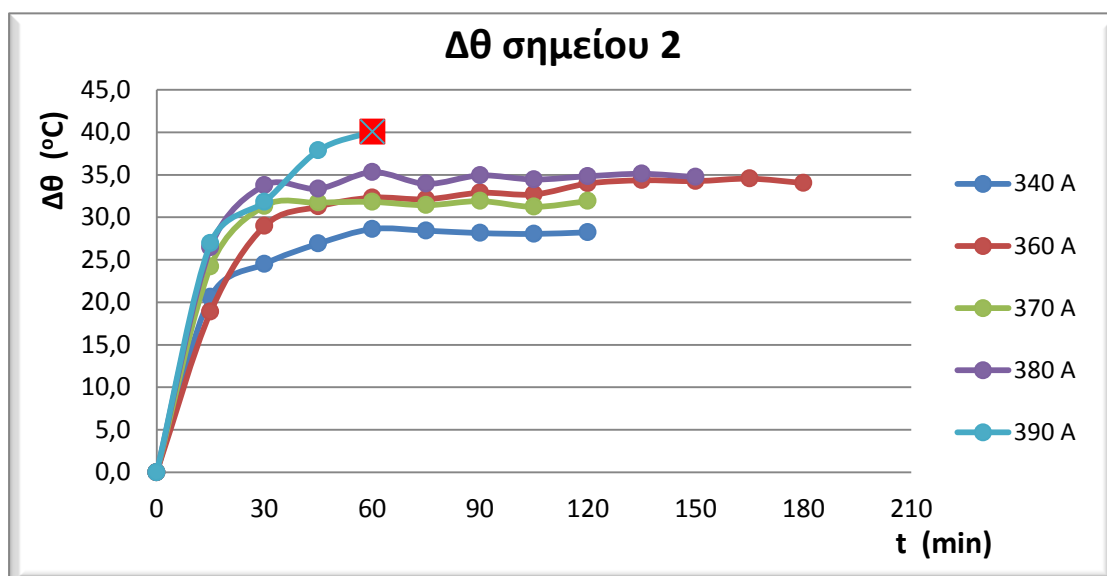


Σχήμα 4.1-16: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 8 (αγωγού) για 2^ο και 3^ο ομοειδή σύνδεσμο

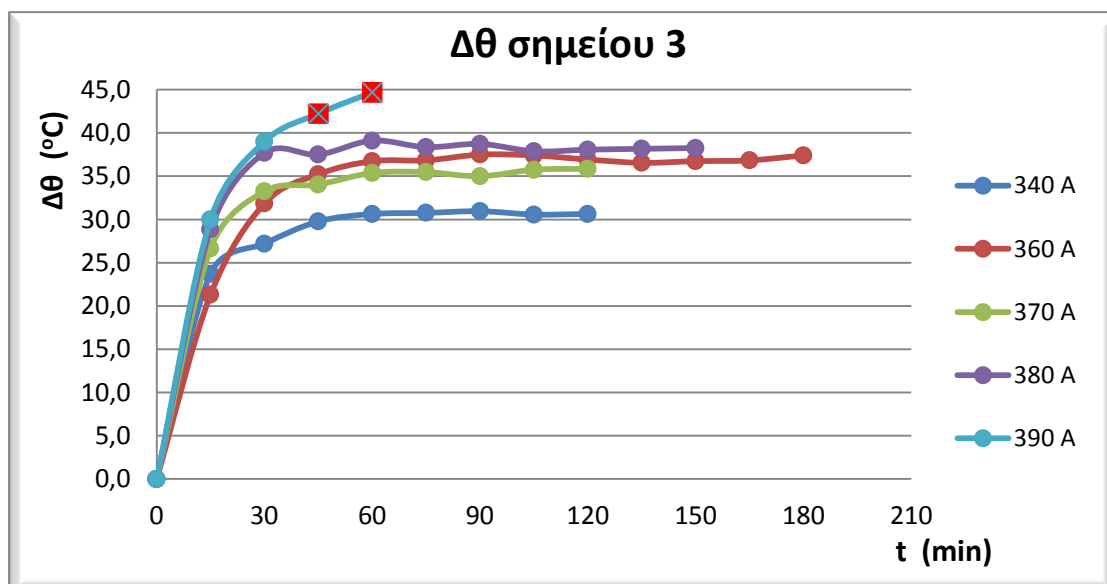
4.2 Μετρήσεις για σύνδεσμο SL B3 (I AL35-70 - II AL 16-50)



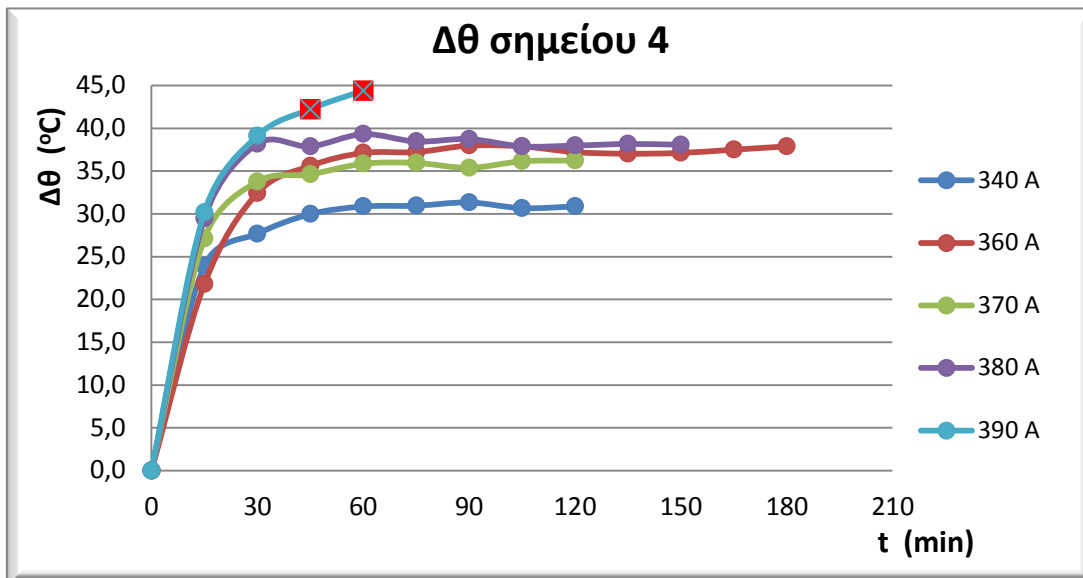
Σχήμα 4.2-1: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 1



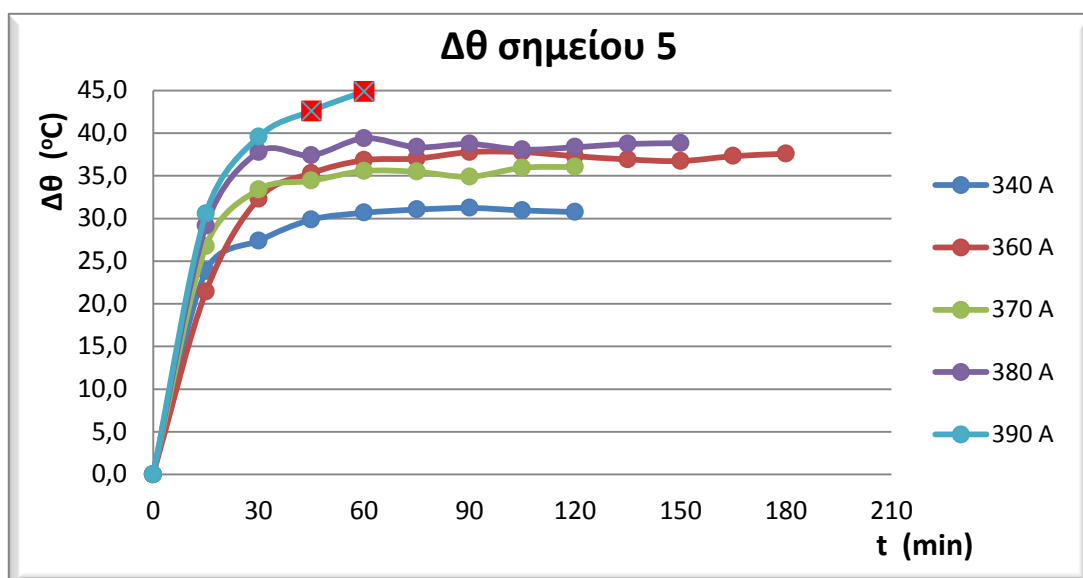
Σχήμα 4.2-2: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 2



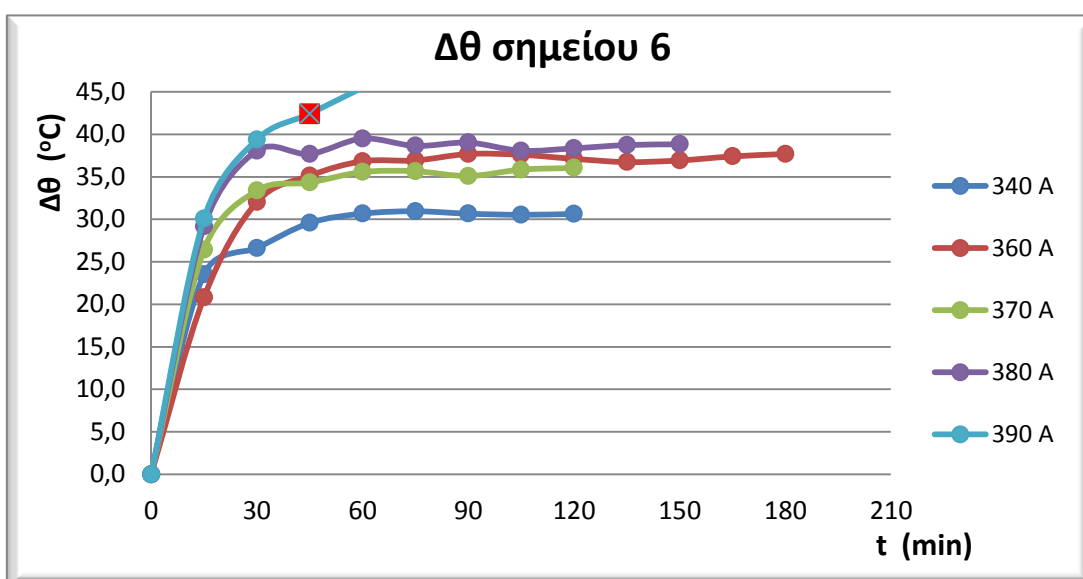
Σχήμα 4.2-3: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 3



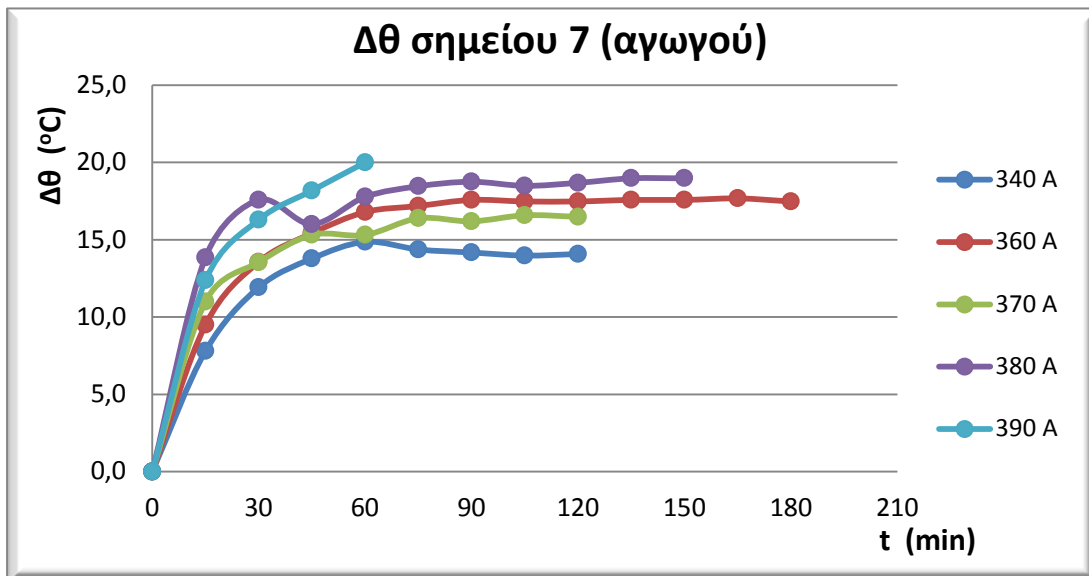
Σχήμα 4.2-4: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 4



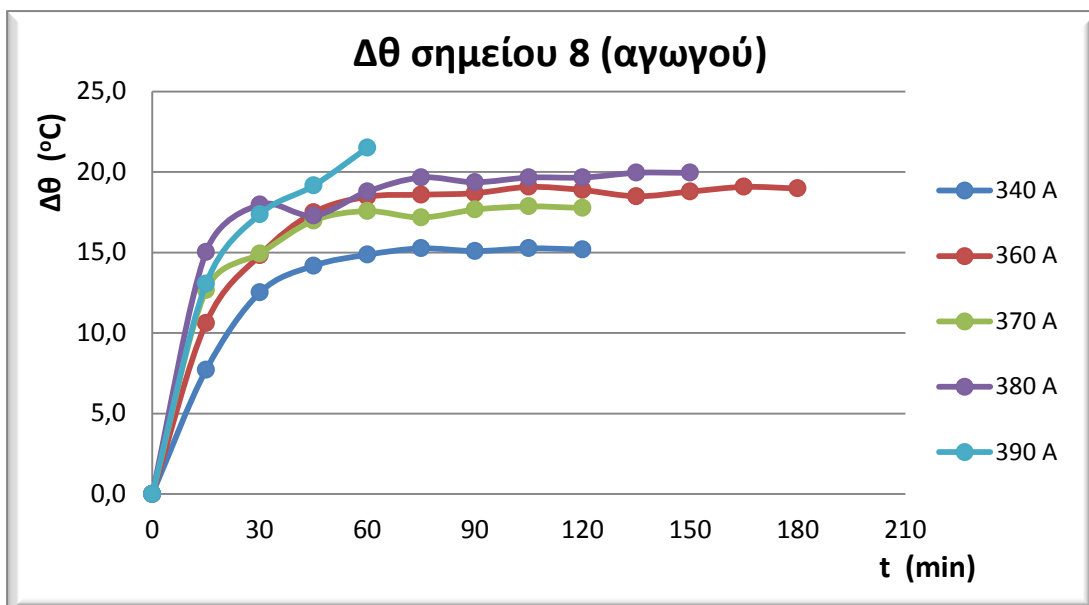
Σχήμα 4.2-5: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 5



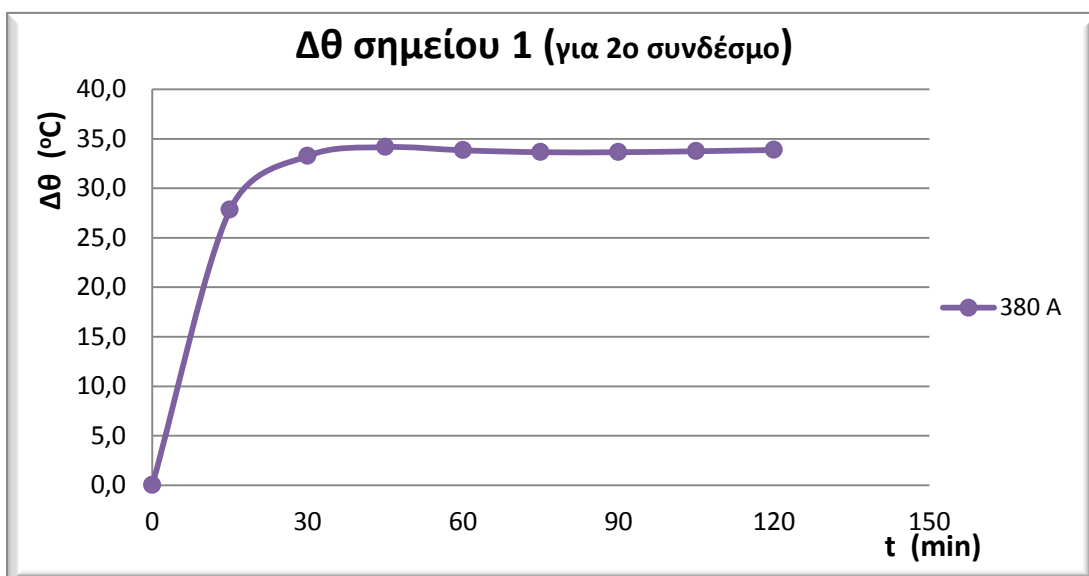
Σχήμα 4.2-6: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 6



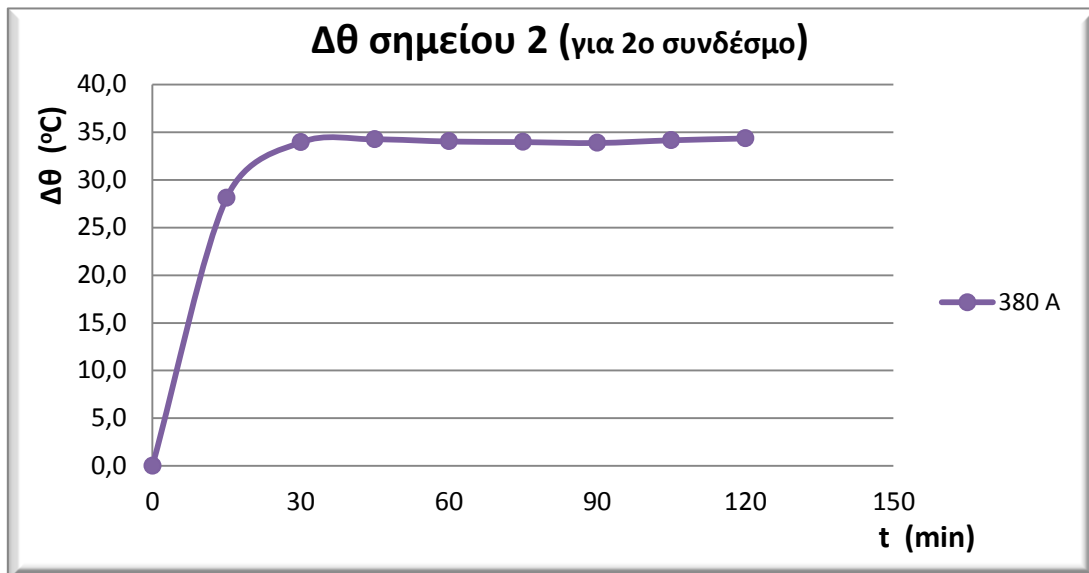
Σχήμα 4.2-7: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 7 (αγωγού)



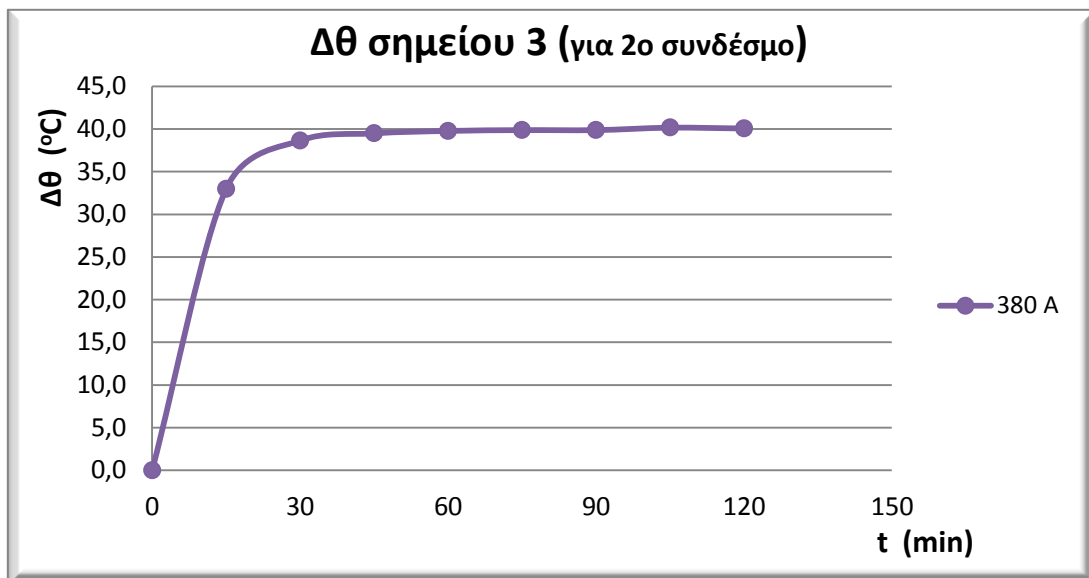
Σχήμα 4.2-8: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 8 (αγωγού)



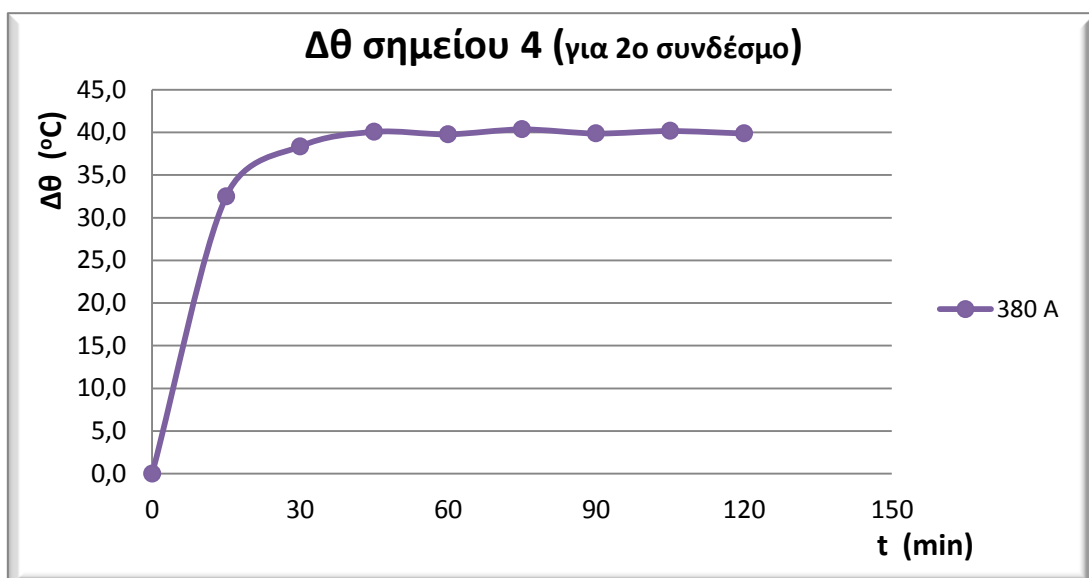
Σχήμα 4.2-9: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 1 για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



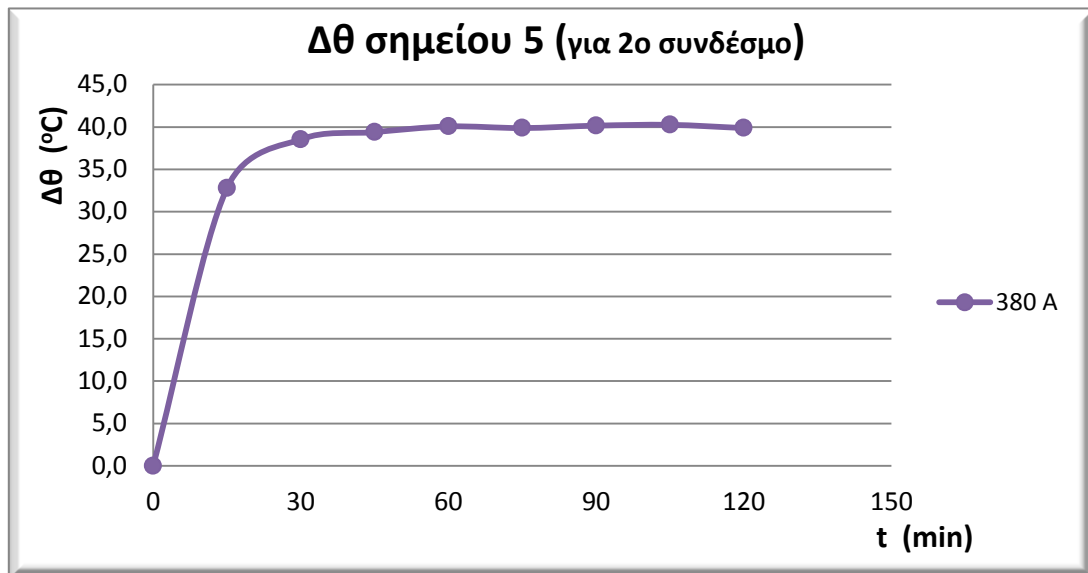
Σχήμα 4.2-10: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 2 για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



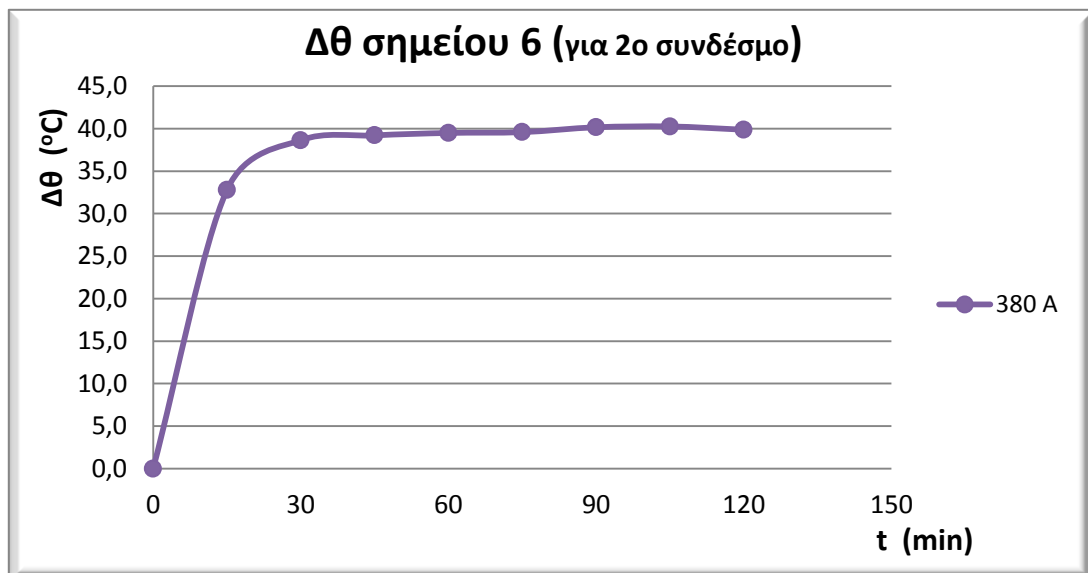
Σχήμα 4.2-11: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 3 για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



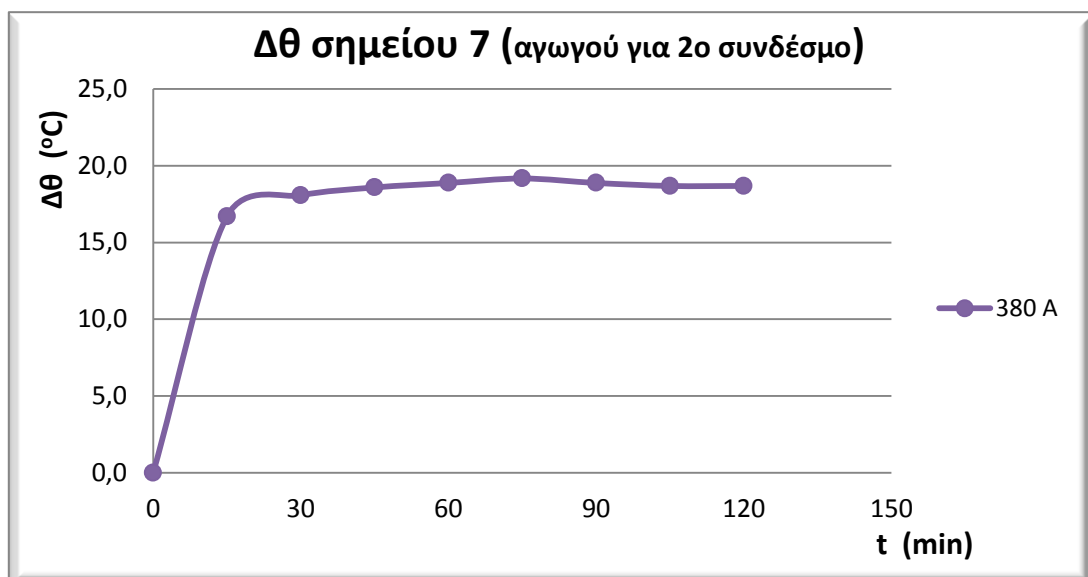
Σχήμα 4.2-12: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 4 για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



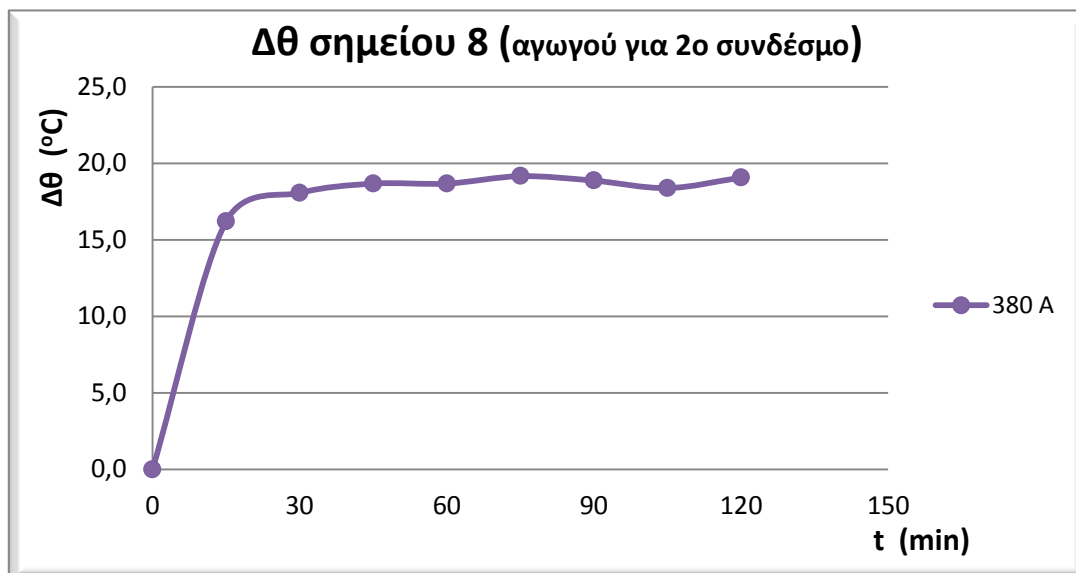
Σχήμα 4.2-13: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 5 για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



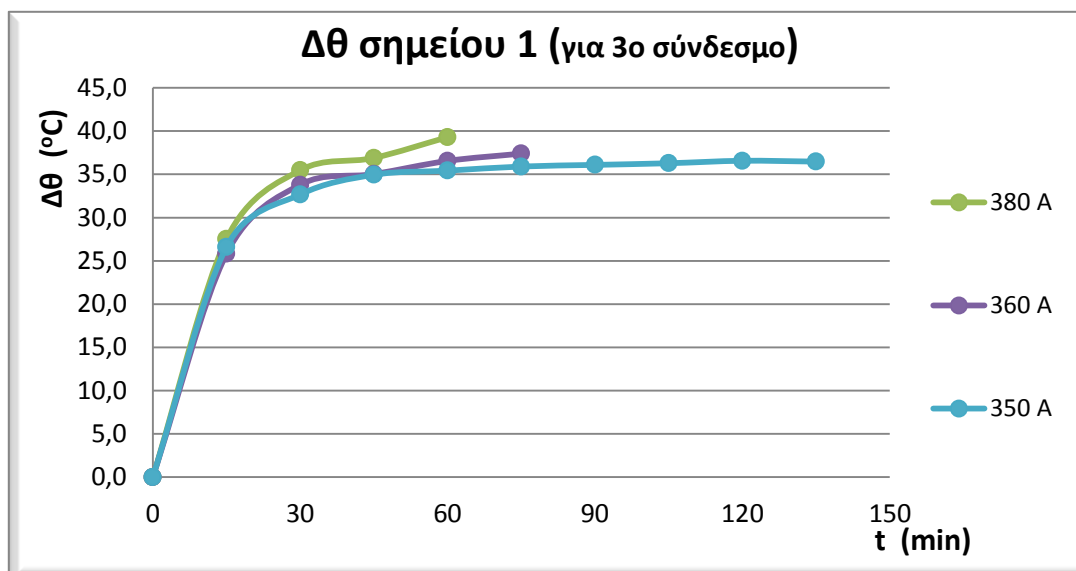
Σχήμα 4.2-14: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 6 για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



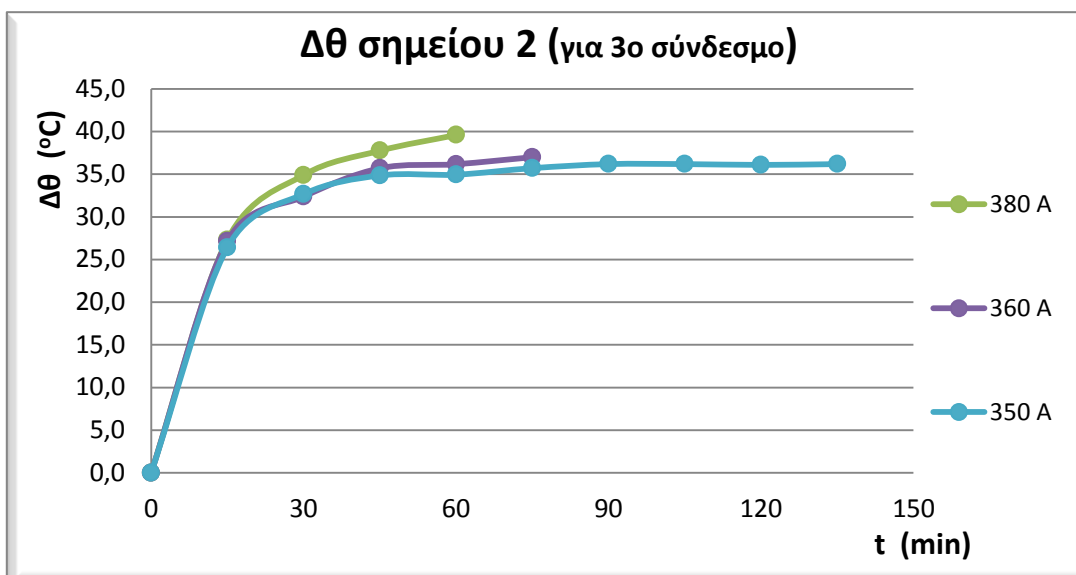
Σχήμα 4.2-15: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 7 (αγωγού) για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



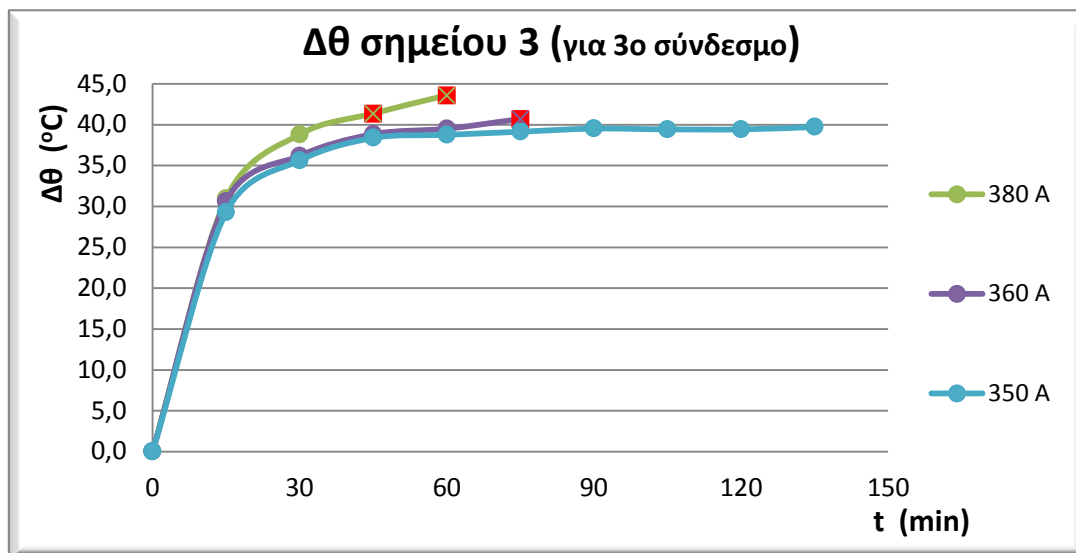
Σχήμα 4.2-16: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 8 (αγωγού) για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



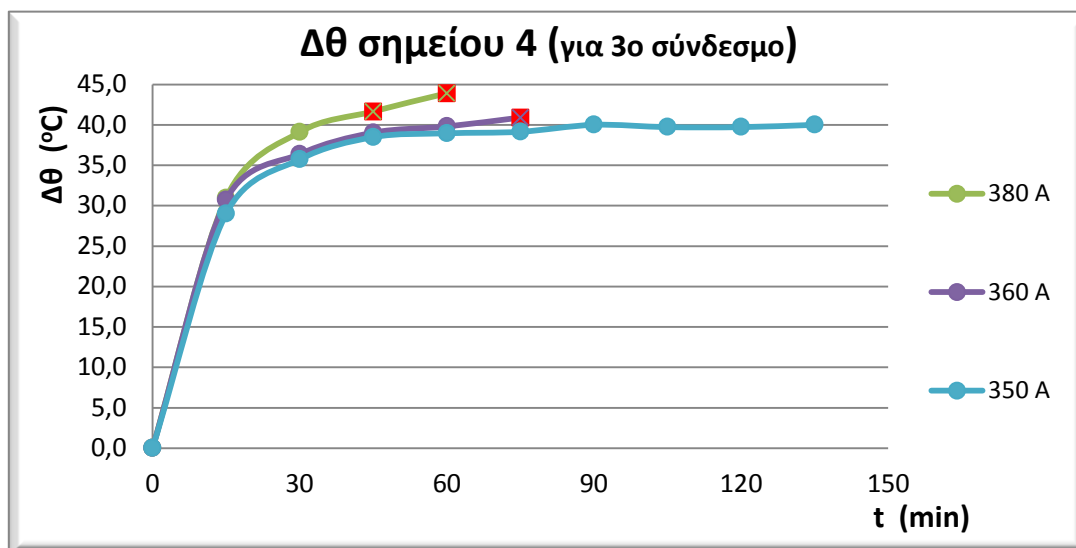
Σχήμα 4.2-17: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 1 για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



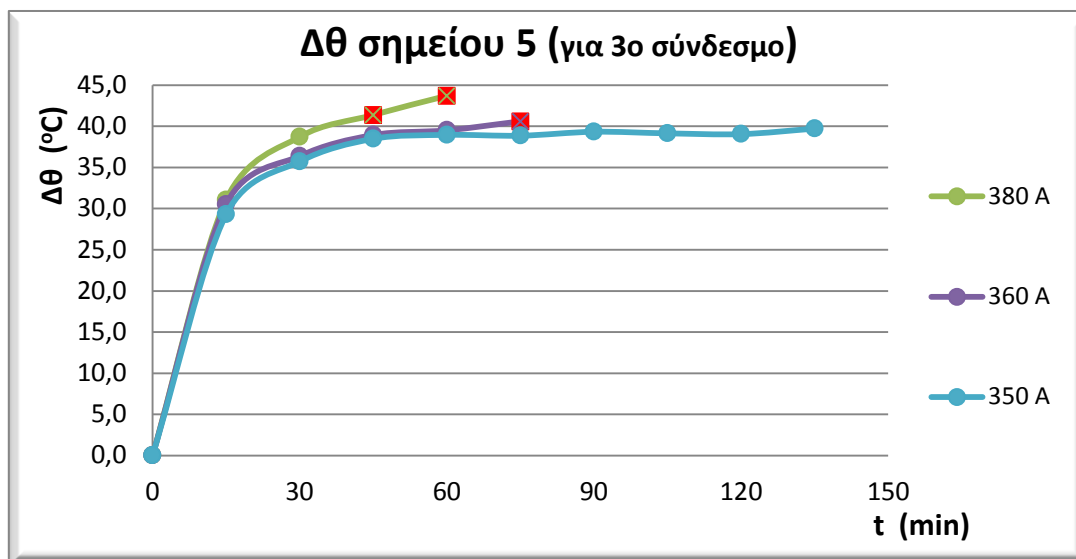
Σχήμα 4.2-18: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 2 για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



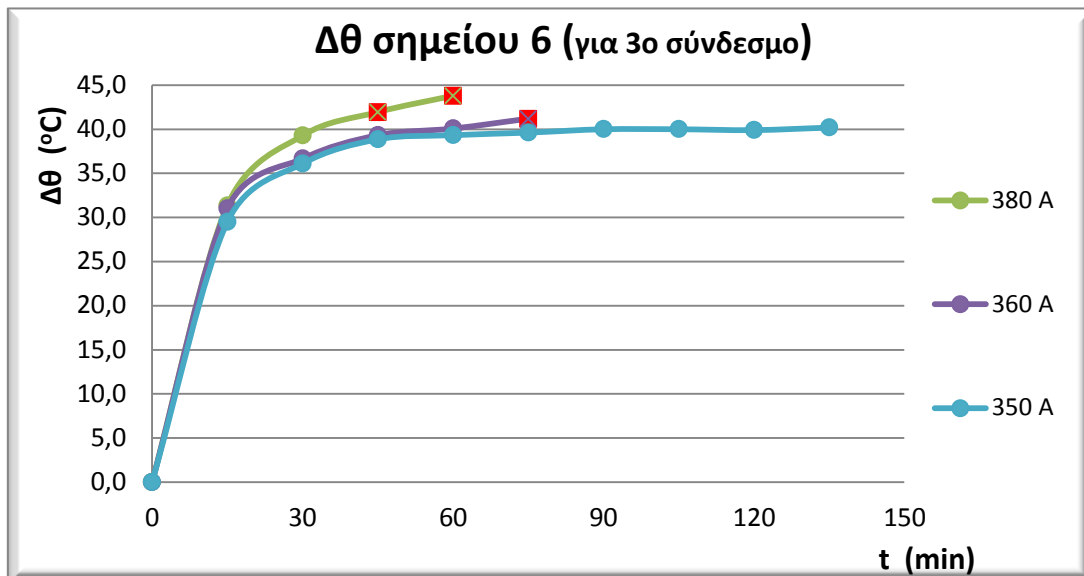
Σχήμα 4.2-19: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 3 για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



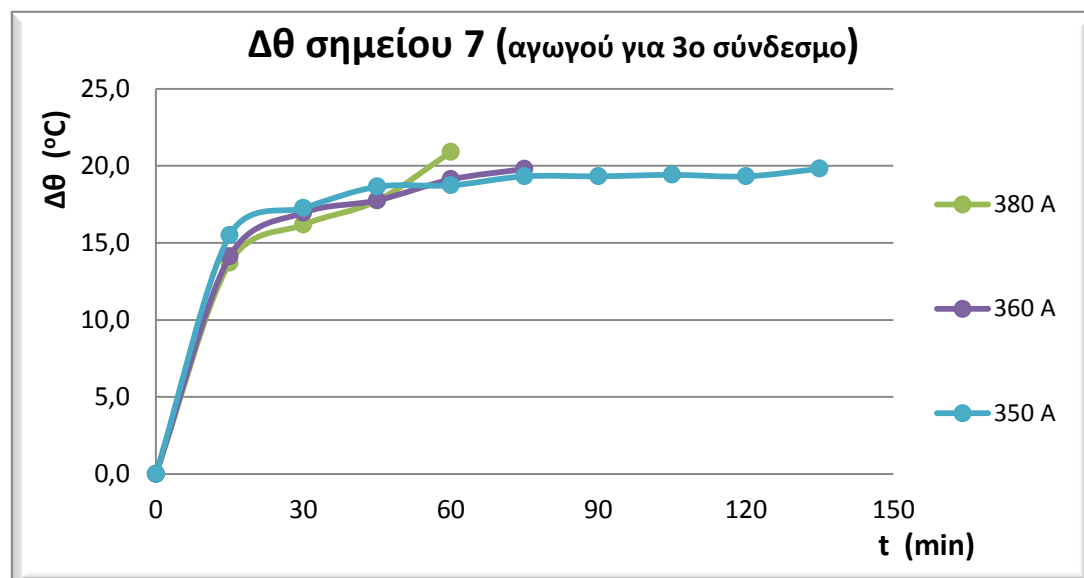
Σχήμα 4.2-20: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 4 για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



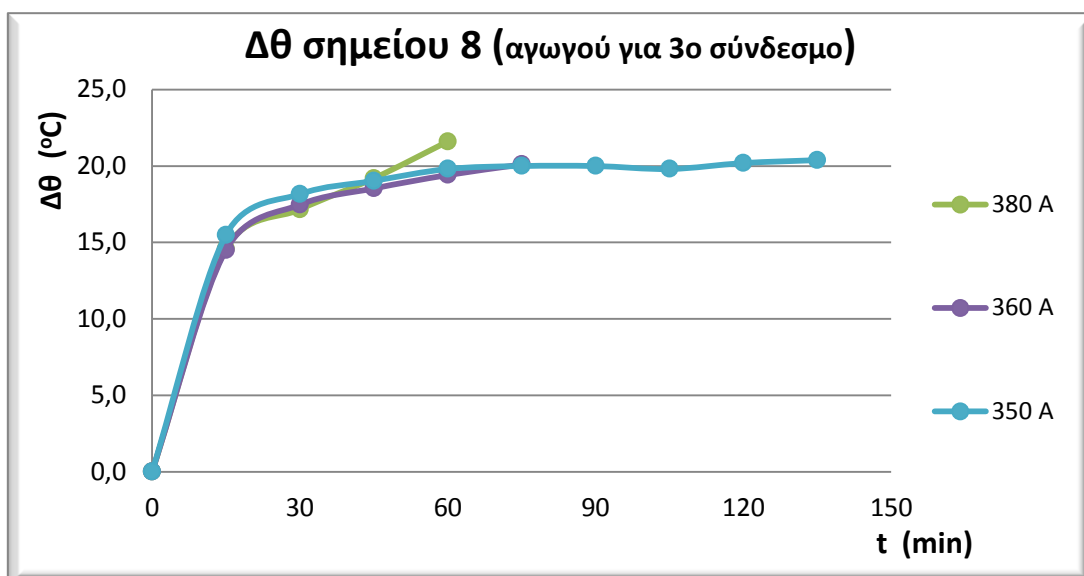
Σχήμα 4.2-21: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 5 για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



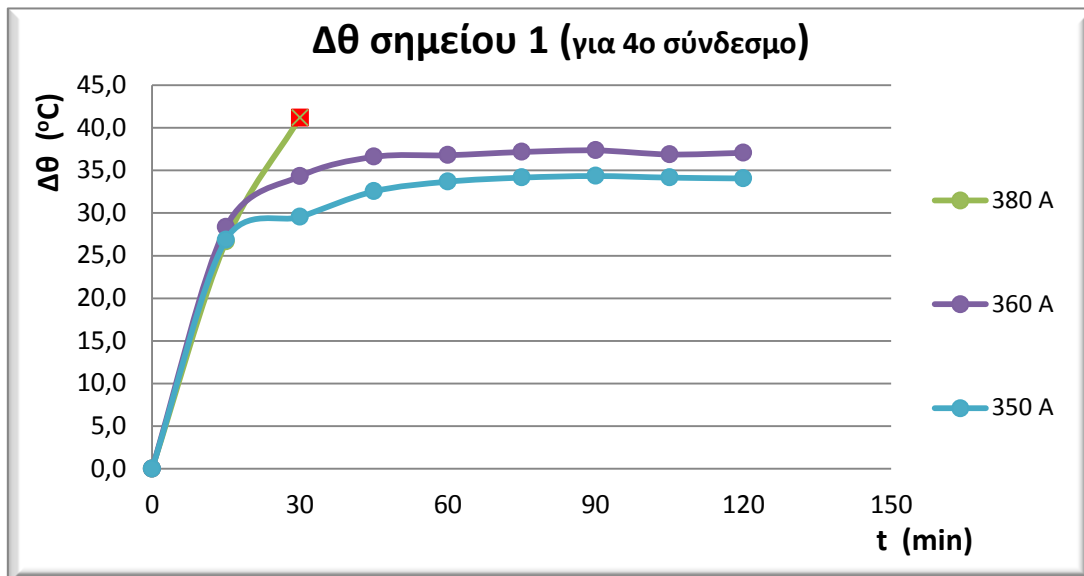
Σχήμα 4.2-22: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 6 για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



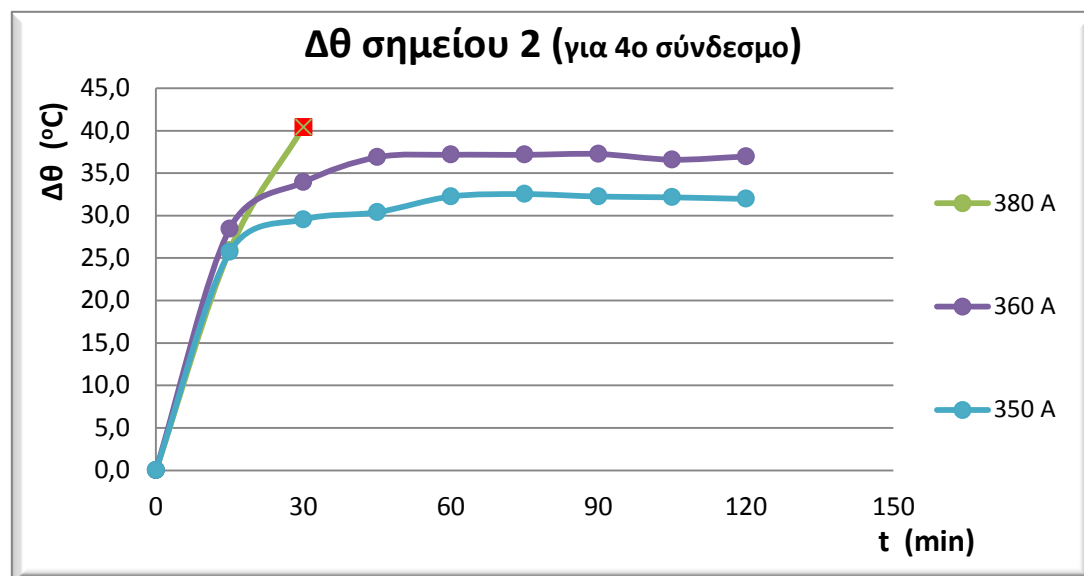
Σχήμα 4.2-23: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 7 (αγωγού) για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



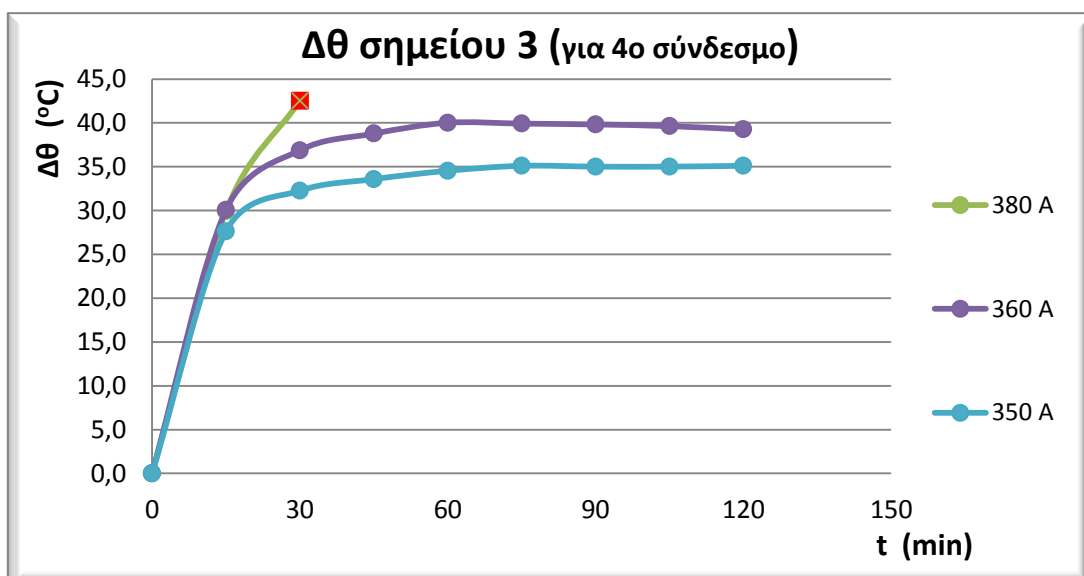
Σχήμα 4.2-24: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 8 (αγωγού) για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



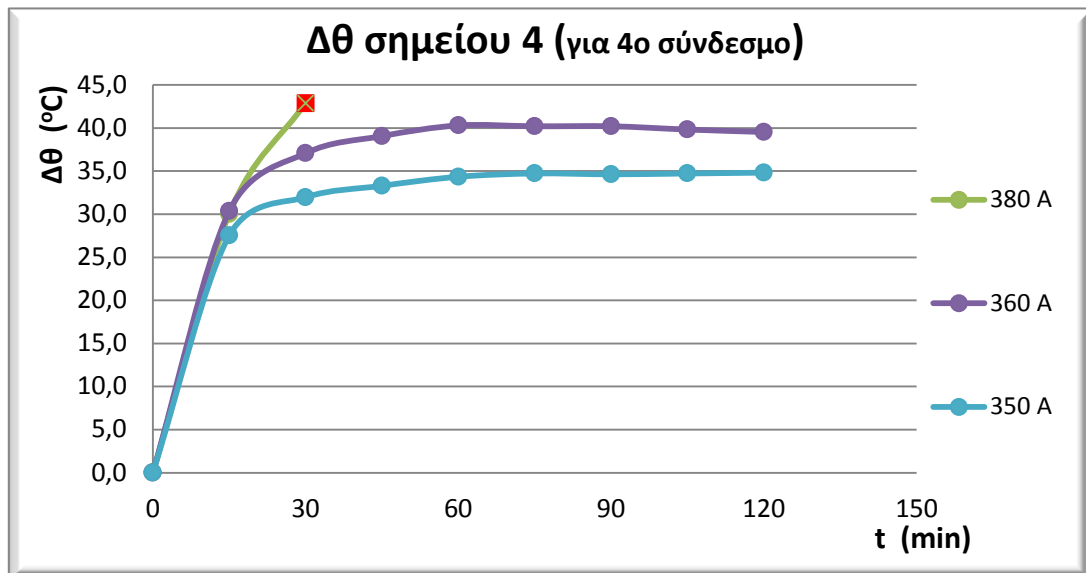
Σχήμα 4.2-25: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 1 για 4^ο ομοειδή σύνδεσμο



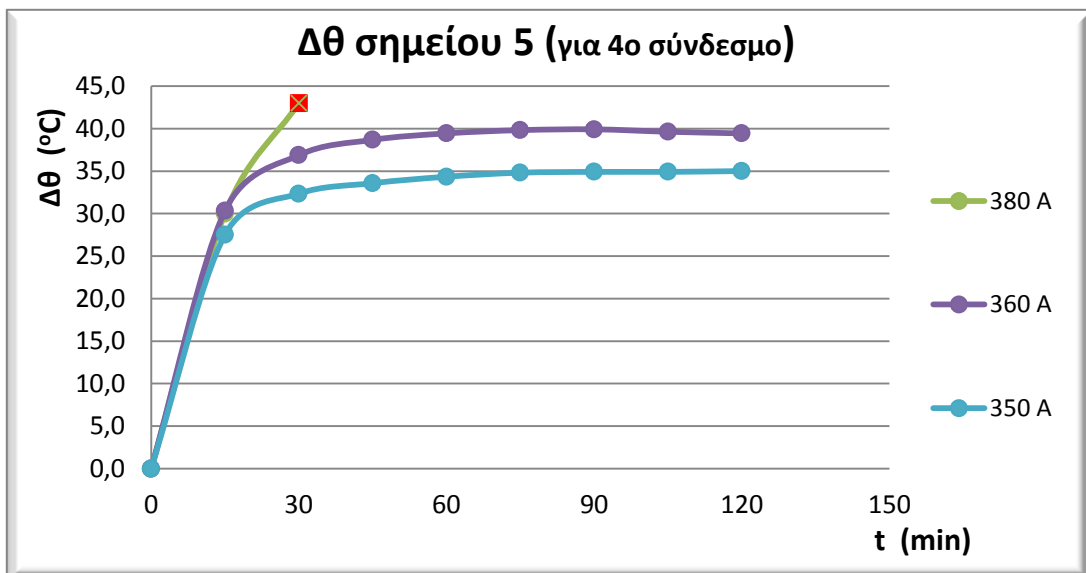
Σχήμα 4.2-26: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 2 για 4^ο ομοειδή σύνδεσμο



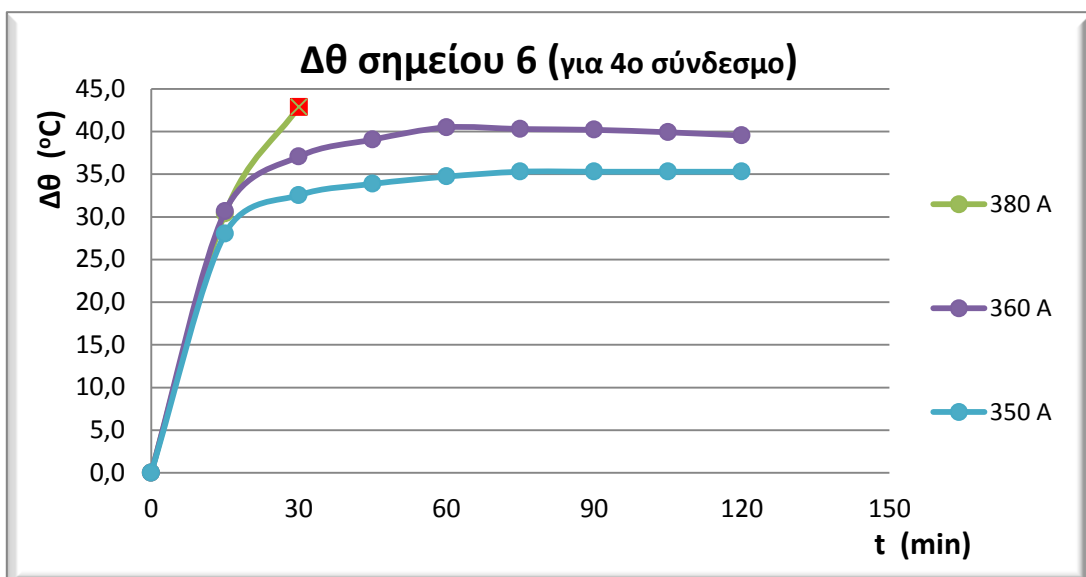
Σχήμα 4.2-27: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 3 για 4^ο ομοειδή σύνδεσμο



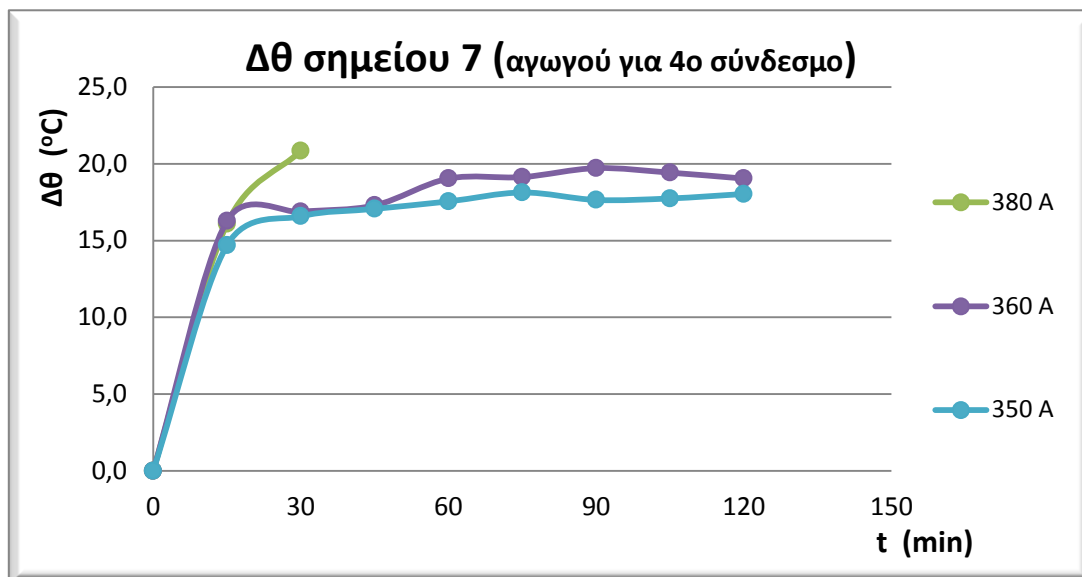
Σχήμα 4.2-28: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 4 για 4^ο ομοειδή σύνδεσμο



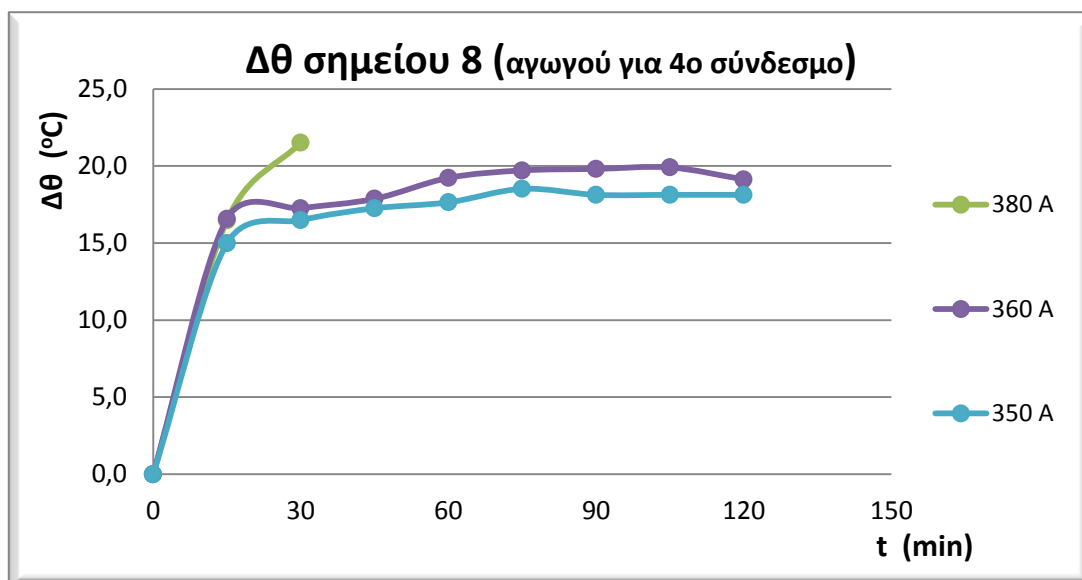
Σχήμα 4.2-29: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 5 για 4^ο ομοειδή σύνδεσμο



Σχήμα 4.2-30: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 6 για 4^ο ομοειδή σύνδεσμο

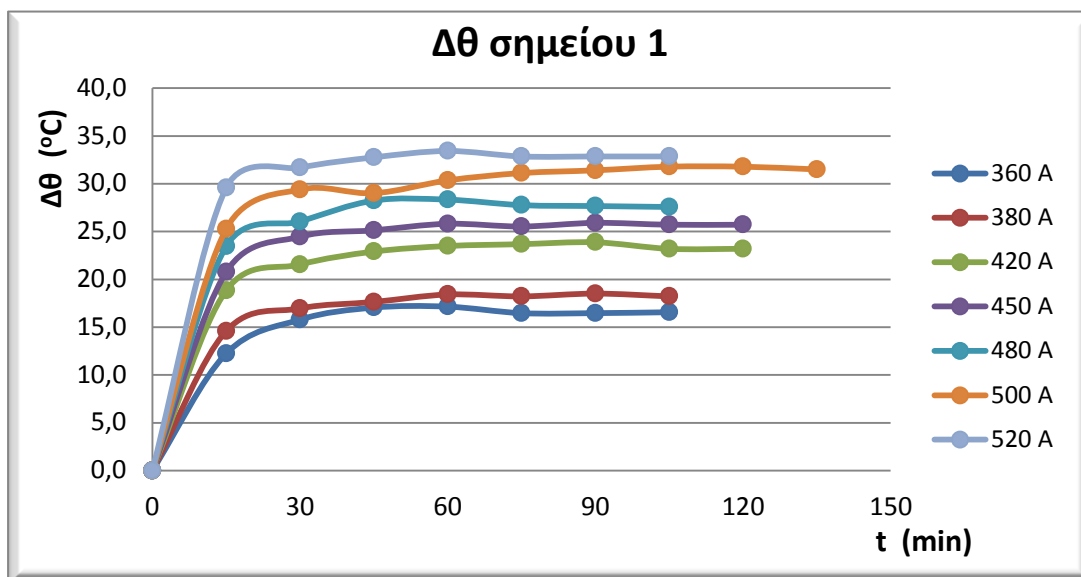


Σχήμα 4.2-31: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 7 (αγωγού) για 4^ο ομοειδή σύνδεσμο

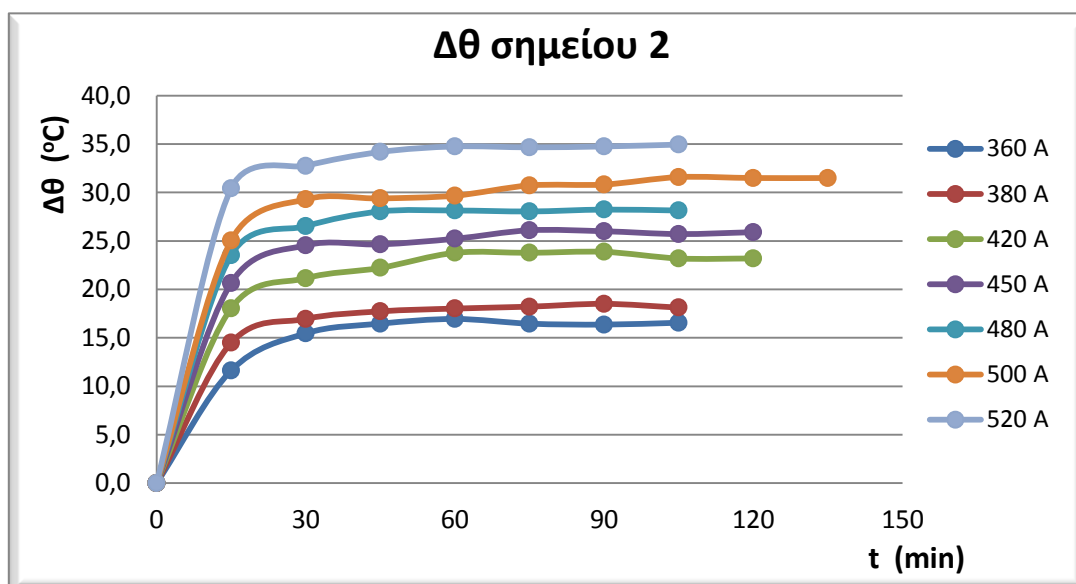


Σχήμα 4.2-32: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 8 (αγωγού) για 4^ο ομοειδή σύνδεσμο

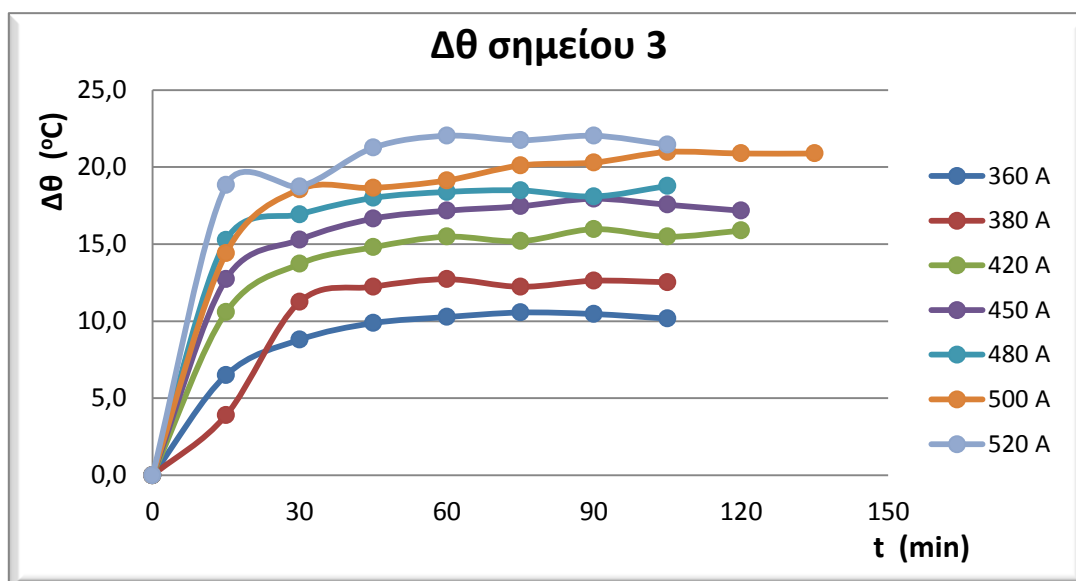
4.3 Μετρήσεις για σύνδεσμο πλάκας-αγωγού



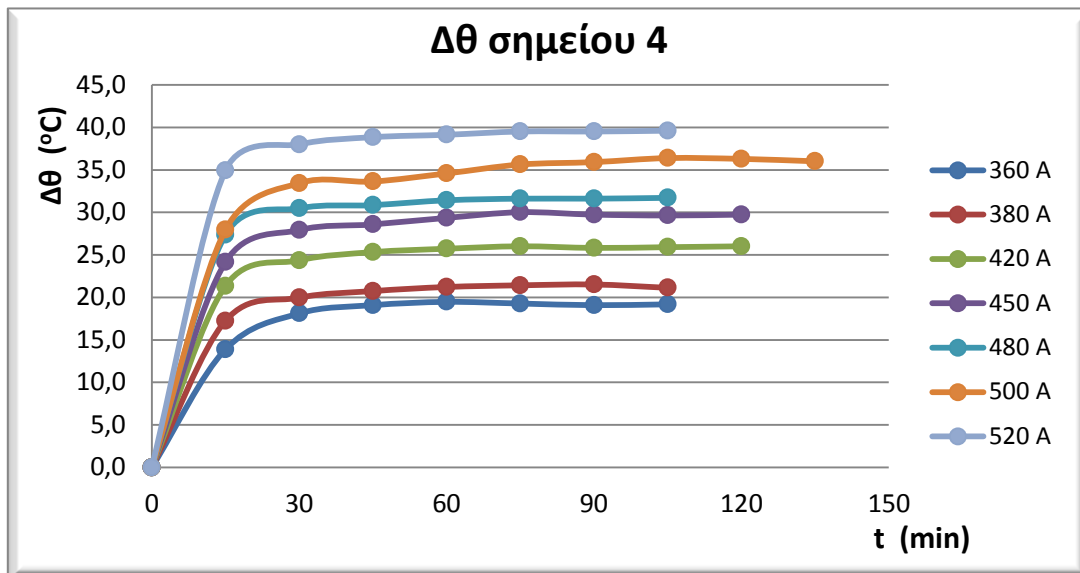
Σχήμα 4.3-1: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 1



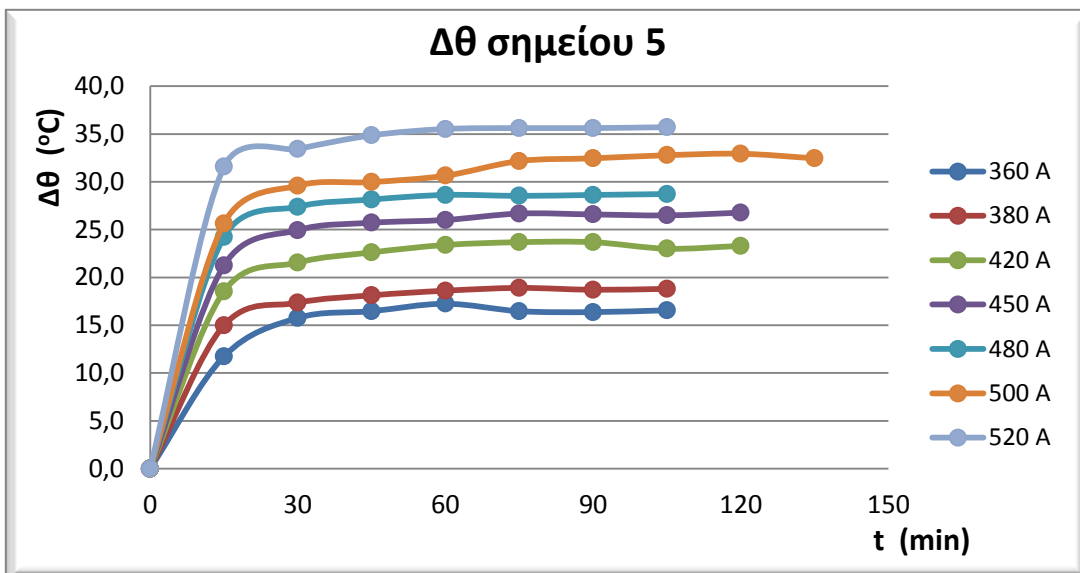
Σχήμα 4.3-2: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 2



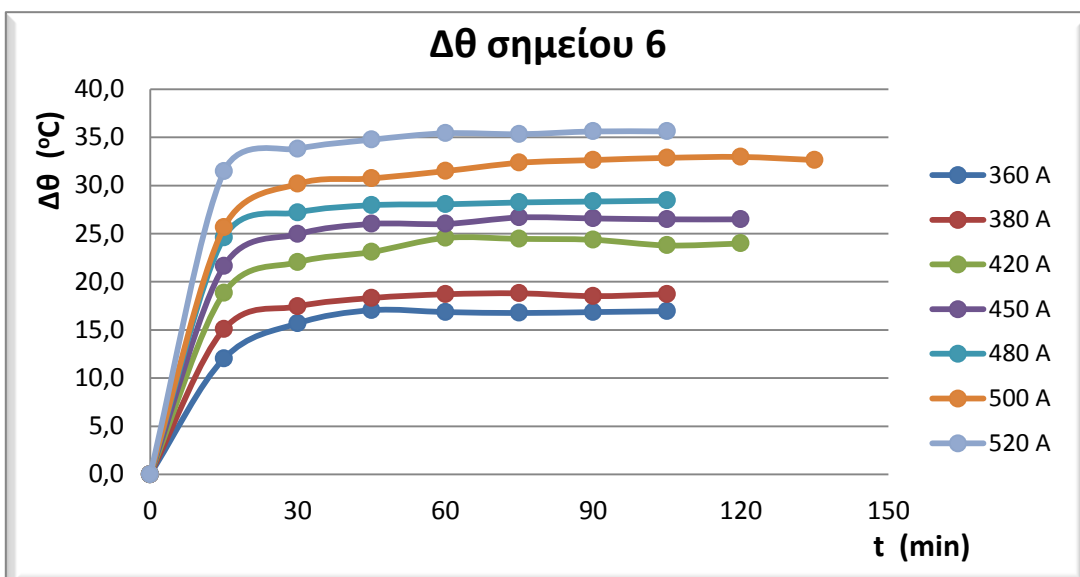
Σχήμα 4.3-3: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 3



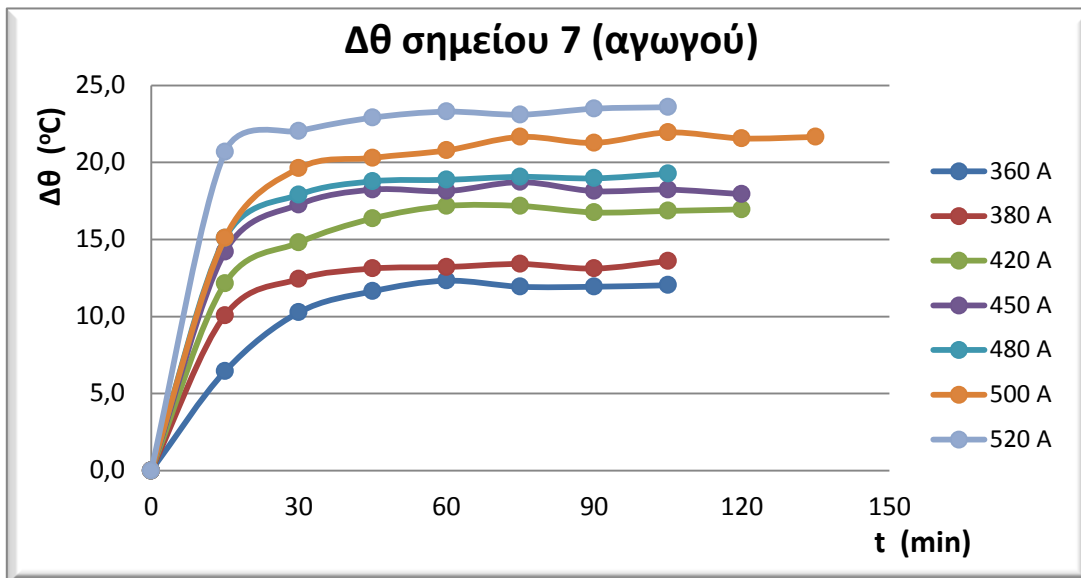
Σχήμα 4.3-4: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 4



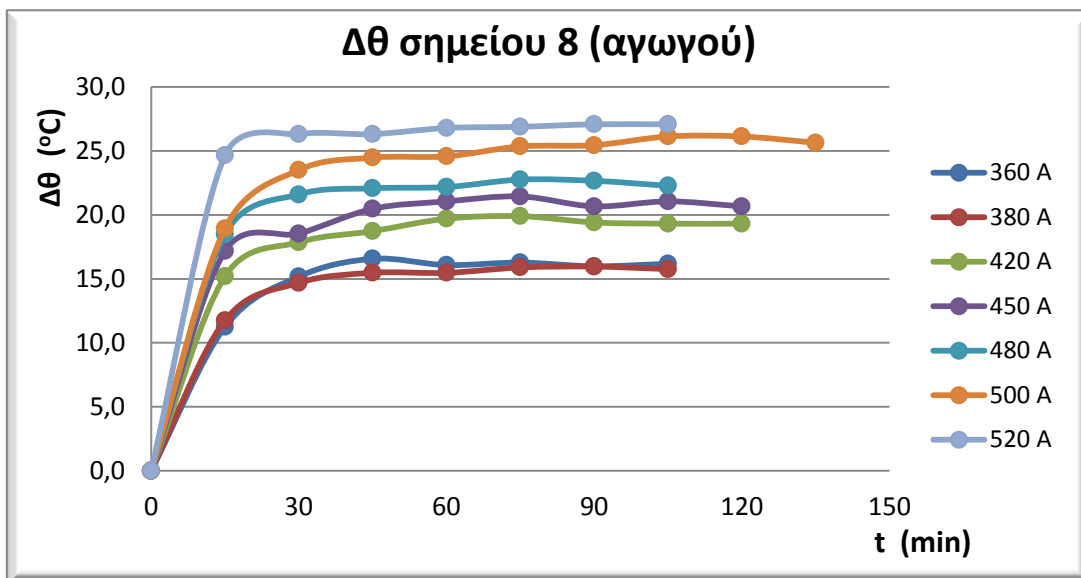
Σχήμα 4.3-5: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 5



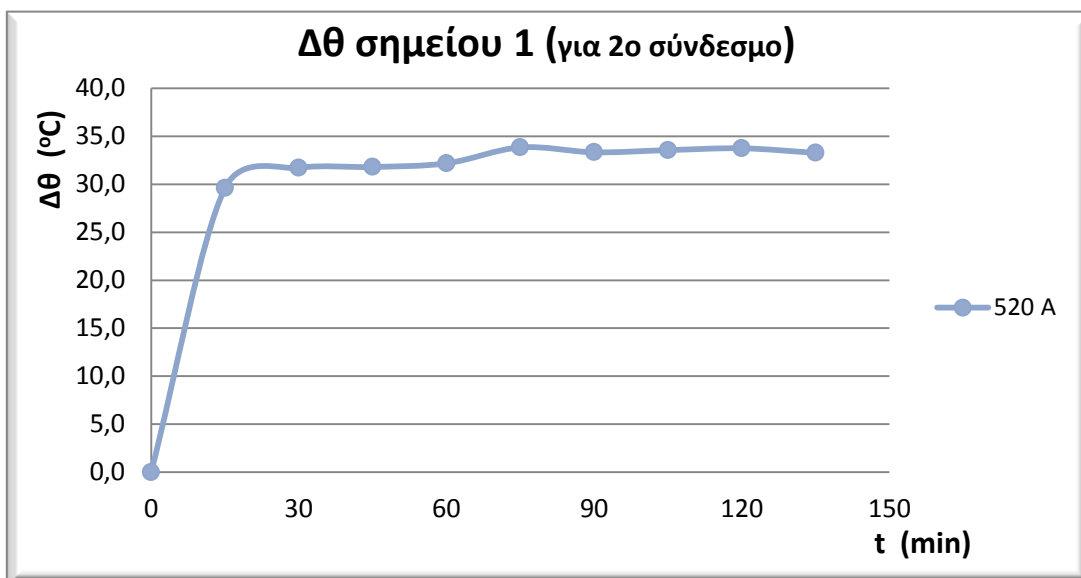
Σχήμα 4.3-6: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 6



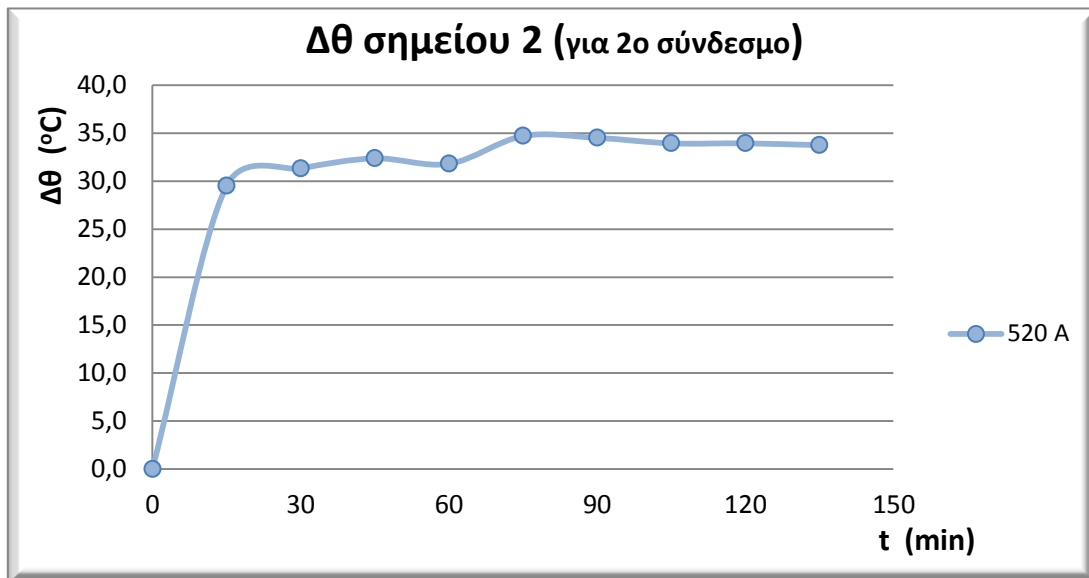
Σχήμα 4.3-7: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 7 (αγωγού)



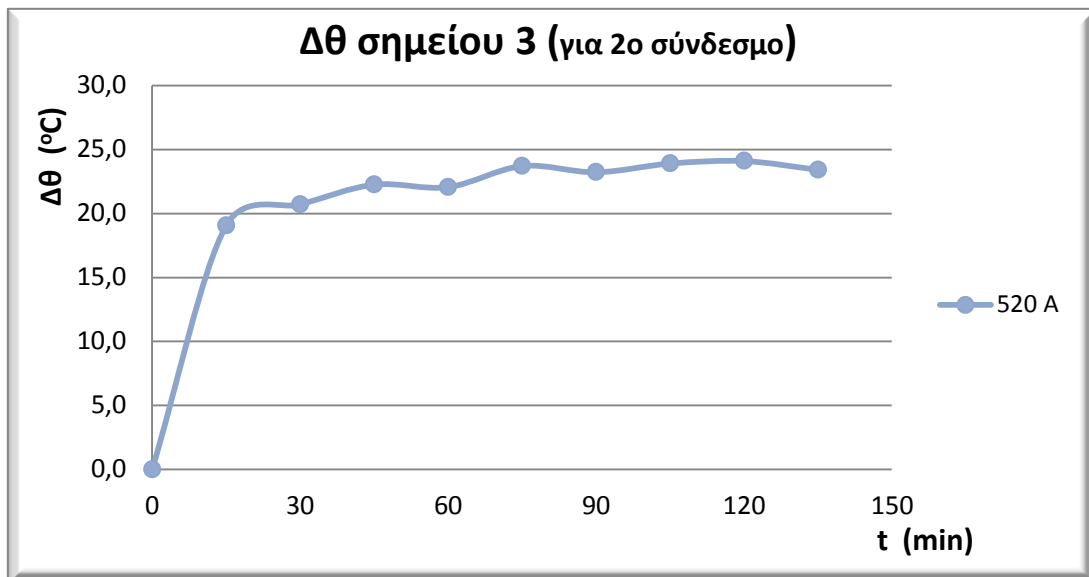
Σχήμα 4.3-8: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 8 (αγωγού)



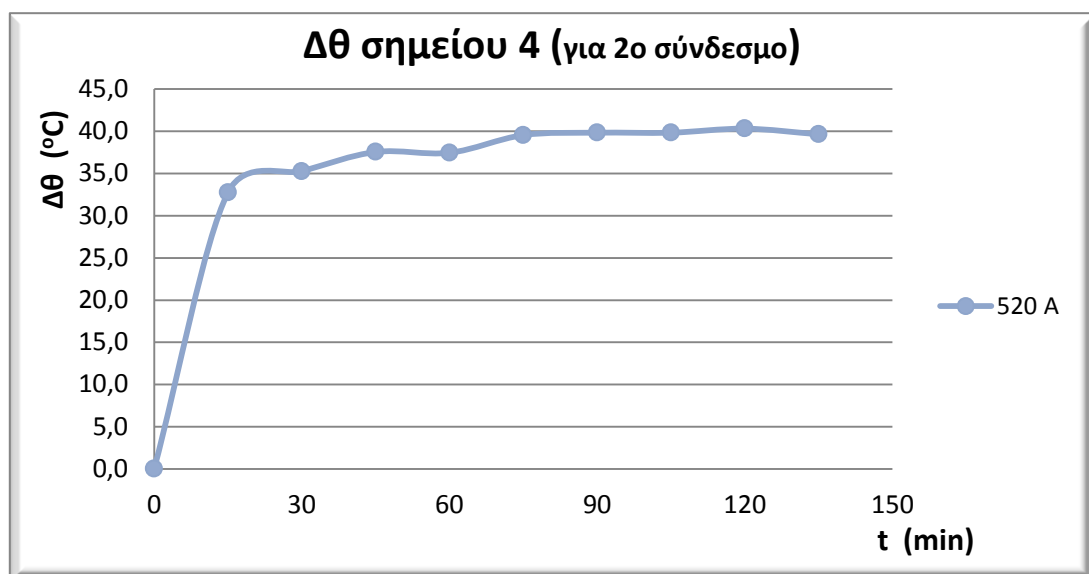
Σχήμα 4.3-9: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 1 για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



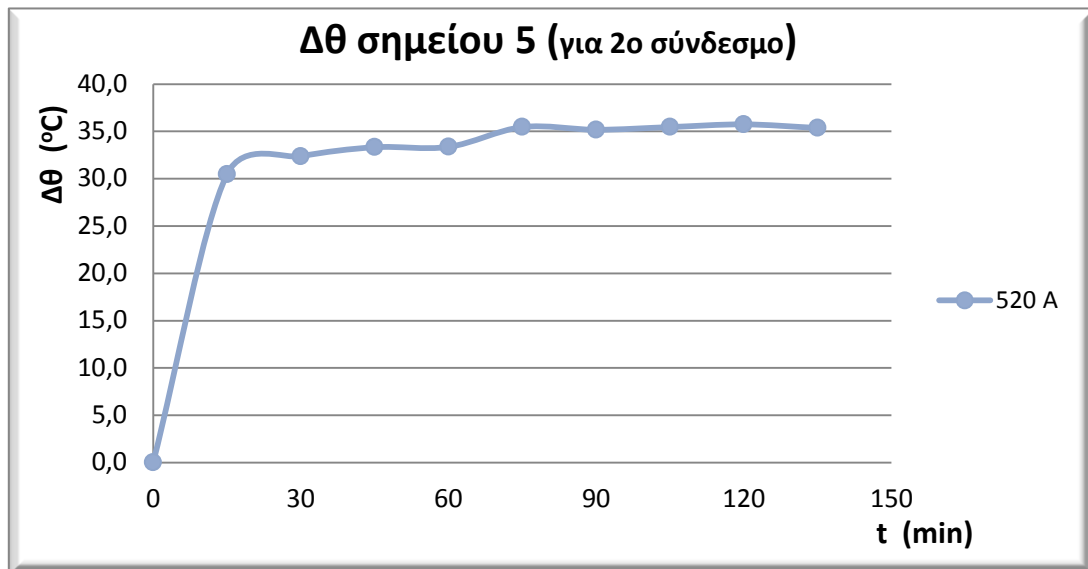
Σχήμα 4.3-10: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 2 για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



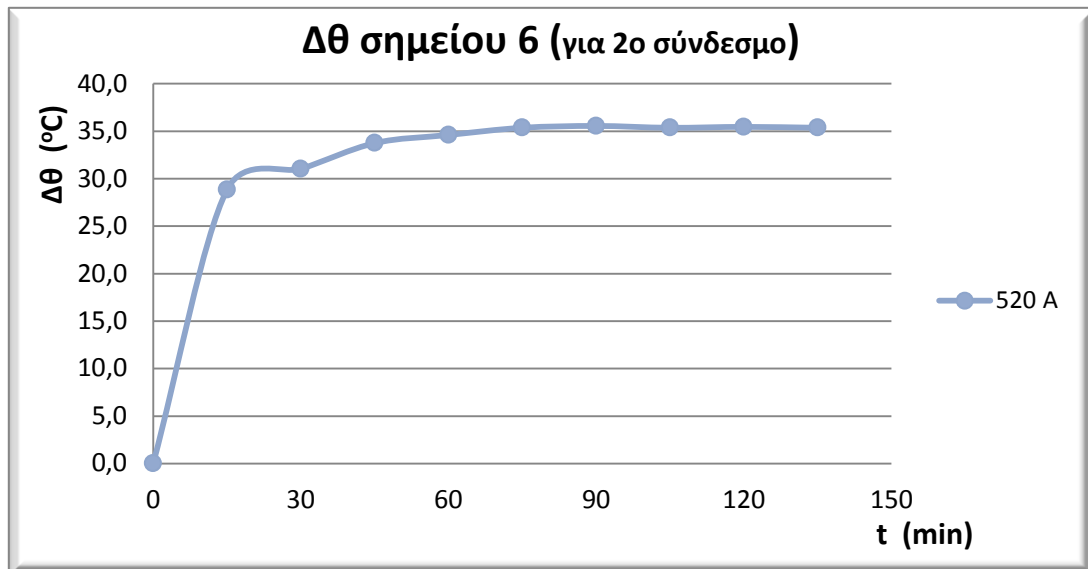
Σχήμα 4.3-11: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 3 για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



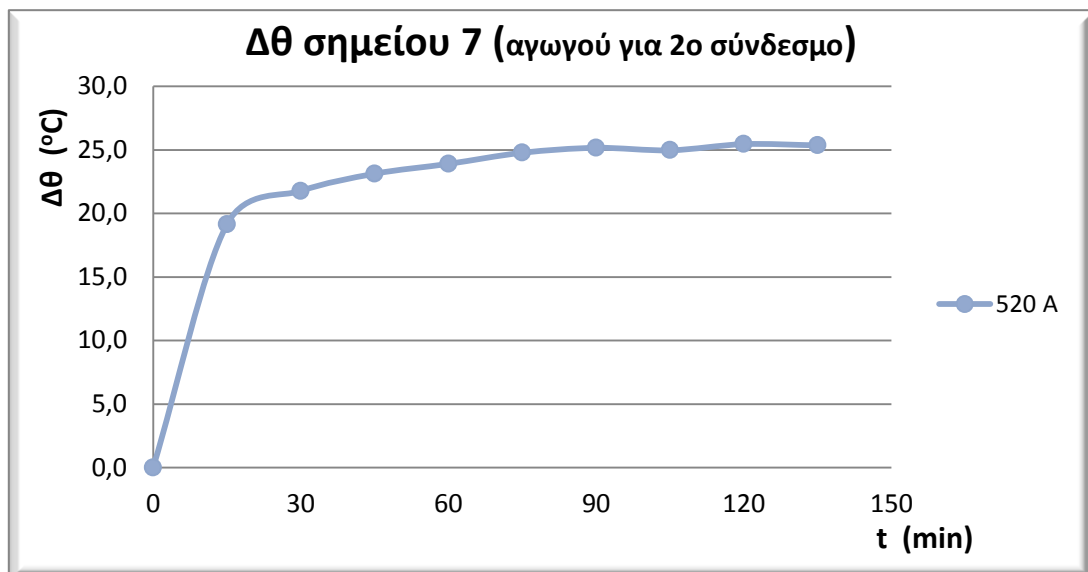
Σχήμα 4.3-12: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 4 για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



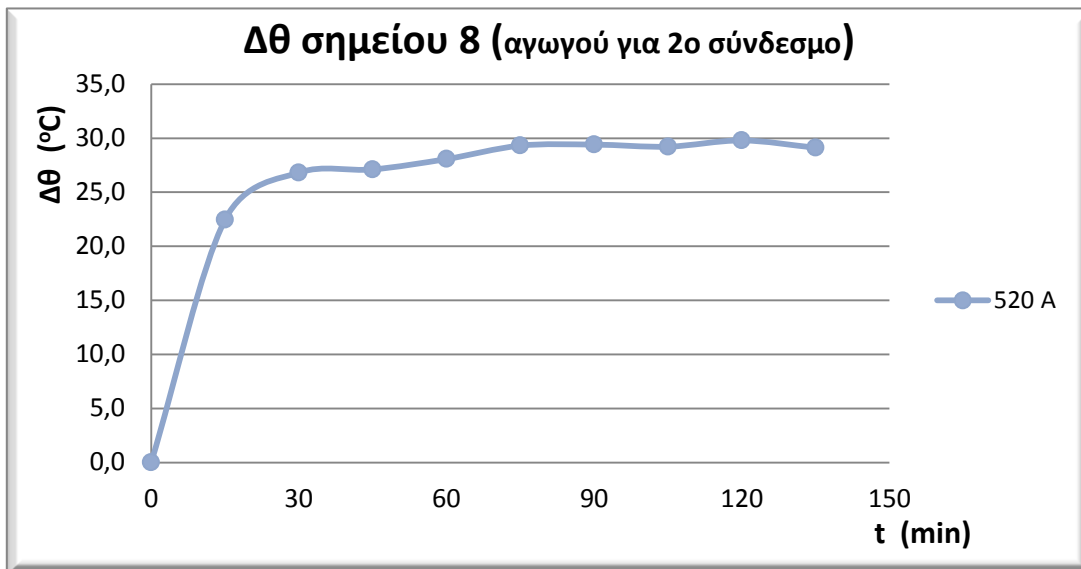
Σχήμα 4.3-13: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 5 για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



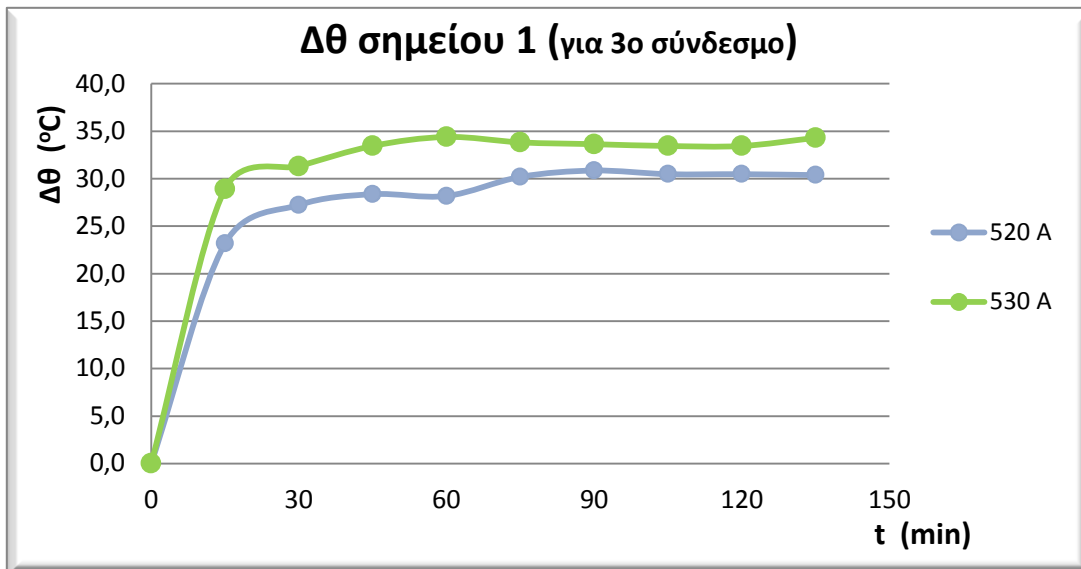
Σχήμα 4.3-14: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 6 για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



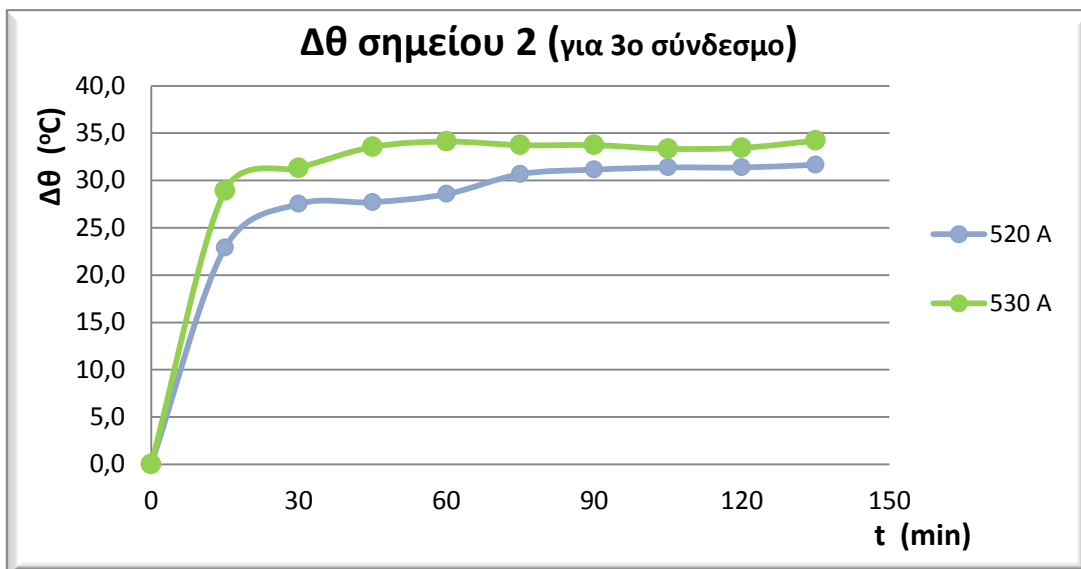
Σχήμα 4.3-15: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 7 (αγωγού) για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



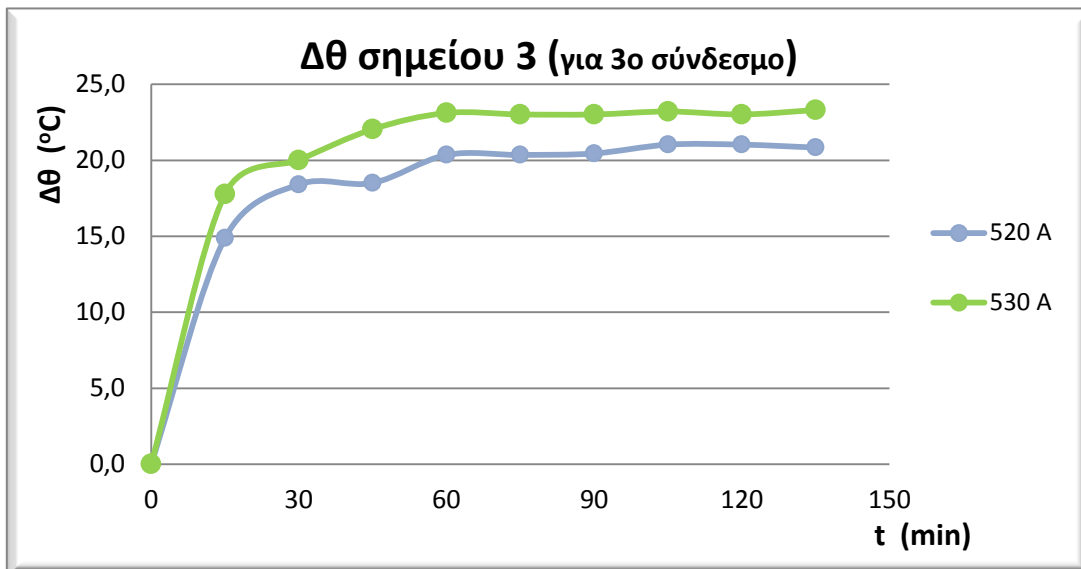
Σχήμα 4.3-16: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 8 (αγωγού) για 2^ο ομοειδή σύνδεσμο



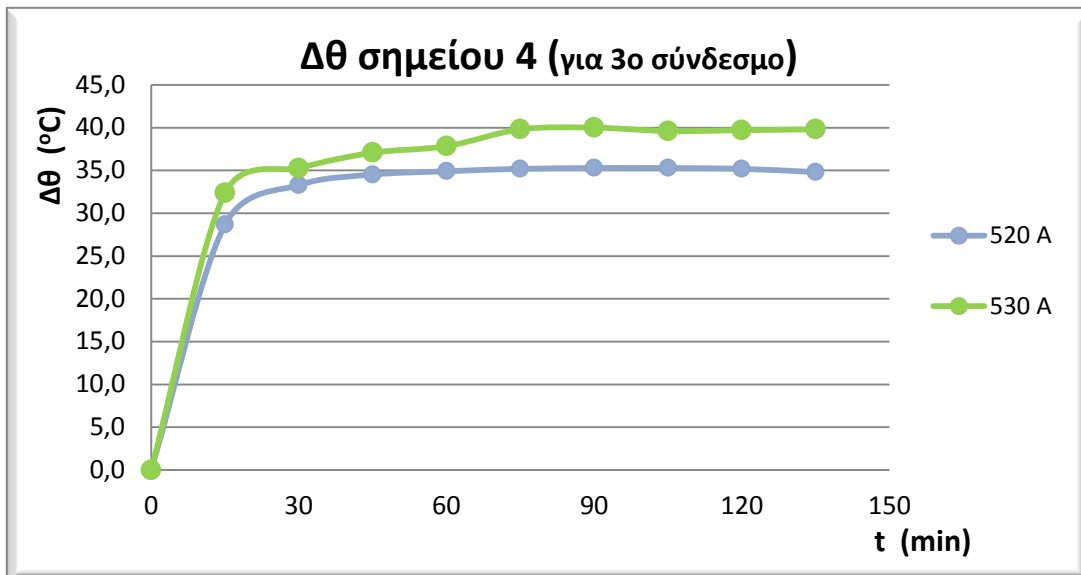
Σχήμα 4.3-17: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 1 για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



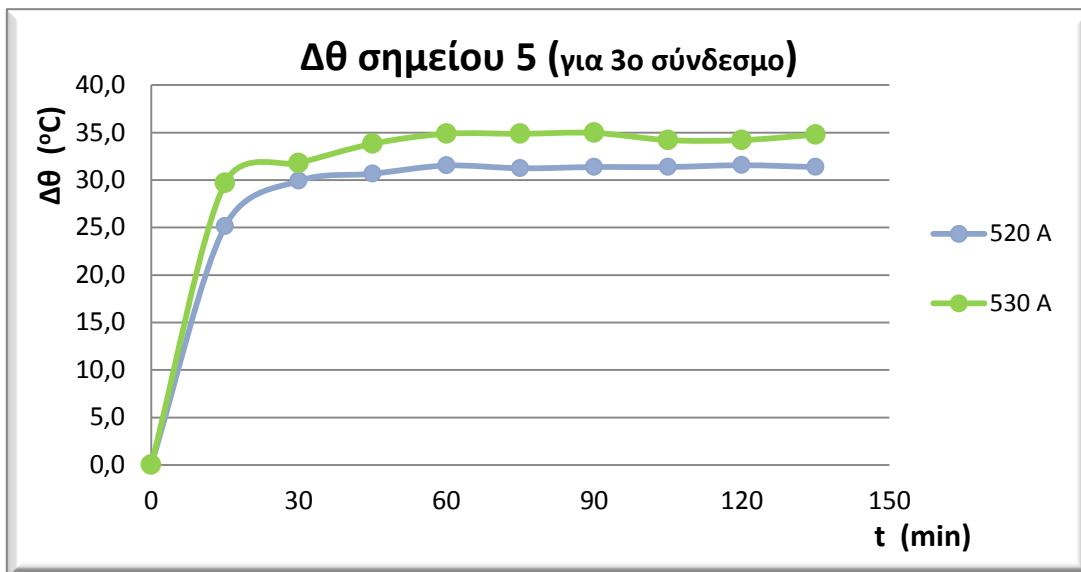
Σχήμα 4.3-18: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 2 για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



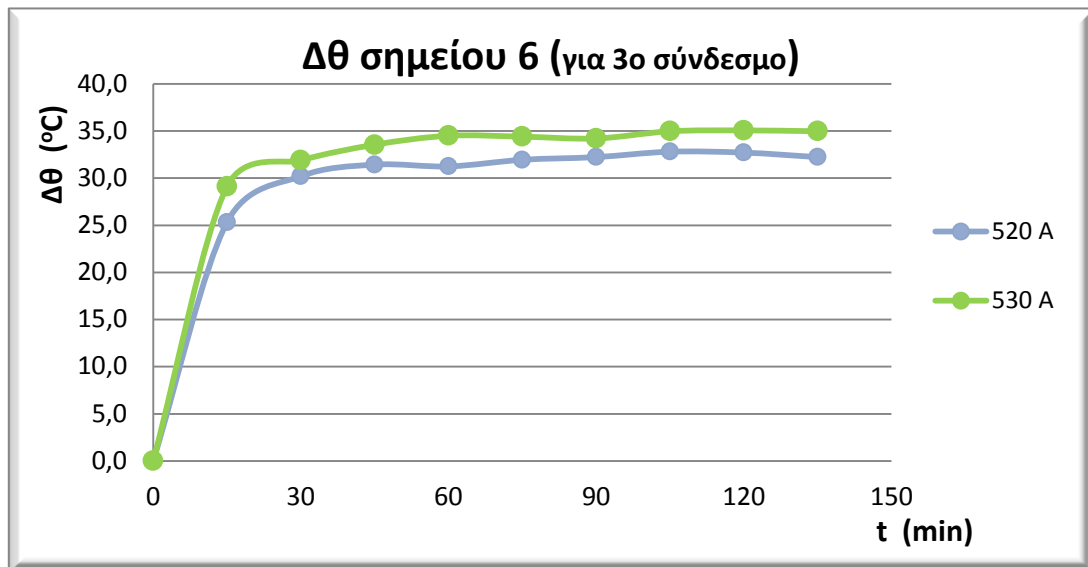
Σχήμα 4.3-19: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 3 για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



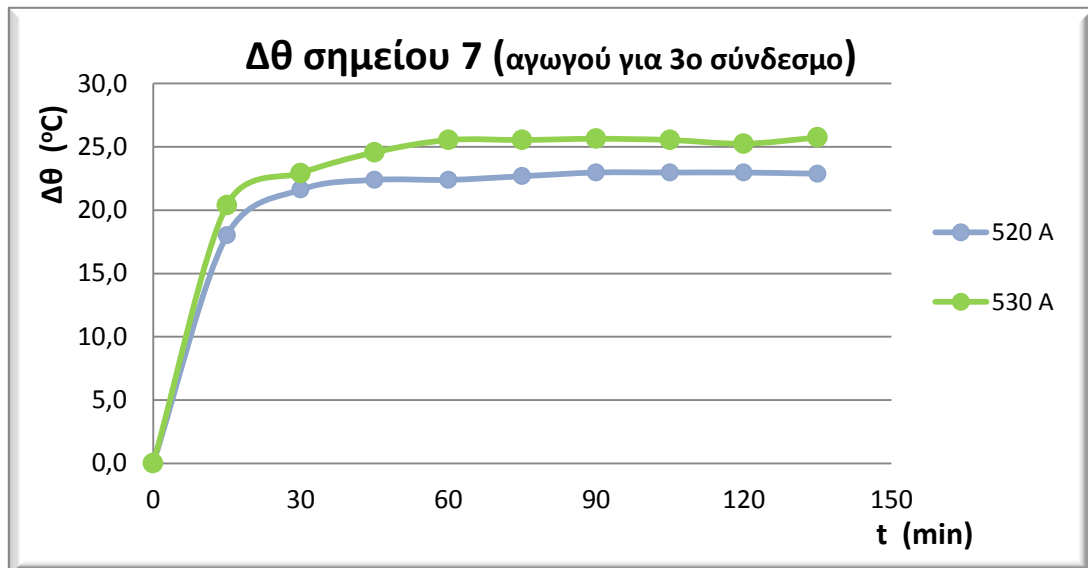
Σχήμα 4.3-20: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 4 για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



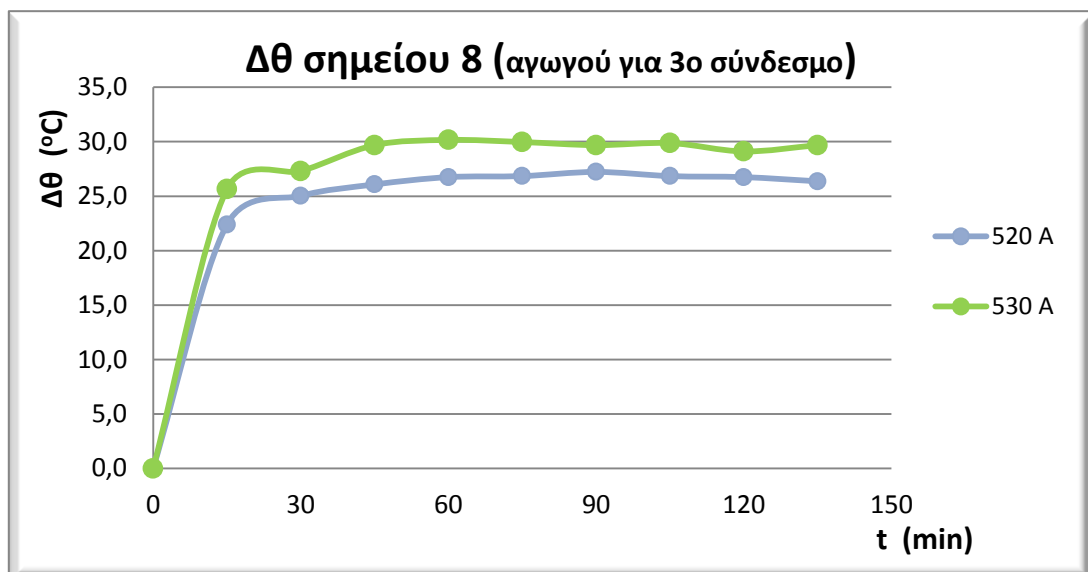
Σχήμα 4.3-21: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 5 για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



Σχήμα 4.3-22: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 6 για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



Σχήμα 4.3-23: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 7 (αγωγού) για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο



Σχήμα 4.3-24: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον σημείου 8 (αγωγού) για 3^ο ομοειδή σύνδεσμο

5. Σχόλια και Συμπεράσματα

Λαμβάνοντας υπόψη τα γραφήματα που παρατέθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο καθώς και τους αναλυτικότερους πίνακες του παραρτήματος Α μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά τόσο τους συνδέσμους μέσης τάσης, ένα δείγμα των οποίων ήταν το αντικείμενο μελέτης της εργασίας αυτής, όσο και το συνολικό δίκτυο διανομής της μέσης τάσης.

5.1 Ονομαστικό ρεύμα υπό εξέταση συνδέσμων

Οι μετρήσεις οι οποίες ενδιαφέρουν ιδιαίτερα είναι οι τιμές της θερμοκρασίας στους ηλεκτρικούς συνδέσμους, οι οποίοι αποτέλεσαν και το αντικείμενο μελέτης. Παρατηρείται, λοιπόν ότι:

- ❖ για τον εξεταζόμενο σύνδεσμο RIVIMETAL GR-261A (ACSR 95 – ACSR 16-50) το ονομαστικό ρεύμα εντοπίστηκε περίπου στα 380 A. Το συγκεκριμένο ρεύμα, όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα, εξετάστηκε και για 2 ακόμα συνδέσμους, οι οποίοι επαλήθευσαν τα ευρήματα της μέτρησης του πρώτου συνδέσμου, καθώς εμφάνισαν παρόμοια θερμοκρασιακή συμπεριφορά.
- ❖ για το σύνδεσμο SL B3 (I AL35-70 – II AL16-50) το ονομαστικό ρεύμα του πρώτου εξεταζόμενου συνδέσμου εντοπίστηκε κοντά στα 380 A, ομοίως και του δεύτερου. Κατά την εξέταση του τρίτου ίδιου συνδέσμου παρατηρήθηκε διαφορετική θερμοκρασιακή αντίδραση στα 380 A και το ονομαστικό ρεύμα εντοπίστηκε στα 350 A. Γι' αυτό το λόγο, θεωρήθηκε σκόπιμο να επανεκτελεστεί η δοκιμή υπερθέρμανσης για έναν τέταρτο σύνδεσμο, στον οποίο το ονομαστικό ρεύμα μετρήθηκε στα 360 A.
- ❖ για το σύνδεσμο πλάκας-αγωγού το ονομαστικό ρεύμα του πρώτου εξεταζόμενου συνδέσμου εντοπίστηκε στα 520 A, ομοίως και του δεύτερου. Στον τρίτο ομοειδή, όμως, σύνδεσμο που εξετάστηκε το ονομαστικό ρεύμα φάνηκε να ανεβαίνει στα 530 A.

5.2 Διαφορές στο ονομαστικό ρεύμα ίδιων συνδέσμων

Από τα παραπάνω παρατηρείται, αρχικά, ότι το ονομαστικό ρεύμα των συνδέσμων ίδιου είδους μπορεί να ποικίλλει. Το εύρος της διαφοράς, μάλιστα, μεταξύ ίδιων συνδέσμων μπορεί να φτάσει και το 10% των τιμών του ονομαστικού ρεύματος. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι δεν υπάρχουν αυστηρές προδιαγραφές όσον αφορά στο ονομαστικό ρεύμα των συνδέσμων κατά την κατασκευή τους. Από όλα τα παραπάνω, καταδεικνύεται ότι ο ποιοτικός έλεγχος των συνδέσμων πριν τη χρήση τους στο δίκτυο δεν περιλαμβάνει τον καθορισμό ενός συγκεκριμένου ονομαστικού ρεύματος. Αυτό σημαίνει ότι για μεγάλα ρεύματα

διέλευσης, ορισμένοι σύνδεσμοι μπορεί να εμφανίσουν αρκετά υψηλές τιμές θερμοκρασίας, οι οποίες μπορούν να αποδειχθούν βλαπτικές για τη μηχανική και ηλεκτρική αντοχή του.

Αυτό που μπορεί να προταθεί είναι η καθιέρωση μίας σειράς προδιαγραφών για την κατασκευή και τον ποιοτικό έλεγχο των συνδέσμων μέσης τάσης. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να συμβάλει στην τυποποίηση των μεγεθών των συγκεκριμένων επαφών έτσι ώστε οι όποιες αποκλίσεις και σφάλματα να περιοριστούν αισθητά μεταξύ ίδιων συνδέσμων.

5.3 Το ονομαστικό ρεύμα των συνδέσμων σε σύγκριση με τη το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας των αγωγών

Παρόλο που το ονομαστικό ρεύμα που βρέθηκε για τους συνδέσμους δεν ήταν σταθερό για όλα τα δείγματα, ωστόσο, ήταν αρκετά μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα μέγιστα ρεύματα λειτουργίας των αγωγών ACSR τους οποίους συνδέουν οι εν λόγω σύνδεσμοι. Στο συμπέρασμα αυτό θα μπορούσε να οδηγηθεί κανείς εξαρχής, από το γεγονός ότι χρειάστηκε να μοιραστεί το ρεύμα διέλευσης του συνδέσμου σε δύο αγωγούς, και στην άνοδο και στην κάθοδο του ρεύματος. Αποδεικνύεται, επομένως, ότι οι σύνδεσμοι που χρησιμοποιούνται για το δίκτυο μέσης τάσης είναι κάτι παραπάνω από επαρκείς όσον αφορά την αντοχή τους τόσο σε ρεύματα κανονικής λειτουργίας του δικτύου, όσο και σε περιπτώσεις που το ρεύμα διέλευσής τους αγγίζει τις ονομαστικές τιμές ρεύματος των αγωγών ACSR που συνδέουν. Συνεπακολούθως, δεν τίθεται θέμα ηλεκτρικής ανεπάρκειας των συνδέσμων ακόμα κι αν οι αποκλίσεις μεταξύ τους είναι εμφανείς. Το γεγονός αυτό είναι λογικό καθώς ο σύνδεσμος προορίζεται για αυτή ακριβώς τη χρήση, οπότε προφανώς είναι επιθυμητό οι απώλειες να είναι όσο το δυνατόν ελάχιστες.

Σημειώνεται εδώ ότι η μετρούμενη θερμοκρασία των αγωγών (δηλαδή των σημείων 7 και 8) ήταν σε κάθε περίπτωση χαμηλότερη από τις θερμοκρασίες που εμφανίζονταν στους αγωγούς, άρα δεν υπήρχε σε καμία περίπτωση θέμα θερμοκρασιακής συνεισφοράς από τους αγωγούς στον σύνδεσμο. Αντιθέτως ένα μέρος της διαφοράς θερμοκρασίας των αγωγών με το περιβάλλον, που εμφάνισαν οι συγκεκριμένες μετρήσεις, θα μπορούσε να δικαιολογηθεί ως ροή θερμότητας από τον σύνδεσμο προς τον αγωγό.

5.4 Θερμοκρασιακή συμπεριφορά των υπό μέτρηση σημείων των συνδέσμων

5.4.1 Σημεία σύσφιγξης αγωγών

Παρατηρώντας τις μετρήσεις που ελήφθησαν για κάθε σημείο του εκάστοτε συνδέσμου, εξάγεται το συμπέρασμα ότι, κατά κανόνα, η μέγιστη θερμοκρασία εμφανίζεται στο εσωτερικό του συνδέσμου και συγκεκριμένα στην περιοχή επαφής του συνδέσμου με τον αγωγό.

Πιο συγκεκριμένα, στους δύο συνδέσμους παράλληλων αγωγών η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας διαπιστώθηκε στα σημεία 3,4,5,6 τα οποία ήταν τα σημεία μέτρησης στην περιοχή σύσφιγξης των αγωγών. Οι αποκλίσεις που εμφανίστηκαν μεταξύ των αποτελεσμάτων τους ήταν πολύ μικρές και μπορούν να χρεωθούν εν μέρει στην ποιότητα επαφής των θερμοστοιχείων πάνω στο σύνδεσμο και εν μέρει σε σφάλματα που προκλήθηκαν από τις αλλαγές συνθηκών του περιβάλλοντος χώρου (κίνηση μέσα στο εργαστήριο μετρήσεων). Στα προαναφερθέντα θα μπορούσε να προστεθεί ως παράγοντας σφάλματος και η μη ιδανικότητα των ψηφιακών θερμομέτρων τα οποία αν και βαθμονομήθηκαν σίγουρα εμπεριείχαν κάποιο ποσοστό σφάλματος.

Όσον αφορά τον σύνδεσμο πλάκας-αγωγού, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι το σημείο μέτρησης 4 στην περιοχή σύσφιγξης του αγωγού εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας με το περιβάλλον από ό,τι τα υπόλοιπα σημεία του συνδέσμου αυτού.

Όλα τα παραπάνω επιβεβαιώνουν, ουσιαστικά, όσα αναφέρθηκαν στο 1^ο Κεφάλαιο. Η μέγιστη θερμοκρασία κάθε επαφής εμφανίζεται στην περιοχή κοντά στην αντίσταση στένωσης ή, αλλιώς, στη γειτονική περιοχή των a-spots. Το ρεύμα στα συγκεκριμένα σημεία εξαναγκάζεται να διέλθει μέσω μικρών περιοχών όπου έχει επιτευχθεί επαφή μέταλλο με μέταλλο. Στους συνδέσμους που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, τα a-spots διαμορφώνονται κατά τη σύσφιξη των κοχλιών των συνδέσμων όπου και μέσω της παραμόρφωσης των μετάλλων συνδέσμου και αγωγού επιτυγχάνεται ο σχηματισμός σημείων πραγματικής επαφής μέταλλο προς μέταλλο (M-M) όπως είχε αναφερθεί στην παράγραφο 1.10.

5.4.2 Λοιπά σημεία μέτρησης

Η θερμική συμπεριφορά των υπολοίπων σημείων στα οποία μετρήθηκε η θερμοκρασία οδηγεί ακόμα στα παρακάτω συμπεράσματα:

- ❖ Τα σημεία μέτρησης δίπλα στους κοχλίες σύσφιγξης των αγωγών (1 και 2 για τους συνδέσμους παράλληλων αγωγών, 1,2,5 και 6 για το σύνδεσμο αγωγού-πλάκας) επηρεάζονται από την αντίσταση στένωσης κι από την αύξηση της θερμοκρασίας των a-spots, λόγω της μικρής απόστασης από αυτά. Η απόσταση αυτή όμως, αν και σε μακροσκοπική ανάλυση μικρή,

είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε η θερμοκρασία να διαφοροποιείται κατά μερικούς °C. Επιπροσθέτως η επιφανειακή ψύξη αυτών των σημείων μέτρησης από τον περιβάλλοντα αέρα του εργαστηρίου συμβάλλει στην διατήρηση μίας χαμηλότερης $\Delta\theta$ από αυτή που εμφανίζουν τα σημεία που βρίσκονται δίπλα στα a-spots.

- ❖ Το σημείο μέτρησης 3 του συνδέσμου πλάκας-αγωγού εμφανίζει πολύ μικρή αύξηση θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη επιφάνεια επαφής που έχει με την πλάκα του μετασχηματιστή έντασης. Μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής συνεπάγεται άμεσα περισσότερα σημεία διέλευσης για το ρεύμα της διάταξης κι επομένως μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας. Πέραν αυτού, η πλάκα του μετασχηματιστή λειτουργεί και ως θερμοαπαγωγικό στοιχείο (λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας της που ταυτίζεται με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος).

Βιβλιογραφία

- [1] Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος 'Μετρήσεις σε βιομηχανικές διατάξεις και υλικά.' Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2004.
- [2] Π.Δ. Μπούρκας Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1998.
- [3] Paul G. Slade 'Electrical contacts: Principles and Applications' Marcel Dekker Editions, Unit. States of America, 1999.
- [4] R. Holm 'Electric contacts: Theory and applications' 4th Edition Springer-Verlag, Germany, 2000.
- [5] Ι.Α. Σταθόπουλος 'Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων' Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1989.
- [6] Πολυκράτη Αικατερίνη 'Συμπεριφορά στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων υπό ταχέως μεταβαλλόμενες ηλεκτρικές καταπονήσεις' Διδακτορική διατριβή. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005.
- [7] Karagiannopoulos C.G., Bourkas P.D., Dervos C.T.: "Measurements on contacts of no-load switches, using different currents and clamping spring force values" Pro.Int.Applied Modeling and Simulations, Lugano, p.94-97, 1990.
- [8] A.Polykrati, M. Paisios, K. Karagiannopoulos, P. Bourkas: 'Model for temperature estimation of electric couplings suffering heavy lightning currents', IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 1, Jan 2004.
- [9] A.D. Polykrati, N.E. Kounghelis, M.P. Paisios, P.T. Tsarabaris, P. D. Bourkas 'Evaluation of the reliability of electrical screw couplings of lightning Protection systems' Int. Conference on Power and Energy Systems (EuroPES) Rhodes, Greece , 28-30 June, 2004.
- [10] Λαγός Γεώργιος 'Μετρήσεις Λυόμενων Συνδέσμων σε Κυκλώματα Γειώσεων' Διπλωματική Εργασία. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2004.
- [11] Milenko Braunovic, Valery V. Konchits, and Nikolai K. Myshkin 'Electrical Contacts, Fundamentals, Applications and Technology'
- [12] Παναγιώτης Εμ. Λιβανός 'Ποιοτικός Έλεγχος Μόνιμων Ηλεκτρικών Συνδέσμων Αντικεραυνικής Προστασίας' Διπλωματική Εργασία. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005.
- [13] Καρατζάς-Πλιάκας Αντώνιος 'Θερμική καταπόνηση για διάφορες ροπές σύσφιξης σε σφικτήρα διατομής 35mm² εναέριου δικτύου μέσης τάσης'. Διπλωματική εργασία, Οκτώβριος 2012

Παράρτημα Α

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται οι αναλυτικοί πίνακες των μετρήσεων, όπως προέκυψαν κατά την πειραματική διαδικασία, η οποία αναλύθηκε στο τρίτο κεφάλαιο. Κάθε πίνακας αντιστοιχεί σε μία δοκιμή υπερθέρμανσης με ένα συγκεκριμένο ρεύμα και απεικονίζει σε κάθε χρονική στιγμή τη θερμοκρασία που μετρήθηκε στα σημεία του συνδέσμου, όπως αυτά προσδιορίστηκαν στο τρίτο κεφάλαιο .

Ο Πίνακας 1 περιλαμβάνει την πρώτη ομάδα μετρήσεων, που αφορά τον σύνδεσμο RIVIMETAL GR-261A (ACSR 95 – ACSR 16-50) (βλ. γραφήματα κεφαλαίου 4.1).

Ο Πίνακας 2 περιλαμβάνει τη δεύτερη ομάδα μετρήσεων, που αφορά τον σύνδεσμο SL B3 (I AL35-70 - II AL 16-50) (βλ. γραφήματα κεφαλαίου 4.2).

Ο Πίνακας 3 περιλαμβάνει την τρίτη ομάδα μετρήσεων, που αφορά τον σύνδεσμο πλάκας-αγωγού (βλ. γραφήματα κεφαλαίου 4.3).

Πίνακας 1 - RIVIMETAL GR-261A (ACSR 95 – ACSR 16-50)

Δοκιμή στα 350 Α																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	21,3	0,0	21,3	0,0	21,3	0,0	21,3	0,0	21,3	0,0	21,3	0,0	21,3	0,0	21,3	0,0
15	43,9	22,6	43,8	22,5	46,1	24,8	46,5	25,2	46,0	24,7	46,1	24,8	32,8	11,5	31,5	10,2
30	48,9	27,6	48,9	27,6	52,4	31,1	52,4	31,1	52,5	31,2	52,7	31,4	35,5	14,2	33,3	12,0
45	51,1	29,8	51,2	29,9	53,3	32,0	53,3	32,0	53,5	32,2	53,7	32,4	36,1	14,8	33,9	12,6
60	51,5	30,2	51,7	30,4	53,8	32,5	53,8	32,5	54,1	32,8	54,4	33,1	36,2	14,9	34,2	12,9
75	51,9	30,6	52,0	30,7	53,8	32,5	53,8	32,5	54,1	32,8	54,3	33,0	36,8	15,5	34,7	13,4
90	51,4	30,1	52,0	30,7	53,9	32,6	54,0	32,7	54,3	33,0	54,5	33,2	36,8	15,5	34,7	13,4
105	51,4	30,1	51,6	30,3	53,6	32,3	53,6	32,3	54,0	32,7	54,1	32,8	36,0	14,7	34,2	12,9
Δοκιμή στα 380 Α																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0
15	50,0	30,9	50,2	31,1	53,0	33,9	53,2	34,1	53,2	34,1	53,5	34,4	36,0	16,9	32,6	13,5
30	55,2	36,1	54,5	35,4	57,6	38,5	57,6	38,5	57,9	38,8	58,2	39,1	37,0	17,9	35,0	15,9
45	56,5	37,4	56,2	37,1	58,4	39,3	58,4	39,3	58,8	39,7	59,0	39,9	37,2	18,1	34,9	15,8
60	57,0	37,9	56,8	37,7	58,8	39,7	58,8	39,7	59,1	40,0	59,3	40,2	37,2	18,1	35,2	16,1
75	56,8	37,7	56,4	37,3	58,5	39,4	58,4	39,3	58,8	39,7	59,1	40,0	37,6	18,5	34,9	15,8
90	56,5	37,4	56,4	37,3	58,3	39,2	58,3	39,2	58,6	39,5	58,9	39,8	37,4	18,3	35,4	16,3
105	57,0	37,9	56,8	37,7	58,8	39,7	58,7	39,6	59,0	39,9	59,4	40,3	37,5	18,4	35,3	16,2
Δοκιμή στα 380 Α 2ου ίδιου συνδέσμου																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	19,5	0,0	19,5	0,0	19,5	0,0	19,5	0,0	19,5	0,0	19,5	0,0	19,5	0,0	19,5	0,0
15	46,3	26,8	46,5	27,0	51,3	31,8	50,8	31,3	51,6	32,1	52,0	32,5	34,5	15,0	32,3	12,8
30	50,3	30,8	50,7	31,2	55,8	36,3	55,2	35,7	56,0	36,5	56,4	36,9	34,9	15,4	33,6	14,1
45	54,3	34,8	55,2	35,7	58,0	38,5	57,5	38,0	58,2	38,7	58,6	39,1	36,6	17,1	34,2	14,7
60	55,0	35,5	55,9	36,4	59,1	39,6	58,5	39,0	59,3	39,8	59,7	40,2	37,8	18,3	35,8	16,3
75	55,1	35,6	55,2	35,7	59,3	39,8	58,8	39,3	59,5	40,0	59,8	40,3	38,1	18,6	35,7	16,2
90	55,3	35,8	55,7	36,2	58,7	39,2	58,3	38,8	59,0	39,5	59,3	39,8	37,8	18,3	35,9	16,4
105	55,3	35,8	55,3	35,8	58,9	39,4	58,4	38,9	59,1	39,6	59,5	40,0	37,9	18,4	35,7	16,2
120	55,0	35,5	55,3	35,8	58,9	39,4	58,4	38,9	59,0	39,5	59,5	40,0	38,0	18,5	35,9	16,4
Δοκιμή στα 380 Α 3ου ίδιου συνδέσμου																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	19,0	0,0	19,0	0,0	19,0	0,0	19,0	0,0	19,0	0,0	19,0	0,0	19,0	0,0	19,0	0,0
15	48,0	29,0	47,7	28,7	50,8	31,8	51,1	32,1	51,1	32,1	51,4	32,4	33,6	14,6	33,1	14,1
30	53,3	34,3	53,6	34,6	56,4	37,4	56,4	37,4	56,7	37,7	57,0	38,0	36,1	17,1	33,7	14,7
45	54,2	35,2	54,6	35,6	57,2	38,2	57,2	38,2	57,6	38,6	57,9	38,9	36,7	17,7	34,9	15,9
60	54,9	35,9	54,7	35,7	57,9	38,9	58,1	39,1	58,3	39,3	58,7	39,7	37,3	18,3	35,0	16,0
75	55,0	36,0	55,4	36,4	58,2	39,2	58,3	39,3	58,6	39,6	58,9	39,9	37,2	18,2	34,8	15,8
90	54,9	35,9	54,8	35,8	57,6	38,6	57,7	38,7	58,0	39,0	58,2	39,2	37,5	18,5	35,6	16,6
105	54,9	35,9	54,9	35,9	58,2	39,2	58,3	39,3	58,6	39,6	58,9	39,9	37,2	18,2	34,8	15,8
120	54,5	35,5	54,9	35,9	58,0	39,0	58,2	39,2	58,4	39,4	58,8	39,8	37,3	18,3	35,0	16,0

Πίνακας 2 - SL B3 (I AL35-70 - II AL 16-50)

Δοκιμή στα 340 A																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0
15	42,9	20,9	42,6	20,6	45,7	23,7	45,9	23,9	45,8	23,8	45,5	23,5	29,8	7,8	29,7	7,7
30	46,2	24,2	46,5	24,5	49,2	27,2	49,7	27,7	49,4	27,4	48,6	26,6	33,9	11,9	34,5	12,5
45	48,0	26,0	48,9	26,9	51,8	29,8	52,0	30,0	51,9	29,9	51,6	29,6	35,8	13,8	36,2	14,2
60	49,4	27,4	50,6	28,6	52,6	30,6	52,9	30,9	52,7	30,7	52,7	30,7	36,9	14,9	36,9	14,9
75	49,6	27,6	50,4	28,4	52,8	30,8	53,0	31,0	53,0	31,0	53,0	31,0	36,4	14,4	37,3	15,3
90	49,7	27,7	50,1	28,1	53,0	31,0	53,3	31,3	53,2	31,2	52,7	30,7	36,2	14,2	37,1	15,1
105	49,6	27,6	50,0	28,0	52,6	30,6	52,7	30,7	53,0	31,0	52,5	30,5	36,0	14,0	37,3	15,3
120	49,7	27,7	50,2	28,2	52,6	30,6	52,9	30,9	52,8	30,8	52,6	30,6	36,1	14,1	37,2	15,2
Δοκιμή στα 360 A																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	18,5	0,0	18,5	0,0	18,5	0,0	18,5	0,0	18,5	0,0	18,5	0,0	18,5	0,0	18,5	0,0
15	36,9	18,4	37,4	18,9	39,8	21,3	40,3	21,8	39,9	21,4	39,3	20,8	28,0	9,5	29,1	10,6
30	47,5	29,0	47,5	29,0	50,3	31,8	50,9	32,4	50,8	32,3	50,5	32,0	32,1	13,6	33,3	14,8
45	50,0	31,5	49,8	31,3	53,7	35,2	54,1	35,6	53,8	35,3	53,6	35,1	33,9	15,4	36,0	17,5
60	50,8	32,3	50,8	32,3	55,2	36,7	55,6	37,1	55,3	36,8	55,3	36,8	35,3	16,8	37,0	18,5
75	50,8	32,3	50,6	32,1	55,3	36,8	55,7	37,2	55,5	37,0	55,4	36,9	35,7	17,2	37,1	18,6
90	51,0	32,5	51,4	32,9	56,0	37,5	56,5	38,0	56,3	37,8	56,2	37,7	36,1	17,6	37,2	18,7
105	50,9	32,4	51,2	32,7	55,9	37,4	56,4	37,9	56,3	37,8	56,1	37,6	36,0	17,5	37,6	19,1
120	52,8	34,3	52,5	34,0	55,4	36,9	55,7	37,2	55,8	37,3	55,6	37,1	36,0	17,5	37,4	18,9
135	52,6	34,1	52,9	34,4	55,0	36,5	55,5	37,0	55,4	36,9	55,2	36,7	36,1	17,6	37,0	18,5
150	52,5	34,0	52,8	34,3	55,2	36,7	55,6	37,1	55,2	36,7	55,4	36,9	36,1	17,6	37,3	18,8
165	52,6	34,1	53,0	34,5	55,3	36,8	56,0	37,5	55,8	37,3	55,9	37,4	36,2	17,7	37,6	19,1
180	52,2	33,7	52,5	34,0	55,9	37,4	56,4	37,9	56,1	37,6	56,2	37,7	36,0	17,5	37,5	19,0
Δοκιμή στα 370 A																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0
15	43,3	24,2	43,3	24,2	45,7	26,6	46,2	27,1	45,8	26,7	45,5	26,4	30,1	11,0	31,8	12,7
30	50,1	31,0	50,4	31,3	52,3	33,2	52,9	33,8	52,5	33,4	52,5	33,4	32,6	13,5	34,0	14,9
45	50,3	31,2	50,8	31,7	53,1	34,0	53,7	34,6	53,5	34,4	53,4	34,3	34,4	15,3	36,1	17,0
60	50,8	31,7	50,9	31,8	54,5	35,4	55,0	35,9	54,7	35,6	54,7	35,6	34,4	15,3	36,7	17,6
75	51,2	32,1	50,5	31,4	54,6	35,5	55,0	35,9	54,6	35,5	54,8	35,7	35,5	16,4	36,3	17,2
90	50,6	31,5	51,0	31,9	54,1	35,0	54,5	35,4	54,0	34,9	54,2	35,1	35,3	16,2	36,8	17,7
105	50,4	31,3	50,3	31,2	54,9	35,8	55,2	36,1	55,0	35,9	55,0	35,9	35,7	16,6	37,0	17,9
120	50,6	31,5	51,0	31,9	55,0	35,9	55,3	36,2	55,1	36,0	55,1	36,0	35,6	16,5	36,9	17,8

Δοκιμή στα 380 Α																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	18,5	0,0	18,5	0,0	18,5	0,0	18,5	0,0	18,5	0,0	18,5	0,0	18,5	0,0	18,5	0,0
15	44,7	26,2	45,0	26,5	47,4	28,9	47,9	29,4	47,7	29,2	47,7	29,2	32,4	13,9	33,5	15,0
30	52,1	33,6	52,2	33,7	56,2	37,7	56,7	38,2	56,3	37,8	56,6	38,1	36,1	17,6	36,5	18,0
45	52,9	34,4	51,9	33,4	56,0	37,5	56,4	37,9	55,9	37,4	56,2	37,7	34,5	16,0	35,8	17,3
60	52,6	34,1	53,8	35,3	57,6	39,1	57,8	39,3	57,9	39,4	58,0	39,5	36,3	17,8	37,3	18,8
75	52,6	34,1	52,4	33,9	56,9	38,4	57,0	38,5	56,9	38,4	57,1	38,6	37,0	18,5	38,2	19,7
90	53,4	34,9	53,4	34,9	57,2	38,7	57,2	38,7	57,2	38,7	57,5	39,0	37,3	18,8	37,9	19,4
105	53,9	35,4	53,0	34,5	56,4	37,9	56,4	37,9	56,6	38,1	56,6	38,1	37,0	18,5	38,2	19,7
120	53,6	35,1	53,3	34,8	56,6	38,1	56,5	38,0	56,9	38,4	56,9	38,4	37,2	18,7	38,2	19,7
135	53,4	34,9	53,6	35,1	56,7	38,2	56,7	38,2	57,2	38,7	57,2	38,7	37,5	19,0	38,4	19,9
150	53,1	34,6	53,2	34,7	56,8	38,3	56,6	38,1	57,3	38,8	57,3	38,8	37,5	19,0	38,4	19,9
Δοκιμή στα 390 Α																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,0
15	47,3	28,2	46,0	26,9	49,1	30,0	49,3	30,2	49,7	30,6	49,2	30,1	31,5	12,4	32,2	13,1
30	51,5	32,4	50,9	31,8	58,1	39,0	58,2	39,1	58,7	39,6	58,5	39,4	35,4	16,3	36,5	17,4
45	57,0	37,9	57,0	37,9	61,3	42,2	61,3	42,2	61,7	42,6	61,5	42,4	37,3	18,2	38,3	19,2
60	59,3	40,2	59,2	40,1	63,8	44,7	63,5	44,4	64,0	44,9	64,6	45,5	39,1	20,0	40,6	21,5
Δοκιμή στα 380 Α δευτέρου ίδιου συνδέσμου																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	18,6	0,0	18,6	0,0	18,6	0,0	18,6	0,0	18,6	0,0	18,6	0,0	18,6	0,0	18,6	0,0
15	46,4	27,8	46,7	28,1	51,6	33,0	51,1	32,5	51,4	32,8	51,4	32,8	35,3	16,7	34,8	16,2
30	51,9	33,3	52,5	33,9	57,2	38,6	57,0	38,4	57,1	38,5	57,2	38,6	36,7	18,1	36,7	18,1
45	52,8	34,2	52,9	34,3	58,1	39,5	58,7	40,1	58,0	39,4	57,8	39,2	37,2	18,6	37,3	18,7
60	52,4	33,8	52,6	34,0	58,4	39,8	58,4	39,8	58,7	40,1	58,1	39,5	37,5	18,9	37,3	18,7
75	52,2	33,6	52,6	34,0	58,5	39,9	59,0	40,4	58,5	39,9	58,2	39,6	37,8	19,2	37,8	19,2
90	52,2	33,6	52,5	33,9	58,5	39,9	58,5	39,9	58,8	40,2	58,8	40,2	37,5	18,9	37,5	18,9
105	52,3	33,7	52,8	34,2	58,8	40,2	58,8	40,2	58,9	40,3	58,9	40,3	37,3	18,7	37,0	18,4
120	52,5	33,9	53,0	34,4	58,7	40,1	58,5	39,9	58,5	39,9	58,5	39,9	37,3	18,7	37,7	19,1
Δοκιμή στα 380 Α τρίτου ίδιου συνδέσμου																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0
15	48,6	27,5	48,4	27,3	52,1	31,0	52,1	31,0	52,2	31,1	52,4	31,3	34,8	13,7	35,7	14,6
30	56,6	35,5	56,0	34,9	59,9	38,8	60,2	39,1	59,8	38,7	60,4	39,3	37,3	16,2	38,3	17,2
45	58,0	36,9	58,9	37,8	62,5	41,4	62,8	41,7	62,5	41,4	63,0	41,9	38,8	17,7	40,3	19,2
60	60,4	39,3	60,7	39,6	64,7	43,6	65,0	43,9	64,8	43,7	64,9	43,8	42,0	20,9	42,7	21,6

Δοκιμή στα 360 Α τρίτου ίδιου συνδέσμου																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	20,3	0,0	20,3	0,0	20,3	0,0	20,3	0,0	20,3	0,0	20,3	0,0	20,3	0,0	20,3	0,0
15	46,1	25,8	47,5	27,2	50,9	30,6	51,0	30,7	50,8	30,5	51,3	31,0	34,4	14,1	34,8	14,5
30	54,1	33,8	52,7	32,4	56,5	36,2	56,7	36,4	56,7	36,4	57,0	36,7	37,3	17,0	37,8	17,5
45	55,3	35,0	56,0	35,7	59,1	38,8	59,3	39,0	59,2	38,9	59,6	39,3	38,1	17,8	38,8	18,5
60	56,9	36,6	56,5	36,2	59,8	39,5	60,1	39,8	59,8	39,5	60,4	40,1	39,4	19,1	39,7	19,4
75	57,7	37,4	57,3	37,0	61,0	40,7	61,2	40,9	60,9	40,6	61,5	41,2	40,1	19,8	40,4	20,1
Δοκιμή στα 350 Α τρίτου ίδιου συνδέσμου																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	20,0	0,0	20,0	0,0	20,0	0,0	20,0	0,0	20,0	0,0	20,0	0,0	20,0	0,0	20,0	0,0
15	46,6	26,6	46,4	26,4	49,3	29,3	49,0	29,0	49,3	29,3	49,5	29,5	35,5	15,5	35,5	15,5
30	52,7	32,7	52,7	32,7	55,6	35,6	55,7	35,7	55,7	35,7	56,1	36,1	37,3	17,3	38,2	18,2
45	55,0	35,0	54,9	34,9	58,4	38,4	58,5	38,5	58,5	38,5	58,9	38,9	38,6	18,6	39,0	19,0
60	55,4	35,4	55,0	35,0	58,8	38,8	59,0	39,0	59,0	39,0	59,3	39,3	38,7	18,7	39,8	19,8
75	55,9	35,9	55,7	35,7	59,1	39,1	59,1	39,1	58,9	38,9	59,6	39,6	39,3	19,3	40,0	20,0
90	56,1	36,1	56,2	36,2	59,5	39,5	60,0	40,0	59,3	39,3	60,0	40,0	39,3	19,3	40,0	20,0
105	56,3	36,3	56,2	36,2	59,4	39,4	59,7	39,7	59,1	39,1	60,0	40,0	39,4	19,4	39,8	19,8
120	56,6	36,6	56,1	36,1	59,4	39,4	59,7	39,7	59,0	39,0	59,9	39,9	39,3	19,3	40,2	20,2
135	56,5	36,5	56,2	36,2	59,7	39,7	60,0	40,0	59,7	39,7	60,2	40,2	39,8	19,8	40,4	20,4
Δοκιμή στα 380 Α τετάρτου ίδιου συνδέσμου																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	21,0	0,0	21,0	0,0	21,0	0,0	21,0	0,0	21,0	0,0	21,0	0,0	21,0	0,0	21,0	0,0
15	47,7	26,7	46,9	25,9	50,9	29,9	51,0	30,0	51,0	30,0	51,4	30,4	37,1	16,1	37,5	16,5
30	62,2	41,2	61,4	40,4	63,5	42,5	63,9	42,9	64,0	43,0	63,9	42,9	41,8	20,8	42,5	21,5
Δοκιμή στα 350 Α τετάρτου ίδιου συνδέσμου																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	20,8	0,0	20,8	0,0	20,8	0,0	20,8	0,0	20,8	0,0	20,8	0,0	20,8	0,0	20,8	0,0
15	47,7	26,9	46,5	25,7	48,4	27,6	48,3	27,5	48,3	27,5	48,8	28,0	35,5	14,7	35,8	15,0
30	50,3	29,5	50,3	29,5	53,0	32,2	52,8	32,0	53,1	32,3	53,3	32,5	37,4	16,6	37,3	16,5
45	53,3	32,5	51,2	30,4	54,4	33,6	54,1	33,3	54,4	33,6	54,7	33,9	37,9	17,1	38,1	17,3
60	54,5	33,7	53,0	32,2	55,3	34,5	55,1	34,3	55,1	34,3	55,5	34,7	38,3	17,5	38,4	17,6
75	55,0	34,2	53,3	32,5	55,9	35,1	55,5	34,7	55,6	34,8	56,1	35,3	38,9	18,1	39,3	18,5
90	55,1	34,3	53,0	32,2	55,8	35,0	55,4	34,6	55,7	34,9	56,1	35,3	38,4	17,6	38,9	18,1
105	55,0	34,2	53,0	32,2	55,8	35,0	55,5	34,7	55,7	34,9	56,1	35,3	38,5	17,7	38,9	18,1
120	54,9	34,1	52,8	32,0	55,9	35,1	55,6	34,8	55,8	35,0	56,1	35,3	38,8	18,0	38,9	18,1

Δοκιμή στα 360 Α τετάρτου ίδιου συνδέσμου

Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	19,7	0,0	19,7	0,0	19,7	0,0	19,7	0,0	19,7	0,0	19,7	0,0	19,7	0,0	19,7	0,0
15	48,0	28,3	48,1	28,4	49,8	30,1	50,0	30,3	50,0	30,3	50,3	30,6	36,0	16,3	36,3	16,6
30	54,0	34,3	53,6	33,9	56,6	36,9	56,8	37,1	56,6	36,9	56,8	37,1	36,6	16,9	37,0	17,3
45	56,3	36,6	56,6	36,9	58,5	38,8	58,8	39,1	58,4	38,7	58,8	39,1	37,0	17,3	37,6	17,9
60	56,5	36,8	56,9	37,2	59,7	40,0	60,0	40,3	59,1	39,4	60,2	40,5	38,7	19,0	38,9	19,2
75	56,9	37,2	56,9	37,2	59,6	39,9	59,9	40,2	59,5	39,8	60,0	40,3	38,8	19,1	39,4	19,7
90	57,0	37,3	57,0	37,3	59,5	39,8	59,9	40,2	59,6	39,9	59,9	40,2	39,4	19,7	39,5	19,8
105	56,6	36,9	56,3	36,6	59,3	39,6	59,5	39,8	59,3	39,6	59,6	39,9	39,1	19,4	39,6	19,9
120	56,8	37,1	56,7	37,0	59,0	39,3	59,2	39,5	59,1	39,4	59,2	39,5	38,7	19,0	38,8	19,1

Πίνακας 3 – Σύνδεσμος πλάκας-αγωγού

Δοκιμή στα 360 Α																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	21,3	0,0	21,3	0,0	21,3	0,0	21,3	0,0	21,3	0,0	21,3	0,0	21,3	0,0	21,3	0,0
15	33,5	12,2	32,9	11,6	27,8	6,5	35,2	13,9	33,0	11,7	33,3	12,0	27,7	6,4	32,5	11,2
30	37,1	15,8	36,8	15,5	30,1	8,8	39,4	18,1	37,1	15,8	37,0	15,7	31,6	10,3	36,5	15,2
45	38,3	17,0	37,8	16,5	31,2	9,9	40,4	19,1	37,8	16,5	38,3	17,0	32,9	11,6	37,9	16,6
60	38,4	17,1	38,3	17,0	31,6	10,3	40,8	19,5	38,5	17,2	38,2	16,9	33,6	12,3	37,4	16,1
75	37,8	16,5	37,8	16,5	31,9	10,6	40,6	19,3	37,8	16,5	38,1	16,8	33,2	11,9	37,6	16,3
90	37,8	16,5	37,7	16,4	31,8	10,5	40,4	19,1	37,7	16,4	38,2	16,9	33,2	11,9	37,3	16,0
105	37,9	16,6	37,9	16,6	31,5	10,2	40,5	19,2	37,9	16,6	38,3	17,0	33,3	12,0	37,5	16,2
Δοκιμή στα 380 Α																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0
15	35,7	14,6	35,6	14,5	25,0	3,9	38,3	17,2	36,1	15,0	36,2	15,1	31,2	10,1	32,8	11,7
30	38,1	17,0	38,1	17,0	32,4	11,3	41,1	20,0	38,4	17,3	38,5	17,4	33,5	12,4	35,8	14,7
45	38,7	17,6	38,8	17,7	33,3	12,2	41,8	20,7	39,2	18,1	39,4	18,3	34,2	13,1	36,6	15,5
60	39,5	18,4	39,1	18,0	33,8	12,7	42,3	21,2	39,7	18,6	39,8	18,7	34,3	13,2	36,6	15,5
75	39,3	18,2	39,3	18,2	33,3	12,2	42,5	21,4	40,0	18,9	39,9	18,8	34,5	13,4	37,0	15,9
90	39,6	18,5	39,6	18,5	33,7	12,6	42,6	21,5	39,8	18,7	39,6	18,5	34,2	13,1	37,1	16,0
105	39,3	18,2	39,2	18,1	33,6	12,5	42,2	21,1	39,9	18,8	39,8	18,7	34,7	13,6	36,9	15,8
Δοκιμή στα 420 Α																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	20,3	0,0	20,3	0,0	20,3	0,0	20,3	0,0	20,3	0,0	20,3	0,0	20,3	0,0	20,3	0,0
15	39,1	18,8	38,3	18,0	30,9	10,6	41,7	21,4	38,8	18,5	39,1	18,8	32,5	12,2	35,5	15,2
30	41,8	21,5	41,5	21,2	34,0	13,7	44,7	24,4	41,8	21,5	42,3	22,0	35,1	14,8	38,2	17,9
45	43,2	22,9	42,5	22,2	35,1	14,8	45,6	25,3	42,9	22,6	43,4	23,1	36,7	16,4	39,0	18,7
60	43,8	23,5	44,1	23,8	35,8	15,5	46,0	25,7	43,7	23,4	44,9	24,6	37,5	17,2	40,0	19,7
75	44,0	23,7	44,1	23,8	35,5	15,2	46,3	26,0	44,0	23,7	44,8	24,5	37,5	17,2	40,2	19,9
90	44,2	23,9	44,2	23,9	36,3	16,0	46,1	25,8	44,0	23,7	44,7	24,4	37,1	16,8	39,7	19,4
105	43,5	23,2	43,5	23,2	35,8	15,5	46,2	25,9	43,3	23,0	44,1	23,8	37,2	16,9	39,6	19,3
120	43,5	23,2	43,5	23,2	36,2	15,9	46,3	26,0	43,6	23,3	44,3	24,0	37,3	17,0	39,6	19,3
Δοκιμή στα 450 Α																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	20,5	0,0	20,5	0,0	20,5	0,0	20,5	0,0	20,5	0,0	20,5	0,0	20,5	0,0	20,5	0,0
15	41,3	20,8	41,2	20,7	33,2	12,7	44,7	24,2	41,7	21,2	42,1	21,6	34,7	14,2	37,7	17,2
30	45,0	24,5	45,0	24,5	35,8	15,3	48,4	27,9	45,4	24,9	45,4	24,9	37,8	17,3	39,0	18,5
45	45,6	25,1	45,1	24,6	37,2	16,7	49,1	28,6	46,2	25,7	46,5	26,0	38,7	18,2	41,0	20,5
60	46,3	25,8	45,7	25,2	37,7	17,2	49,9	29,4	46,5	26,0	46,5	26,0	38,6	18,1	41,6	21,1
75	46,0	25,5	46,6	26,1	38,0	17,5	50,5	30,0	47,2	26,7	47,2	26,7	39,2	18,7	41,9	21,4
90	46,4	25,9	46,5	26,0	38,4	17,9	50,2	29,7	47,1	26,6	47,1	26,6	38,6	18,1	41,2	20,7
105	46,2	25,7	46,2	25,7	38,1	17,6	50,1	29,6	47,0	26,5	47,0	26,5	38,7	18,2	41,6	21,1
120	46,2	25,7	46,4	25,9	37,7	17,2	50,2	29,7	47,3	26,8	47,0	26,5	38,4	17,9	41,2	20,7

Δοκιμή στα 480 Α																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0
15	45,4	23,4	45,5	23,5	37,3	15,3	49,4	27,4	46,2	24,2	46,6	24,6	37,1	15,1	40,5	18,5
30	48,0	26,0	48,5	26,5	38,9	16,9	52,5	30,5	49,4	27,4	49,2	27,2	39,9	17,9	43,6	21,6
45	50,2	28,2	50,0	28,0	40,0	18,0	52,9	30,9	50,1	28,1	50,0	28,0	40,8	18,8	44,1	22,1
60	50,3	28,3	50,1	28,1	40,4	18,4	53,4	31,4	50,6	28,6	50,0	28,0	40,9	18,9	44,2	22,2
75	49,8	27,8	50,0	28,0	40,5	18,5	53,6	31,6	50,5	28,5	50,2	28,2	41,1	19,1	44,8	22,8
90	49,7	27,7	50,2	28,2	40,1	18,1	53,6	31,6	50,6	28,6	50,3	28,3	41,0	19,0	44,7	22,7
105	49,6	27,6	50,1	28,1	40,8	18,8	53,7	31,7	50,7	28,7	50,4	28,4	41,3	19,3	44,3	22,3
Δοκιμή στα 500 Α																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	19,7	0,0	19,7	0,0	19,7	0,0	19,7	0,0	19,7	0,0	19,7	0,0	19,7	0,0	19,7	0,0
15	45,0	25,3	44,8	25,1	34,1	14,4	47,7	28,0	45,3	25,6	45,3	25,6	34,8	15,1	38,6	18,9
30	49,1	29,4	49,0	29,3	38,3	18,6	53,1	33,4	49,3	29,6	49,9	30,2	39,3	19,6	43,2	23,5
45	48,7	29,0	49,1	29,4	38,3	18,6	53,3	33,6	49,7	30,0	50,4	30,7	40,0	20,3	44,2	24,5
60	50,0	30,3	49,4	29,7	38,8	19,1	54,3	34,6	50,3	30,6	51,2	31,5	40,5	20,8	44,3	24,6
75	50,8	31,1	50,4	30,7	39,8	20,1	55,3	35,6	51,9	32,2	52,1	32,4	41,4	21,7	45,0	25,3
90	51,1	31,4	50,5	30,8	40,0	20,3	55,6	35,9	52,2	32,5	52,3	32,6	41,0	21,3	45,1	25,4
105	51,5	31,8	51,3	31,6	40,7	21,0	56,1	36,4	52,5	32,8	52,6	32,9	41,7	22,0	45,8	26,1
120	51,5	31,8	51,2	31,5	40,6	20,9	56,0	36,3	52,6	32,9	52,7	33,0	41,3	21,6	45,8	26,1
135	51,2	31,5	51,2	31,5	40,6	20,9	55,7	36,0	52,2	32,5	52,3	32,6	41,4	21,7	45,3	25,6
Δοκιμή στα 520 Α																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	20,1	0,0	20,1	0,0	20,1	0,0	20,1	0,0	20,1	0,0	20,1	0,0	20,1	0,0	20,1	0,0
15	49,7	29,6	50,5	30,4	38,9	18,8	55,0	34,9	51,7	31,6	51,6	31,5	40,8	20,7	44,8	24,7
30	51,8	31,7	52,9	32,8	38,8	18,7	58,1	38,0	53,5	33,4	53,9	33,8	42,1	22,0	46,4	26,3
45	52,9	32,8	54,3	34,2	41,4	21,3	59,0	38,9	55,0	34,9	54,9	34,8	43,0	22,9	46,4	26,3
60	53,5	33,4	54,9	34,8	42,1	22,0	59,2	39,1	55,6	35,5	55,5	35,4	43,4	23,3	46,9	26,8
75	53,0	32,9	54,8	34,7	41,8	21,7	59,6	39,5	55,7	35,6	55,4	35,3	43,2	23,1	47,0	26,9
90	53,0	32,9	54,9	34,8	42,1	22,0	59,6	39,5	55,7	35,6	55,7	35,6	43,6	23,5	47,2	27,1
105	53,0	32,9	55,0	34,9	41,6	21,5	59,7	39,6	55,8	35,7	55,7	35,6	43,7	23,6	47,2	27,1
Δοκιμή στα 520 Α 2ου ίδιου συνδέσμου για επαλήθευση																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	19,3	0,0	19,3	0,0	19,3	0,0	19,3	0,0	19,3	0,0	19,3	0,0	19,3	0,0	19,3	0,0
15	48,9	29,6	48,8	29,5	38,3	19,0	52,1	32,8	49,8	30,5	48,1	28,8	38,4	19,1	41,7	22,4
30	51,0	31,7	50,6	31,3	40,0	20,7	54,6	35,3	51,7	32,4	50,3	31,0	41,1	21,8	46,1	26,8
45	51,1	31,8	51,7	32,4	41,6	22,3	56,9	37,6	52,6	33,3	53,0	33,7	42,4	23,1	46,4	27,1
60	51,5	32,2	51,1	31,8	41,4	22,1	56,8	37,5	52,7	33,4	53,9	34,6	43,2	23,9	47,4	28,1
75	53,1	33,8	54,0	34,7	43,0	23,7	58,9	39,6	54,8	35,5	54,7	35,4	44,1	24,8	48,6	29,3
90	52,6	33,3	53,8	34,5	42,5	23,2	59,1	39,8	54,5	35,2	54,9	35,6	44,5	25,2	48,7	29,4
105	52,9	33,6	53,2	33,9	43,2	23,9	59,1	39,8	54,8	35,5	54,7	35,4	44,3	25,0	48,5	29,2
120	53,0	33,7	53,2	33,9	43,4	24,1	59,6	40,3	55,0	35,7	54,8	35,5	44,8	25,5	49,1	29,8
135	52,6	33,3	53,0	33,7	42,7	23,4	59,0	39,7	54,7	35,4	54,7	35,4	44,7	25,4	48,4	29,1

Δοκιμή στα 520 Α 3ου ιδίου συνδέσμου για επαλήθευση																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0	21,1	0,0
15	44,3	23,2	44,0	22,9	36,0	14,9	49,8	28,7	46,2	25,1	46,4	25,3	39,1	18,0	43,5	22,4
30	48,3	27,2	48,6	27,5	39,5	18,4	54,4	33,3	51,0	29,9	51,3	30,2	42,7	21,6	46,1	25,0
45	49,5	28,4	48,8	27,7	39,6	18,5	55,6	34,5	51,8	30,7	52,5	31,4	43,5	22,4	47,2	26,1
60	49,3	28,2	49,7	28,6	41,5	20,4	56,0	34,9	52,6	31,5	52,3	31,2	43,5	22,4	47,8	26,7
75	51,3	30,2	51,8	30,7	41,5	20,4	56,3	35,2	52,3	31,2	53,0	31,9	43,8	22,7	47,9	26,8
90	52,0	30,9	52,2	31,1	41,6	20,5	56,4	35,3	52,5	31,4	53,3	32,2	44,1	23,0	48,3	27,2
105	51,6	30,5	52,5	31,4	42,1	21,0	56,4	35,3	52,5	31,4	53,9	32,8	44,1	23,0	47,9	26,8
120	51,6	30,5	52,5	31,4	42,1	21,0	56,3	35,2	52,7	31,6	53,8	32,7	44,1	23,0	47,8	26,7
135	51,5	30,4	52,8	31,7	41,9	20,8	55,9	34,8	52,5	31,4	53,3	32,2	44,0	22,9	47,5	26,4
Δοκιμή στα 530 Α 3ου ιδίου συνδέσμου για επαλήθευση																
Λεπτά	Θ1	ΔΘ1	Θ2	ΔΘ2	Θ3	ΔΘ3	Θ4	ΔΘ4	Θ5	ΔΘ5	Θ6	ΔΘ6	Θ7	ΔΘ7	Θ8	ΔΘ8
0	19,6	0,0	19,6	0,0	19,6	0,0	19,6	0,0	19,6	0,0	19,6	0,0	19,6	0,0	19,6	0,0
15	48,5	28,9	48,5	28,9	37,4	17,8	52,0	32,4	49,3	29,7	48,7	29,1	40,0	20,4	45,2	25,6
30	50,9	31,3	50,9	31,3	39,6	20,0	54,9	35,3	51,4	31,8	51,5	31,9	42,5	22,9	46,9	27,3
45	53,0	33,4	53,1	33,5	41,7	22,1	56,7	37,1	53,4	33,8	53,1	33,5	44,2	24,6	49,3	29,7
60	54,0	34,4	53,7	34,1	42,7	23,1	57,4	37,8	54,5	34,9	54,1	34,5	45,1	25,5	49,8	30,2
75	53,4	33,8	53,3	33,7	42,6	23,0	59,4	39,8	54,5	34,9	54,0	34,4	45,1	25,5	49,6	30,0
90	53,2	33,6	53,3	33,7	42,6	23,0	59,6	40,0	54,6	35,0	53,8	34,2	45,2	25,6	49,3	29,7
105	53,0	33,4	53,0	33,4	42,8	23,2	59,2	39,6	53,8	34,2	54,6	35,0	45,1	25,5	49,5	29,9
120	53,0	33,4	53,0	33,4	42,6	23,0	59,3	39,7	53,8	34,2	54,7	35,1	44,9	25,3	48,7	29,1
135	53,9	34,3	53,8	34,2	42,9	23,3	59,4	39,8	54,4	34,8	54,6	35,0	45,3	25,7	49,3	29,7