



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ
ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΕΡΕΥΝΑΣ
(ΠΜΣ-ΜΕ.Δ.Μ.Ο.Δ.Ε.)

«Μελέτη, σχεδιασμός και κατασκευή συσκευής
φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης: εφαρμογή
στην αντίσταση στην τριμματική διάβρωση
αεροναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου»

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Δημήτριος Γ. Γεωργούλης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. Νικόλαος Αλεξόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής ΤΜΟΔ

ΧΙΟΣ, ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2021

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον Οδηγό συγγραφής διπλωματικών εργασιών του ΤΜΟΔ. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι προϊόν δικής μου δουλειάς και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Στο όνειρο

Στην ελπίδα

Στην επιθυμία

Στον μηχανολόγο

Στον Φραγκούλη – Εφραίμ

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου Δρ. Νικόλαο Αλεξόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Οικονομίας & Διοίκησης του Πανεπιστημίου Αιγαίου, για την εμπιστοσύνη του να μου αναθέσει το συγκεκριμένο ερευνητικό θέμα, για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθειά του στην οργάνωση, στον σχεδιασμό και στην υποστήριξη της έρευνας αλλά και για την καθοδήγησή του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Είναι ένας επιστήμονας με όραμα για το Πανεπιστήμιο Αιγαίου και τους φοιτητές του.

Ευχαριστώ θερμά την Υποψήφια Διδάκτορα Χριστίνα Χαραλαμπίδου για τις συμβουλές και την ουσιαστική βοήθειά της σε όλα τα στάδια των μεταπτυχιακών μου σπουδών και για τις υποδείξεις της στην συγγραφή της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον συνεργάτη του Τμήματος Μηχανικών Οικονομίας & Διοίκησης του Πανεπιστημίου Αιγαίου, Δρ. Γεώργιο Μαΐστρο για την βοήθειά του στο στήσιμο και την λειτουργία της πειραματικής συσκευής φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης.

Δεν θα παρέλειπα να ευχαριστήσω και την οικογένειά μου, την σύζυγο και τα παιδιά μου, που με την υπομονή τους και την κατανόησή τους μου έδωσαν κουράγιο και δύναμη να ολοκληρώσω τις μεταπτυχιακές σπουδές μου.

Περίληψη

Τα κράματα αλουμινίου έχουν αναλάβει ένα μεγάλο ποσοστό των υλικών κατασκευής των σύγχρονων αεροπλάνων, λόγω τους βάρους τους και των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν. Ωστόσο λόγω αυτής της χρήσης, τα πρωτόκολλα ασφάλειας της αεροναυπηγικής βιομηχανίας επιβάλλουν ιδιαίτερους ελέγχους γύρω από την υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους.

Ως μέταλλα, τα κράματα αλουμινίου είναι ευάλωτα σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, παρουσιάζοντας ευπάθεια σε διάφορες μορφές διάβρωσης και κυρίως στην τριμματική διάβρωση μία μορφή εξαιρετικά εντοπισμένης διάβρωσης (τοπική) κατά την οποία δημιουργούνται μικρές οπές/κοιλότητες στο υλικό. Είναι μία από τις πιο επιβλαβείς μορφές διάβρωσης διότι είναι δύσκολη στον εντοπισμό και διαδίδεται γρήγορα με μικρή απώλεια υλικού μέχρι την αστοχία.

Στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής, δημιουργήθηκε μία συσκευή για την πραγματοποίηση πειραμάτων φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης (εμπέδησης). Η συγκεκριμένη συσκευή χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των παραμέτρων διάβρωσης των κραμάτων αλουμινίου AA2198-T8 και AA2198-T3. Τα δοκίμια εκτέθηκαν σε διαφορετικούς χρόνους έκθεσης σε διάλυμα διάβρωσης NaCl 3,5%wt για την προσομοίωση της ατμοσφαιρικής φυσικής διάβρωσης. Η μορφή διάβρωσης μοντελοποιήθηκε σ' ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα και μέσω αυτής της τεχνικής παρουσιάστηκε το φυσικό υπόβαθρο της διάβρωσης των υλικών.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού έπειτα από έκθεση των δοκιμίων AA2198-T8 και AA2198-T3 σε διαβρωτικά περιβάλλοντα με στόχο τον αποτίμηση της επίδρασης της διάβρωσης στην υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δύο παραπάνω μεθόδους, αποτιμήθηκαν και βοήθησαν στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων τόσο για την συμπεριφορά των υλικών στην διάβρωση όσο και για την μηχανική συμπεριφορά τους στον εφελκυσμό.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	4
Περίληψη	5
Κατάλογος εικόνων	9
Κατάλογος πινάκων	11
Κατάλογος διαγραμμάτων	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Εισαγωγή	14
1.1 Το Αλουμίνιο και τα κράματά του.	14
1.1.1 Κράματα διαμόρφωσης (σφυρήλατα) ή ελατά κράματα.	14
1.1.2 Κράματα χύτευσης.	16
1.1.3 Ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου.....	16
1.2 Σύστημα σχεδιασμού θερμικών κατεργασιών κραμάτων αλουμινίου.	17
1.3 Τα κράματα της σειράς 2xxx.....	18
1.3.1 Κράμα αλουμινίου 2198.....	19
1.3.2 Κατάσταση T8 και T3 – Σκλήρυνση με κατακρήμνιση	20
1.4 Αναγκαιότητα της παρούσας εργασίας.	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Διάβρωση	22
2.1 Γενικά.....	22
2.2 Γαλβανική διάβρωση (Galvanic corrosion).....	23
2.3 Περικρυσταλλική διάβρωση (Intergranular corrosion).	24
2.4 Τριμματική διάβρωση (Pitting corrosion).	25
2.5 Μοντελοποίηση της διάβρωσης σε κράματα αλουμινίου.	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης (Εμπέδησης)	30
3.1 Γενικά.....	30
3.2 Ορισμός της σύνθετης αντίστασης (εμπέδησης).	31
3.3 Ηλεκτροχημεία – Ένα γραμμικό σύστημα.	34
3.4 Στοιχεία ηλεκτρικού κυκλώματος.	35
3.4.1 Αντίσταση διαλύματος.	36
3.4.2 Αντίσταση μεταφοράς φορτίου.	36
3.4.3 Αντίσταση πόλωσης.	37
3.4.4 Χωρητικότητα διπλού στρώματος (διπλοστοιβάδας).....	37
3.4.5 Χωρητικότητα επίστρωσης.	38

3.5	Επισκόπηση μοντέλων.	40
3.6	EIS και διάβρωση υλικών.	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Μηχανική συμπεριφορά των κραμάτων της σειράς 2xxx.		42
4.1	Μηχανική συμπεριφορά μεταλλικών υλικών.	42
4.1.1	Αντοχή σε εφελκυσμό.	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : Πειραματική διαδικασία.		45
5.1	Γενικά.	45
5.2	Πειραματικός εξοπλισμός εμπέδησης (EIS).	45
5.2.1	Ποτενσιοστάτης.	46
5.2.2	Ηλεκτρολυτικό κελί.	47
5.2.3	Ηλεκτρόδια.	47
5.3	Κατασκευή – Αγορά πειραματικού εξοπλισμού (EIS).	49
5.4	Συνδεσμολογία πειραματικού εξοπλισμού.	53
5.5	Δεδομένα πειράματος.	53
5.6	Εκτέλεση πειράματος ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας εμπέδησης (EIS).	54
5.7	Μεθοδολογία προσέγγισης – Διάγραμμα ροής.	55
5.8	Πειραματικός εξοπλισμός μηχανικής καταπόνησης (εφελκυσμού).	56
5.8.1	Δοκίμια εφελκυσμού.	56
5.8.1	Μηχανολογικός εξοπλισμός εφελκυσμού.	57
5.9	Εκτέλεση πειράματος μηχανικής αντοχής (εφελκυσμού).	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : Πειραματικά αποτελέσματα.		59
6.1	Γενικά.	59
6.2	Αποτελέσματα φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης (EIS).	59
6.3	Μοντελοποίηση – επιλογή ισοδύναμου κυκλώματος.	64
6.3.1	Αποτελέσματα ισοδύναμου μοντέλου AA2198-T8 και T3 για t=0h.	66
6.3.2	Αποτελέσματα ισοδύναμου μοντέλου AA2198-T8 και T3 για t=1h.	67
6.3.3	Αποτελέσματα ισοδύναμου μοντέλου AA2198-T8 και T3 για t=3h.	68
6.3.4	Αποτελέσματα ισοδύναμου μοντέλου AA2198-T8 και T3 για t=6h.	69
6.3.6	Αποτελέσματα ισοδύναμου μοντέλου AA2198-T8 και T3 για t=24h.	71
6.3.7	Αποτελέσματα ισοδύναμου μοντέλου AA2198-T8 και T3 για t=48h.	72
6.4	Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοίωσης.	78
6.5	Επιφάνειες διαβρωμένων δοκιμών.	84
6.6	Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών.	86
6.6.1	Σύγκριση της υποβάθμισης λόγω διάβρωσης AA2198-T8 με AA2198-T3.	86

6.6.2 Σύγκριση της υποβάθμισης λόγω διάβρωσης AA2198-T8 με AA2024-T3.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο : Συμπεράσματα.	90
Θέματα προς περαιτέρω διερεύνηση.	91
Βιβλιογραφία	92
Παράρτημα πινάκων μετρήσεων.	95

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 : Σχεδιάγραμμα των βασικών προσμίξεων για τη δημιουργία των κραμάτων διαμόρφωσης ανά σειρά. [3].....	15
Εικόνα 2 : Ποσοστό κατανομής κατά βάρος των δομικών υλικών του αεροσκάφους A380..	19
Εικόνα 3 : Στάδια σκλήρυνσης κατακρήμνισης.....	20
Εικόνα 4 : Μορφή Γαλβανικής διάβρωσης.....	24
Εικόνα 5 : Σχηματική παράσταση της διεργασίας της γαλβανικής διάβρωσης.....	24
Εικόνα 6 : Μορφές Περικρυσταλλικής διάβρωσης.....	25
Εικόνα 7 : Σχηματικές παραστάσεις τριμματικής διάβρωσης.....	26
Εικόνα 8 : Μηχανισμός τοπικής διάβρωσης σιδήρου κι αλουμινίου.....	26
Εικόνα 9 : Προσομοίωση του ισοδύναμου κυκλώματος ενός διαβρωμένου κατακρημνίσματος δεύτερης φάσης στο κράμα αλουμινίου AA2024-T3.....	27
Εικόνα 10 : Σχηματική παράσταση διεργασίας διάβρωσης κι αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα.....	29
Εικόνα 11 : Αρχή λειτουργίας EIS.....	31
Εικόνα 12 : Σχηματική διάταξη EIS.....	31
Εικόνα 13 : Ημιτονοειδής απόκριση ρεύματος σε γραμμικό σύστημα.....	32
Εικόνα 14 : Γραφική παράσταση Lissajous.....	33
Εικόνα 15 : Διάγραμμα Nyquist με το διάνυσμα εμπέδησης.....	33
Εικόνα 16 : Ηλεκτρικό κύκλωμα RC.....	34
Εικόνα 17 : Διαγράμματα Bode, πλάτους και φάσης.....	34
Εικόνα 18 : Ψευδογραμμικότητα του EIS.....	35
Εικόνα 19 : Εξίσωση εμπέδησης στοιχείων κυκλώματος με $\omega=2\pi f$, $j=-1$	35
Εικόνα 20 : Ηλεκτρικό κύκλωμα EIS.....	36
Εικόνα 21 : Ηλεκτροχημεία ως ηλεκτρικό κύκλωμα.....	38
Εικόνα 22 : Διάγραμμα Nyquist για ρυθμό διάβρωσης 1 mm/ετος.....	39
Εικόνα 23 : Διάγραμμα Bode για ρυθμό διάβρωσης 1 mm/ετος.....	39
Εικόνα 24 : Γαλβανική σειρά συνηθισμένων κραμάτων - μετάλλων.....	41
Εικόνα 25 : (α) Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης εφελκυσμού, (β) Παράσταση του εφελκυσμού δοκιμίου έως την θραύση του.....	43
Εικόνα 26 : Πειραματική διάταξη εφαρμογής ηλεκτροχημικών τεχνικών σε εργαστηριακές δοκιμές.....	45
Εικόνα 27 : Σχηματική περιγραφή ποτενσιοστάτη.....	46
Εικόνα 28 : Σχηματική περιγραφή λειτουργίας ποτενσιοστάτη.....	46
Εικόνα 29 : Ποτενσιοστάτης “CorrTest” με τυπικό κελί 3 ηλεκτροδίων.....	46
Εικόνα 30 : Ηλεκτρολυτικό κελί GAMRY για επίπεδα ηλεκτρόδια.....	47
Εικόνα 31 : Ενδεικτικά υλικά για πειραματική διαδικασία EIS της εταιρείας GAMRY.....	48
Εικόνα 32 : Τοποθέτηση ηλεκτροδίων σε ηλεκτροχημικό κελί της εταιρείας GAMRY.....	49
Εικόνα 33 : Ποτενσιοστάτης – Βολτόμετρο – Αμπερόμετρο της εταιρείας PalmSens.....	49
Εικόνα 34 : Λογισμικό πειραματικών δοκιμών (EIS) PSTrace5 της εταιρείας Palmsens.....	50
Εικόνα 35 : Κατασκευή ηλεκτρολυτικού κελιού για επίπεδα ηλεκτρόδια.....	51
Εικόνα 36 : Κατασκευή ηλεκτρολυτικού κελιού για επίπεδα ηλεκτρόδια. Τελική μορφή με εγκατεστημένα τα ηλεκτρόδια.....	51
Εικόνα 37 : Ηλεκτρόδια (α) μέτρησης (β) αναφοράς (γ) εργασίας.....	52
Εικόνα 38 : Συνδεσμολογία πειραματικού εξοπλισμού.....	53
Εικόνα 39 : Διάγραμμα ροής της πειραματικής διαδικασίας.....	55

Εικόνα 40 : Κοπή δοκιμίων από πλάκα αλουμινίου.....	56
Εικόνα 41 : Σκαρίφημα δοκιμίου εφελκυσμού.	56
Εικόνα 42 : Διαβρωμένη επιφάνεια του δοκιμίου.....	57
Εικόνα 43 : (α) Πειραματική διάταξη εφελκυσμού (β) τοποθετημένο δοκίμιο για εφελκυσμό με προσαρμοσμένο το επιμηκυνσιομετρο.....	57
Εικόνα 44 : Ισοδύναμα κυκλώματα με τους αντίστοιχους πίνακες των στοιχείων τους, των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 0 ώρες έκθεσης.	66
Εικόνα 45 : Ισοδύναμα κυκλώματα με τους αντίστοιχους πίνακες των στοιχείων τους, των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 1 ώρες έκθεσης.	67
Εικόνα 46 : Ισοδύναμα κυκλώματα με τους αντίστοιχους πίνακες των στοιχείων τους, των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 3 ώρες έκθεσης.	68
Εικόνα 47 : Ισοδύναμα κυκλώματα με τους αντίστοιχους πίνακες των στοιχείων τους, των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 6 ώρες έκθεσης.	69
Εικόνα 48 : Ισοδύναμα κυκλώματα με τους αντίστοιχους πίνακες των στοιχείων τους, των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 12 ώρες έκθεσης.	70
Εικόνα 49 : Ισοδύναμα κυκλώματα με τους αντίστοιχους πίνακες των στοιχείων τους, των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 24 ώρες έκθεσης.	71
Εικόνα 50 : Ισοδύναμα κυκλώματα με τους αντίστοιχους πίνακες των στοιχείων τους, των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 48 ώρες έκθεσης.	72
Εικόνα 51 : Μικροφωτογραφίες δοκιμίων AA2198-T8 σε διάλυμα 3,5 NaCl για 48h.....	85

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 : Σειρές των κραμάτων διαμόρφωσης.	15
Πίνακας 2 : Σειρές των κραμάτων χύτευσης.	16
Πίνακας 3 : Ονοματολογία θερμικής κατεργασίας γήρανσης των κραμάτων αλουμινίου.	18
Πίνακας 4 : Περιεκτικότητα στοιχείων στο κράμα αλουμινίου AA2198.....	19
Πίνακας 5 : Μηχανικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου AA2198.....	19
Πίνακας 6 : Πίνακας τιμών των παραμέτρων του ηλεκτρικού κυκλώματος.....	28
Πίνακας 7 : Πίνακας τιμών των παραμέτρων του ηλεκτρικού κυκλώματος.....	29
Πίνακας 8 : Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T8 στις 0 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.	60
Πίνακας 9 : Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T3 στις 0 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.	60
Πίνακας 10 : Πίνακας τιμών των αντίστοιχων στοιχείων των ισοδύναμων κυκλωμάτων για τα κράματα αλουμινίου AA2198-T8 και AA2198-T3 σε κάθε ώρα έκθεσης στο διάλυμα NaCl.	81

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 : Διάγραμμα Nyquist του κράματος AA2198-T8 για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα NaCl 3,5%.....	61
Διάγραμμα 2 : Διάγραμμα Bode του κράματος AA2198-T8 για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα NaCl 3,5%.....	62
Διάγραμμα 3 : Διάγραμμα Nyquist του κράματος AA2198-T3 για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα NaCl 3,5%.....	63
Διάγραμμα 4 : Διάγραμμα Bode του κράματος AA2198-T8 για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα NaCl 3,5%	63
Διάγραμμα 5 : Διαγράμματα Bode των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 0 ώρες έκθεσης.	66
Διάγραμμα 6 : Διαγράμματα Bode των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 1 ώρες έκθεσης.	67
Διάγραμμα 7 : Διαγράμματα Bode των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 3 ώρες έκθεσης.	68
Διάγραμμα 8 : Διαγράμματα Nyquist των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 6 ώρες έκθεσης.....	69
Διάγραμμα 9 : Διαγράμματα Nyquist των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 12 ώρες έκθεσης.....	70
Διάγραμμα 10 : Διαγράμματα Bode των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 24 ώρες έκθεσης.	71
Διάγραμμα 11 : Διαγράμματα Nyquist των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 48 ώρες έκθεσης.....	72
Διάγραμμα 12 : Καμπύλες των αντιστάσεων R1 (διαλύματος) για 0-6 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.	73
Διάγραμμα 13 : Καμπύλες των αντιστάσεων R2 (προστατευτικού φιλμ) για 0-6 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.	73
Διάγραμμα 14 : Καμπύλες των στοιχείων Q1 (CPE, προστατευτικού φιλμ) για 0-6 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.	74
Διάγραμμα 15 : Καμπύλες των στοιχείων W1 (αντίσταση διάχυσης) για 0-6 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.	74
Διάγραμμα 16 : Καμπύλες των αντιστάσεων R1 (διαλύματος) για 12-48 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.	75
Διάγραμμα 17 : Καμπύλες των αντιστάσεων R2 (προστατευτικού φιλμ) για 12-48 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.	75

Διάγραμμα 18 : Καμπύλες των στοιχείων Q1 (CPE, προστατευτικού φίλμ) για 12-48 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.	76
Διάγραμμα 19 : Καμπύλες των αντιστάσεων R3 (μεταφοράς φορτίου) για 12-48 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.	76
Διάγραμμα 20 : Καμπύλες των στοιχείων Q2 (CPE, μεταφοράς φορτίου) για 12-48 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.	77
Διάγραμμα 21 : Καμπύλες των στοιχείων W1 (αντίσταση διάχυσης) για 12-48 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.	77
Διάγραμμα 22 : Διάγραμμα Nyquist του κράματος AA2198-T8 για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα NaCl 3,5%.....	78
Διάγραμμα 23 : Διάγραμμα Nyquist του κράματος AA2198-T3 για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα NaCl 3,5%.....	79
Διάγραμμα 24 : Καμπύλες των αντιστάσεων R1 (διαλύματος) για 0-48 ώρες έκθεσης σε διάλυμα.	82
Διάγραμμα 25 : Καμπύλες των αντιστάσεων R2 (προστατευτικού φίλμ) για 0-48 ώρες έκθεσης σε διάλυμα.	82
Διάγραμμα 26 : Καμπύλες των στοιχείων Q1 (CPE, προστατευτικού φίλμ) για 0-48 ώρες έκθεσης σε διάλυμα.	83
Διάγραμμα 27 : Καμπύλες των αντιστάσεων R3 (μεταφοράς φορτίου) για 12-48 ώρες έκθεσης σε διάλυμα.	83
Διάγραμμα 28 : Καμπύλες των στοιχείων Q2 (CPE, μεταφοράς φορτίου) για 12-48 ώρες έκθεσης σε διάλυμα.	83
Διάγραμμα 29 : Καμπύλες των στοιχείων W1 (αντίσταση διάχυσης) για 0-48 ώρες έκθεσης σε διάλυμα.	84
Διάγραμμα 30 : Τυπικές πειραματικές καμπύλες εφελκυσμού των προδιαβρωμένων δοκιμίων (α) AA2198-T8 και (β) AA2198-T3 για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης σε διάλυμα EXCO.	86
Διάγραμμα 31 : Υποβάθμιση (α) του συμβατικού ορίου διαρροής των προδιαβρωμένων δειγμάτων του κράματος αλουμινίου 2198-T8 σε σύγκριση με το 2198-T3 που εκτέθηκαν για διαφορετικούς χρόνους σε διάλυμα EXCO.....	87
Διάγραμμα 32 : Τυπικές πειραματικές καμπύλες εφελκυσμού των προδιαβρωμένων δοκιμίων (α) AA2198-T8 και (β) AA2024-T3 για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης σε διάλυμα 3,5 w.t % NaCl.	88
Διάγραμμα 33 : Υποβάθμιση (α) του συμβατικού ορίου διαρροής των προδιαβρωμένων δειγμάτων του κράματος αλουμινίου 2198-T8 σε σύγκριση με το 2024-T3 που εκτέθηκαν για διαφορετικούς χρόνους σε διάλυμα 3,5% NaCl.....	88

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Εισαγωγή.

1.1 Το Αλουμίνιο και τα κράματά του.

Το αλουμίνιο αποτελεί το πιο διαδεδομένο και άφθονο μη σιδηρούχο μέταλλο στην παγκόσμια αγορά. Ανακαλύφθηκε στα μέσα του 19^{ου} αιώνα και θεωρούνταν πολύτιμο μέταλλο λόγω της αντοχής του στην οξείδωση και της λαμπερής του όψης. Η κατεργασία του είναι εύκολη αλλά είναι σχετικά αδύναμο υλικό και δεν συνίσταται η χρήση του σε εφαρμογές όπου η αντοχή είναι σημαντικός παράγοντας. Για την ενίσχυση της αντοχής του αναμιγνύεται με άλλα μέταλλα δημιουργώντας τα κράματά του.

Το αλουμίνιο και τα κράματά του βρίσκουν χρήσεις σε μεγάλο εύρος κατασκευών με πιο χαρακτηριστική την κατασκευή αεροσκαφών. Είναι το κύριο υλικό για τα δομικά του μέρη λόγω του χαμηλού του βάρους και των ειδικών μηχανικών ιδιοτήτων του.[1]

Είναι σχετικά μη ανθεκτικό αλλά πολύ όλκιμο υλικό. Η πυκνότητά του είναι μόλις 2.69 g/cm³, το μέτρο ελαστικότητας και το βάρος του είναι περίπου το ένα τρίτο του χάλυβα. Αυτή η ιδιότητα δεν βελτιώνεται σημαντικά με την κραμάτωση. Οι κυριότερες προσθήκες στο αλουμίνιο είναι ο χαλκός, ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το πυρίτιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος ενώ κι άλλα στοιχεία προστίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες για ειδικούς σκοπούς. [2]

Τα κράματα αλουμινίου χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής τους, τα σφυρήλατα ή ελατά κράματα και τα κράματα χύτευσης.

1.1.1 Κράματα διαμόρφωσης (σφυρήλατα) ή ελατά κράματα.

Το σύστημα σχεδιασμού των κραμάτων διαμόρφωσης περιέχει τέσσερα ψηφία :

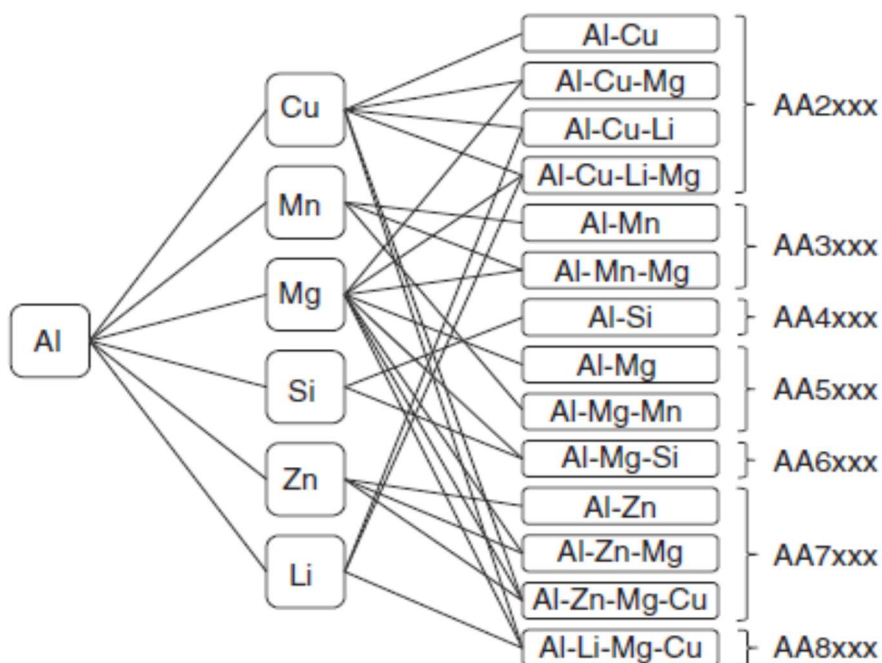
- Το πρώτο ψηφίο συμβολίζει το κύριο στοιχείο του κράματος (κραματικά).
- Το δεύτερο ψηφίο συμβολίζει τις τροποποιήσεις των ορίων περιεκτικότητας των προσμίξεων.
- Το τρίτο και το τέταρτο προσδιορίζουν την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας σειράς.

Σειρά	Περιεχόμενα Στοιχεία
1xxx	Καθαρό αλουμίνιο (Al>99%)

2xxx	Κράματα χαλκού (Al-Cu)
3xxx	Κράματα μαγγανίου (Al-Mn)
4xxx	Κράματα πυριτίου (Al-Si)
5xxx	Κράματα μαγνησίου (Al-Mg)
6xxx	Κράματα μαγνησίου και πυριτίου (Al-Mg-Si)
7xxx	Κράματα ψευδαργύρου (Al-Zn)
8xxx	Κράματα αλουμινίου με άλλα στοιχεία (Al)
9xxx	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

Πίνακας 1 : Σειρές των κραμάτων διαμόρφωσης.

Επίσης στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η κατηγοριοποίηση των κραμάτων διαμόρφωσης ανάλογα με τις προσμίξεις που υφίσταται το αλουμίνιο.



Εικόνα 1 : Σχεδιάγραμμα των βασικών προσμίξεων για τη δημιουργία των κραμάτων διαμόρφωσης ανά σειρά. [3]

1.1.2 Κράματα χύτευσης.

Αντίστοιχα το σύστημα σχεδιασμού και ονοματολογίας των κραμάτων χύτευσης περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία :

- Το πρώτο ψηφίο δείχνει τα κύρια κραματικά στοιχεία.
- Το δεύτερο και τρίτο ψηφίο δείχνουν τις διάφορες μορφές του κράματος
- Το τέταρτο ψηφίο δείχνει αν είναι χυτό (0) ή ingot (1,2)

Σειρά	Περιεχόμενα Στοιχεία
1xx.x	Καθαρό αλουμίνιο (Al>99%)
2xx.x	Κράματα χαλκού (Al-Cu)
3xx.x	Κράματα πυριτίου (Al-Si) με προσθήκη χαλκού (Cu) ή/και μαγνησίου (Mg)
4xx.x	Κράματα πυριτίου (Al-Si)
5xx.x	Κράματα μαγνησίου (Al-Mg)
6xx.x	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7xx.x	Κράματα ψευδαργύρου (Al-Zn)
8xx.x	Κράματα κασσιτέρου (Al-Sn)
9xx.x	Κράματα αλουμινίου (Al) με άλλα στοιχεία

Πίνακας 2 : Σειρές των κραμάτων χύτευσης.

1.1.3 Ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου.

Τα ελατά ή σφυρήλατα κράματα αλουμινίου παρουσιάζουν ιδιότητες που τα καθιστούν ιδανικά για ένα εύρος εφαρμογών και κατηγοριών χρήσης. Τα πιο βασικά είναι τα εξής :[4]

- Η αντοχή τους στην διάβρωση κυρίως των σειρών 1xxx, 3xxx, 5xxx και 6xxx να χρησιμοποιούνται σε περιβάλλοντα με επαφή σε θαλασσινό νερό.
- Η θερμική αγωγιμότητα, είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας με σημείο τήξης κοντά στους 535° C.

- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα ως προς τον ηλεκτρισμό.
- Εύκολη κατεργασία για την παραγωγή προϊόντων σε διάφορα σχήματα.
- Ευκολία στην συγκόλληση και στην ένωσή τους με διάφορες μεθόδους.
- Υψηλή αντοχή σε σχέση με το βάρος του για χρήσεις στην αεροναυπηγική και τις αυτοκινητοβιομηχανίες.

Οι αντίστοιχες ιδιότητες των χυτών κραμάτων είναι :

- Η ευκολία στην χύτευση, ανάλογα με την σειρά.
- Η υψηλή αντοχή κυρίως της σειρά 2xx.x
- Η τελική διαμόρφωση και το φινίρισμα, ανάλογα πάλι με την σειρά.[5]

1.2 Σύστημα σχεδιασμού θερμικών κατεργασιών κραμάτων αλουμινίου.

Οι προδιαγραφές ενός κράματος αλουμινίου πρέπει να προσδιορίζεται από τις φάσεις κατασκευής του και τις ιδιότητές του. Ένα σύστημα χαρακτηρισμού αναπτύχθηκε από την Ένωση Αλουμινίου για όλα τα κράματα. Οι βασικές κατηγορίες κατεργασιών παρουσιάζονται παρακάτω : [6]

F- Όπως παράγεται (χωρίς θερμική επεξεργασία).

O- Με ανόπτηση, το O μπορεί να ακολουθείται από ένα ψηφίο διαφορετικό του μηδέν.

H- Ψυξηλατημένο (Σκληρυμένο). Αυξάνουν την αντοχή τους χωρίς θερμική επεξεργασία. Το H ακολουθείται από δύο ή περισσότερα ψηφία.

W- Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης.

T- Με θερμική κατεργασία διαφορετική από τις προηγούμενες. Συνήθως με σκλήρυνση μετά από βαφή και κατακρήμνιση. Το T ακολουθείται από ένα ή περισσότερα ψηφία όπως φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

T1	Απότομη ψύξη μετά από κατεργασία διαμόρφωσης εν θερμώ και φυσική γήρανση, κυρίως στην σειρά 6xxx.
T2	Απότομη ψύξη μετά από κατεργασία διαμόρφωσης εν θερμώ, ψυξηλασία και φυσική γήρανση, κυρίως στις χυτές σειρές.
T3	Διαλυτοποίηση βαφή σε νερό με πάγο (quenching) και μετά φυσική γήρανση

T4	Κατεργασία διαλυτοποίησης και φυσική γήρανση.
T5	Απότομη ψύξη μετά από επεξεργασία διαμόρφωσης εν θερμώ και τεχνητή γήρανση.
T6	Κατεργασία διαλυτοποίησης και τεχνητή γήρανση.
T7	Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και υπεργήρανσης.
T8	Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, απότομη ψύξη και τεχνητή γήρανση.
T9	Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, τεχνητή γήρανση και μετά ψυξηλασία.
T10	Απότομη ψύξη μετά από κατεργασία διαμόρφωσης εν θερμώ, ψυξηλασία και τεχνητή γήρανση, κυρίως σε χυτά κράματα.

Πίνακας 3 : Ονοματολογία θερμικής κατεργασίας γήρανσης των κραμάτων αλουμινίου.

1.3 Τα κράματα της σειράς 2xxx.

Τα κράματα αυτής της σειράς έχουν δημιουργηθεί με βασική προσθήκη τον χαλκό (Al-Cu) σε ποσοστά περιεκτικότητας 2,6% - 6,3% αλλά μπορεί να εμφανιστούν και με προσθήκη μαγνησίου σε περιεκτικότητα έως 1,5%. Βασικότερο κράμα της σειράς στην παραγωγή αεροπλάνων είναι το AA2024-T3 σε κατάσταση φυσικής γήρανσης όπου παρουσιάζει υψηλή ολκιμότητα, σκληρότητα και αντοχή στην δημιουργία ρωγμών αλλά κι αυξημένη ευαισθησία στην ατμοσφαιρική διάβρωση λόγω της περιεκτικότητας Cu. [7]

- Δημιουργούνται με θερμική κατεργασία.
- Διαθέτουν υψηλές αντοχές στις θερμοκρασίες περιβάλλοντος αλλά και σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Χρησιμοποιούνται κυρίως στην αεροναυπηγική και τις μεταφορές.
- Αντοχή σε εφελκυσμό 186 – 427 Μpa.

Τα κράματα αλουμινίου 2xxx χρησιμοποιούνται ευρέως στα τμήματα των αεροσκαφών όπως στην άτρακτο, στα πτερύγια και σε σημεία με μεγάλη μηχανική καταπόνηση όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2 : Ποσοστό κατανομής κατά βάρος των δομικών υλικών του αεροσκάφους A380

1.3.1 Κράμα αλουμινίου 2198.

Το κράμα αλουμινίου με το οποίο ασχοληθήκαμε στην παρούσα εργασία είναι το κράμα αλουμινίου 2198 ανήκει στην κραματική σειρά 2xxx η οποία περιέχει τα κράματα διαμόρφωσης και τα θερμικά κατεργάσιμα. Το εν λόγω κράμα αλουμινίου είναι θερμικά κατεργάσιμο (σκλήρυνση με κατακρημνίσεις) και έχει δοθεί στην κατάσταση θερμικής κατεργασίας T8 ή T3 και η οποία θα εξηγηθεί στην συνέχεια.

Ανήκει στην τρίτη γενιά κραμάτων με χαρακτηριστικό την περιεκτικότητα σε λίθιο (Li) μικρότερη από 2% κατά βάρος. Η κύρια σύνθεση του κράματος παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα : [8]

Cu	Li	Zn	Mn	Mg	Zr	Si	Ag	Fe
2.9-3.5	0.8-1.1	≤0.35	≤0.5	0.25-0.8	0.04-0.18	≤0.08	0.1-0.5	≤0.01

Πίνακας 4 : Περιεκτικότητα στοιχείων στο κράμα αλουμινίου AA2198.

Η νέα γενιά κραμάτων Al-Li παρέχει εκτός από εξοικονόμηση βάρους, αντοχή σε διάφορες καταπονήσεις και εμφάνισης ρωγμών και καλύτερη συμπεριφορά σε περιβάλλοντα διάβρωσης.

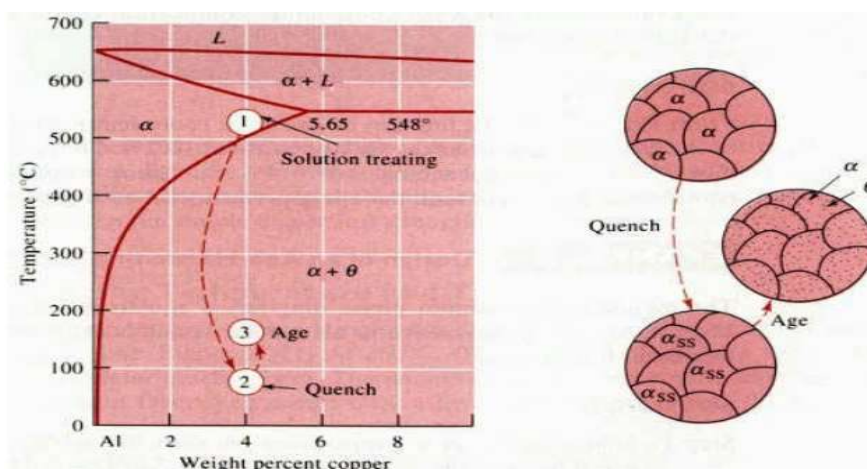
Υλικό	Αντοχή εφελκυσμού (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	Ολκιμότητα (%)
AA2198-T8	469	510	14
AA2198-T3	315	375	15

Πίνακας 5 : Μηχανικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου AA2198.

1.3.2 Κατάσταση T8 και T3 – Σκλήρυνση με κατακρήμνιση

Η σκλήρυνση με κατακρήμνιση είναι μια διαδικασία στην οποία δημιουργείται μία λεπτομερής διασπορά σωματιδίων δεύτερης φάσης (κατακρημνίσματα) εντός της μήτρας του υλικού. Τα κατακρημνίσματα αυτά δρουν ανασταλτικά ως προς την κίνηση των γραμμο-αταξιών (διαταραχών) με αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας του υλικού. Πραγματοποιούνται σε τρεις (3) φάσεις :

(1) Ομογενοποίηση, (2) Βαφή, (3) Τεχνητή γήρανση όπως φαίνονται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3 : Στάδια σκλήρυνσης κατακρήμνισης.

Το πρώτο στάδιο είναι η στερεή διαλυτοποίηση (*Solid solution*), όπου το υλικό θερμαίνεται κοντά στην θερμοκρασία της διαλυτοποίησης του ($>500^{\circ}\text{C}$). Η θερμοκρασία στερεής διαλυτοποίησης είναι σημαντικός παράγοντας καθώς σχετίζεται άμεσα με τον ρυθμό διάχυσης των κραματικών στοιχείων.

Το δεύτερο στάδιο είναι η απότομη ψύξη - βαφή (*Quenching*), σκοπός της βαφής είναι η διατήρηση του υπέρκορου στερεού διαλύματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό επιτυγχάνεται με την ταχεία ψύξη του κράματος με κάποιο ψυκτικό μέσο (π.χ. συνθήκες παγόλουτρου).

Το τρίτο στάδιο είναι η γήρανση, τεχνητή γήρανση (*Artificial ageing*) T8 ή φυσική γήρανση (*Natural ageing*) T3, η οποία αποτελεί μια διαδικασία με την οποία δημιουργείται μια ομοιόμορφη διασπορά κατακρημνισμάτων από το υπέρκορο στερεό διάλυμα που μεταπίπτει σε πιο σταθερή μορφή (ισορροπία). Η τεχνητή γήρανση (T8) πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ $120-200^{\circ}\text{C}$.

1.4 Αναγκαιότητα της παρούσας εργασίας.

Υπάρχουν πολλές βιβλιογραφικές αναφορές για δοκιμές διάβρωσης και εφελκυσμού των συνήθων κραμάτων αλουμινίου κυρίως του AA2024 λόγω της ευρείας χρήσης του στην αεροναυπηγική βιομηχανία. Το εν λόγω κράμα αλουμινίου αντικαθίσταται σταδιακά από το 3^{ης} γενιάς κράμα αλουμινίου AA2198. Για το νέο κράμα αλουμινίου είναι λίγες οι μελέτες κι οι αναφορές που παρουσιάζουν την μηχανική συμπεριφορά του στον εφελκυσμό και την αντίστασή του στην διάβρωση σε διαφορετικές συνθήκες θερμικής κατεργασίας, όπως επίσης και της σύγκρισης δύο κραμάτων της ίδιας σειράς αλλά διαφορετικής γήρανσης, της T8 σε σχέση με την T3. Γι αυτό στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα επιχειρηθεί πειραματική μελέτη διάβρωσης σε διάλυμα NaCl και σύγκριση των αποτελεσμάτων της όπως και πειραματική μελέτη εφελκυστικών μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών αφού έχουν υποστεί έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον. Λόγω του ότι το κράμα αλουμινίου AA2198 είναι σε στάδιο ν αντικαταστήσει το κράμα αλουμινίου AA2024 στις περισσότερες εφαρμογές του στην αεροναυπηγική βιομηχανία γίνεται και μία σύγκριση μηχανικής αντοχής εφελκυσμού μεταξύ των δύο κραμάτων.

Τέλος με την παρούσα εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος ενός πολύ ενδιαφέροντος μεταπτυχιακού προγράμματος, του ΜΕΔΜΟΔΕ, το οποίο παρείχε ουσιαστικές γνώσεις στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας με πλήθος ερευνητικών και πειραματικών διαδικασιών κι είναι ένας προθάλαμος για την συνέχιση των σπουδών σε επίπεδο διδακτορικής έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Διάβρωση.

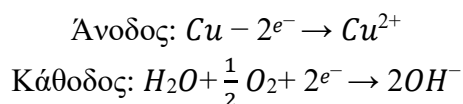
2.1 Γενικά.

Με μεγάλο μέρος του πληθυσμού της Γης να ζει κοντά σε υγρά περιβάλλοντα, η διάβρωση των μεταλλικών υλικών αποτελεί αναπόφευκτο μέρος της ανθρώπινης εμπειρίας. Ενώ η οξείδωση του σιδήρου (σκουριά) είναι η πιο εύκολα αναγνωρίσιμη μορφή διάβρωσης, αυτή αντιπροσωπεύει μόνο ένα μέρος (σημαντικό) των υλικών απωλειών. Λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας και ποικιλίας των υλικών συστημάτων, τα οποία περιλαμβάνουν όχι μόνο μεταλλικά υλικά αλλά και κεραμικά, πολυμερή, σύνθετα και κράματα, τα οποία υπόκεινται σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην κοινωνία και στην οικονομική ζωή των κρατών. [9]

Σύμφωνα με τη διεθνή προδιαγραφή ASTM G15 ως διάβρωση ορίζεται «η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων του μετάλλου και συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του». [10]

Ο μηχανισμός της διάβρωσης ενός μετάλλου ή κράματος περιλαμβάνει το σχηματισμό πολλών μικρογαλβανικών στοιχείων στην μικροδομή του υλικού, όπου αναπτύσσονται ανοδικές περιοχές οι οποίες ευνοούν περισσότερο την οξείδωση, δηλαδή την αποβολή ιόντων προς το περιβάλλον, και καθοδικές περιοχές στις οποίες γίνεται αναγωγή/πρόσληψη των ιόντων.

Στην πραγματικότητα η διάβρωση μεταλλικών στοιχείων χαρακτηρίζεται από τις παρακάτω σχέσεις (παράδειγμα οξείδωσης του χαλκού):



Στην περίπτωση του αλουμινίου και των κραμάτων του σχηματίζεται ένα συμπαγές προϊόν (φιλμ) στην επιφάνεια του υλικού κατά τη διάρκεια της διάβρωσης, π.χ. οξείδιο, που σταδιακά επιβραδύνει και τελικά μπορεί να σταματήσει πρακτικά τη διάβρωση. Το αλουμίνιο δηλαδή παθητικοποιείται. Το φιλμ είναι ανομοιόμορφο, λεπτό και μη συνεκτικό, επομένως δεν είναι ικανοποιητική η προστασία που παρέχει. Σε αυτή την περίπτωση είναι δυνατόν σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα που περιέχουν ιόντα κυρίως Cl⁻, η διάβρωση να συνεχιστεί αλλά με μηχανισμό τοπικής διάβρωσης με τον σχηματισμό επιφανειακών οπών (pits) ή ρωγμών που μπορεί ταχύτατα να οδηγήσει σε τοπική καταστροφή του υλικού. Η τοπική διάβρωση παρατηρείται συχνότερα σε πραγματικές αεροναυπηγικές εφαρμογές. Για αυτό το λόγο, παρουσιάζονται παρακάτω οι κυριότερες μορφές διάβρωσης με τοπική επίδραση οι οποίες διακρίνονται σε μεταλλικές και μη-μεταλλικές:

1. Μεταλλική διάβρωση :
 - Ομοιόμορφη ή γενική
 - Γαλβανική
 - Περικρυσταλλική
 - Τριμματική
 - Διάβρωση αποφλοιώσης
 - Υψηλής θερμοκρασίας αερίων
 - Διάβρωση υπό μηχανικές τάσεις κ.α.

2. Μη μεταλλική διάβρωση :
 - Κεραμικών
 - Υδρόλυση
 - Οργανικών επικαλύψεων και πολυμερών
 - Ραδιόλυση κ.α.

Οι μεγάλες προκλήσεις στην έρευνα της διάβρωσης και της μηχανικής με τις οποίες έρχονται αντιμέτωπες οι αεροναυπηγικές εταιρείες μπορούν να συνοψιστούν στις επόμενες τέσσερις βασικές κατηγορίες έρευνας κι ανάπτυξης.

1. Ανάπτυξη οικονομικά αποδοτικών, φιλικών προς το περιβάλλον, ανθεκτικών στη διάβρωση υλικών κι επικαλύψεων.
2. Μοντελοποίηση υψηλής πιστότητας για την πρόβλεψη της υποβάθμισης της διάβρωσης σε πραγματικά περιβάλλοντα.
3. Επιτάχυνση της δοκιμής διάβρωσης υπό ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες που σχετίζονται ποσοτικά με τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά που παρατηρείτε σε περιβάλλοντα.
4. Ακριβής πρόβλεψη του υπολειπόμενου χρόνου λειτουργίας μέχρι να γίνει απαραίτητη η σημαντική επισκευή, αντικατάσταση ή γενική επισκευή, δηλ. πρόγνωση διάβρωσης.

Οι διαβρώσεις που έχουν ενδιαφέρον στην παρούσα εργασία είναι οι μεταλλικές.

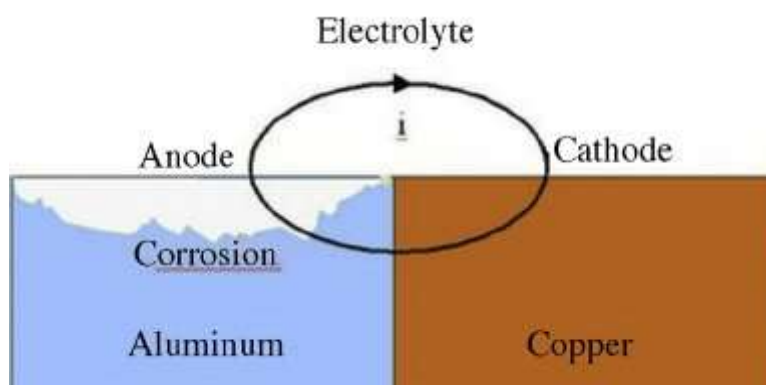
2.2 Γαλβανική διάβρωση (Galvanic corrosion).

Η γαλβανική διάβρωση παρουσιάζεται όταν δύο μέταλλα ή κράματα με διαφορετικές συστάσεις συνδέονται ηλεκτρικά και ταυτόχρονα εκτίθενται σε υδατικό διάλυμα (ηλεκτρολύτη). Το λιγότερο ευγενές ή περισσότερο δραστικό μέταλλο ή κράμα θα υποστεί διάβρωση. Το πιο αδρανές μέταλλο ή κράμα θα προστατευθεί από τη διάβρωση. Το σημείο διάβρωσης είναι εκεί όπου τα τρία στοιχεία (τα δύο μέταλλα ή κράματα και ο ηλεκτρολύτης) έρχονται σε επαφή. Στην περίπτωση του αλουμινίου και των κραμάτων του η διάβρωση συνεχίζεται μέχρις ότου αλλοιωθεί όλο. Εάν ο

ηλεκτρολύτης δεν περιέχει οξειδωτικό παράγοντα (π.χ. ατμοσφαιρικό οξυγόνο) τότε δεν υφίσταται διάβρωση. [10]



Εικόνα 4 : Μορφή Γαλβανικής διάβρωσης

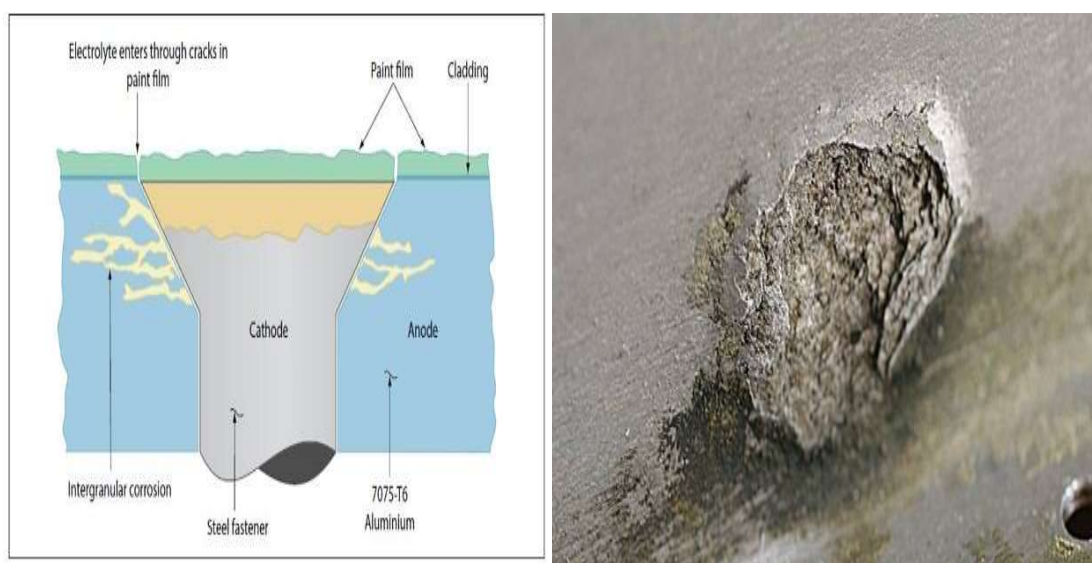


Εικόνα 5 : Σχηματική παράσταση της διεργασίας της γαλβανικής διάβρωσης.

2.3 Περικρυσταλλική διάβρωση (Intergranular corrosion).

Η περικρυσταλλική διάβρωση συμβαίνει επιλεκτικά κατά μήκος των ορίων των κόκκων ή σε παρακείμενες περιοχές, δίχως να υπάρχει αξιοσημείωτη επίθεση στους ίδιους τους κόκκους. Αυτό γίνεται λόγω διαφορών στο ηλεκτροχημικό δυναμικό μεταξύ των περιοχών των ορίων των κόκκων και των διάφορων ενδομεταλλικών φάσεων (κατακρημνίσεων) και προσμίξεων που σχηματίζονται σε αυτές τις περιοχές. Τα όρια των κόκκων είναι περιοχές σχηματισμού (κατακρήμνιση) και είναι χημικώς και φυσικώς διαφορετικά απ' αυτούς καθ' αυτούς τους κόκκους. Η περικρυσταλλική διάβρωση στα κράματα αλουμινίου μπορεί να είναι το αποτέλεσμα της απ' ευθείας επίθεσης σε ένα κόκκο ενδομεταλλικής φάσης, ο οποίος είναι λιγότερο ανθεκτικός

στη διάβρωση από την μήτρα του υλικού. Στα κράματα αλουμινίου-χαλκού, όπως είναι το κράμα 2024 κι άλλα αεροναυπηγικά κράματα, σχηματίζεται η φάση Al_2Cu , η οποία είναι πιο δραστική από τη μήτρα. Αυτό σημαίνει ότι μάλλον λειτουργεί σαν κάθοδος και επιταχύνει τη διάβρωση σε μία ζώνη παρακείμενη στο όριο του κρυστάλλου. Παρόλο που με τον σχηματισμό πολλών κόκκων, τα κράματα του αλουμινίου είναι ευαίσθητα στην περικρυσταλλική διάβρωση, η αποφυγή σχηματισμού πολλών κόκκων δεν αποτελεί λύση γιατί τα πολλά όρια των κόκκων είναι σημαντικά για την επίτευξη μεγάλων τιμών αντοχής και απαραίτητα για την καλή μηχανική απόδοση των μεταλλικών υλικών. Το εάν το κράμα θα είναι υποκείμενο σε περικρυσταλλική διάβρωση σε ένα δεδομένο περιβάλλον είναι σημαντικός παράγοντας για την επιλογή ή όχι του συγκεκριμένου κράματος. [11]

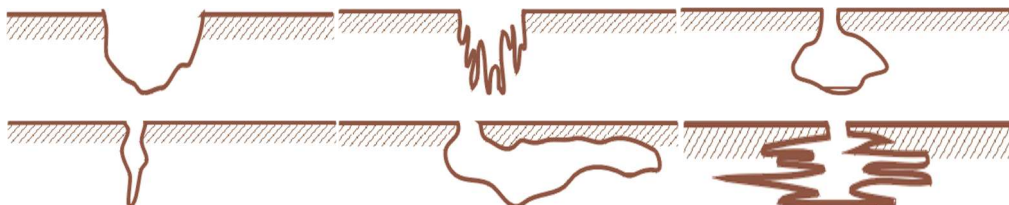


Εικόνα 6 : Μορφές Περικρυσταλλικής διάβρωσης

2.4 Τριμματική διάβρωση (Pitting corrosion).

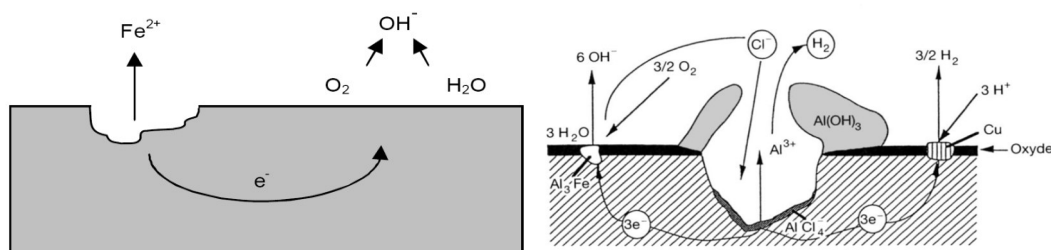
Η τριμματική διάβρωση (pitting corrosion) είναι μία μορφή εξαιρετικά εντοπισμένης διάβρωσης (τοπική) κατά την οποία δημιουργούνται μικρές οπές/κοιλότητες στο υλικό. Είναι μία από τις πιο επιβλαβείς μορφές διάβρωσης διότι είναι δύσκολη στον εντοπισμό και διαδίδεται γρήγορα με μικρή απώλεια υλικού μέχρι την αστοχία. Μία μικρή οπή με ελάχιστη συνολική απώλεια υλικού μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία ολόκληρου του μηχανικού συστήματος. Η τριμματική διάβρωση μπορεί να ξεκινήσει από ένα μικρό ελάττωμα της επιφάνειας, όπως για παράδειγμα μία γρατζουνιά, μία τοπική ανομοιογένεια υλικού ή μία ζημιά στην προστατευτική επίστρωση. [11]

Οι οπές-κοιλότητες που προκύπτουν μπορούν να έχουν σχήματα, πλατιά και ρηχά ή στενά και βαθιά. Το σχήμα της διάβρωσης μπορεί ν' αναγνωριστεί μέσω μεταλλογραφίας και μικροσκοπίας.



Εικόνα 7 : Σχηματικές παραστάσεις τριμματικής διάβρωσης

Όταν υπάρχει ένα μέταλλο σ' ένα ηλεκτρολύτη π.χ. NaCl, η οπή λειτουργεί ως άνοδος κι η υπόλοιπη επιφάνειά του ως κάθοδος όπως φαίνεται στο παρακάτω σχηματικό παράδειγμα.



Εικόνα 8 : Μηχανισμός τοπικής διάβρωσης σιδήρου κι αλουμινίου.

Αυτός ο τύπος της διάβρωσης είναι εξαιρετικά ύπουλος, καθώς προκαλεί μικρή απώλεια υλικού στην επιφάνεια του αλλά βλάπτει τις βαθιές δομές του μετάλλου. Οι οπές στην επιφάνεια συχνά καλύπτονται από προϊόντα διάβρωσης (σκουριά, υπολείμματα αλουμίνιας).

Η τριμματική διάβρωση μπορεί επίσης να ξεκινήσει από ένα μικρό ελάττωμα της επιφάνειας, το οποίο μπορεί να είναι μία γρατζουνιά, μία τοπική ανομοιογένεια υλικού ή μία ζημιά στην προστατευτική επίστρωση.

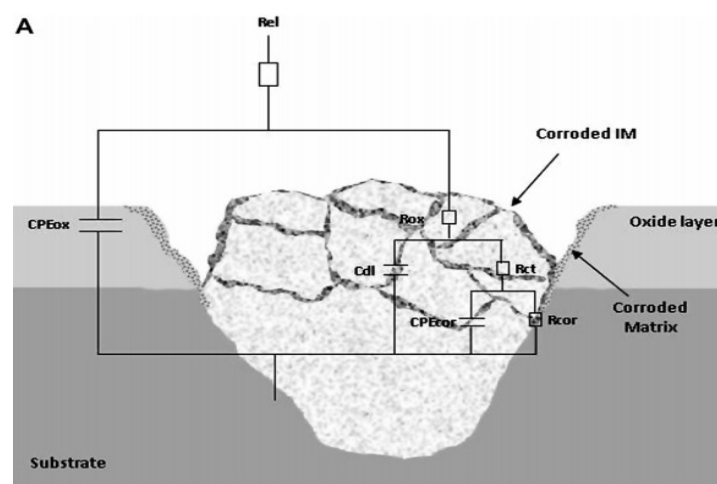
Η τριμματική διάβρωση διαφέρει από την ομοιόμορφη διάβρωση γι αυτό ο ρυθμός κι η έντασή της δεν μπορεί να υπολογιστεί με τον καθορισμό της απώλειας μάζας ούτε με την ποσότητα του υδρογόνου που απελευθερώνεται. Επομένως θα πρέπει να υπολογιστεί μέσω άλλων κριτηρίων όπως είναι :

- Η πυκνότητα των οπών σε μία καθορισμένη περιοχή. Η μέτρηση της πυκνότητας των οπών γίνεται με απλή μέτρηση των ορατών οπών σε μία καθορισμένη περιοχή δείγματος.
- Η τάση εμφάνισης των οπών. Είναι πιο σημαντική από την πυκνότητα διότι παίζει ρόλο στην διάρκεια ζωής των κατασκευών. Υπολογίζεται στατιστικά μετρώντας το βάθος των οπών σε μια χρονική περίοδο.

- Η πιθανότητα εμφάνισης των οπών. Από ένα μεγάλο αριθμό δειγμάτων εντοπίζονται τα δείγματα που διαβρώθηκαν και ορίζεται η πιθανότητα εμφάνισης.

2.5 Μοντελοποίηση της διάβρωσης σε κράματα αλουμινίου.

Σύμφωνα με αναφορά [12] για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της διάβρωσης του κράματος αλουμινίου AA 2024-T3, χρησιμοποιήθηκε μικροσκοπία και ηλεκτροχημικές μεθόδους. Πραγματοποιήθηκαν ηλεκτροχημικές μετρήσεις και ελήφθησαν δεδομένα από την πειραματική διαδικασία με τα οποία κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα Nyquist και BODE. Η συμπεριφορά της διάβρωσης του κράματος αλουμινίου προσομοιώθηκε με ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ώστε να γίνει κατανοητή η διαδικασία της διάβρωσης στο κράμα αλουμινίου όπως φαίνεται στην επόμενη Εικόνα 9. [13][14]



Εικόνα 9 : Προσομοίωση του ισοδύναμου κυκλώματος ενός διαβρωμένου κατακρημνίσματος δεύτερης φάσης στο κράμα αλουμινίου AA2024-T3

Από την παραπάνω εικόνα γίνεται κατανοητό το φαινόμενο της διάβρωσης σε στάδια στην επιφάνεια του δοκιμίου. Το αλουμίνιο έχει ένα προστατευτικό επιφανειακό στρώμα οξειδίου (oxide layer) το οποίο διαβρώνεται πρώτα όταν εκτεθεί στο διάλυμα. Τα προϊόντα του φιλμ επικάθονται και παρουσιάζουν μία μικρή αντίσταση έως ότου η διάβρωση εισχωρήσει στο εσωτερικό του κράματος αλουμινίου. Με την πάροδο του χρόνου και της περαιτέρω έκθεσης του αλουμινίου στο διάλυμα η διάβρωση εισέρχεται στο εσωτερικό του (μήτρα), λόγω και της παρουσίας του χαλκού. Όλες οι διαδικασίες έχουν μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας στοιχεία ηλεκτρικού κυκλώματος κατασκευάζοντας ένα συνολικό ισοδύναμο κύκλωμα με αντιστάσεις και πυκνωτές.

Τέλος, ελήφθησαν νέα δεδομένα από το λογισμικό της πειραματικής διαδικασίας για το ισοδύναμο κύκλωμα και έγινε μία σύγκριση (fit) σε κοινό διάγραμμα Nyquist και

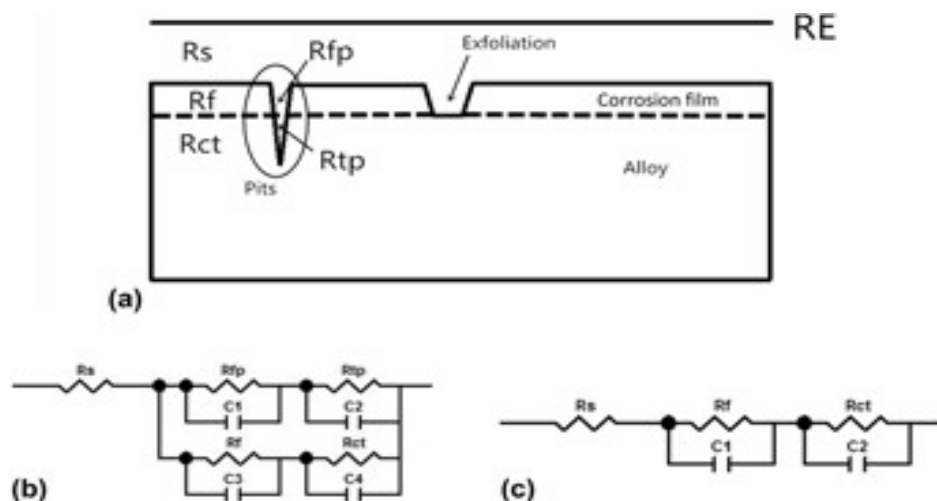
BODE για να διαπιστωθούν οι αποκλίσεις οι οποίες βρέθηκαν να είναι κάτω από 10%. Οι εκτιμώμενες τιμές που δόθηκαν στα στοιχεία του ισοδύναμου κυκλώματος από το λογισμικό για τους διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διάλυμα τοποθετήθηκαν στον επόμενο πίνακα.

	Time (h)											
	7.4	11	14	18	24.5	31.5	35	42	45	48.5	55.5	62
$R_{ox} \Omega cm^2$	600	585	568	519	522	540	572	650	707	819	1090	1240
$R_{ct} k\Omega cm^2$	8.0	12.0	11.4	8.4	7.2	6.6	6.7	5.7	6.2	5.6	5.7	5.1
$R_{cor} k\Omega cm^2$	46.0	36.0	26.5	17.7	46.5	19.9	25.0	11.8	28.9	18.7	20.6	33.5
$CPE_{ox} \mu F cm^{-2} s^{(a-1)}$	164	194	194	188	186	170	170	155	154	148	143	130
$Cdl \mu F cm^{-2}$	20.0	23.3	26.1	29.6	34.4	36.3	35.5	32.8	32.3	29.6	24.3	23.7
$CPE_{cor} \mu F cm^{-2} s^{(a-1)}$	211	272	194	475	186	559	545	605	544	566	566	487
$\alpha(ax)$	0.55	0.52	0.54	0.55	0.57	0.59	0.59	0.61	0.62	0.62	0.63	0.65
$\alpha(corr)$	0.85	0.93	0.90	0.82	0.70	0.75	0.73	0.79	0.74	0.76	0.79	0.73
χ^2 (x 10 ³)	1.7	0.32	0.40	0.44	0.43	0.53	0.68	0.53	0.56	0.54	0.81	0.49

Πίνακας 6 : Πίνακας τιμών των παραμέτρων του ηλεκτρικού κυκλώματος.

Από την μελέτη των τιμών των στοιχείων, διαπιστώθηκε ότι στις υψηλές συχνότητες 10kHz-100Hz το φιλμ οξειδίου εμφανίζει πολλά ελαττώματα κυρίως στις θέσεις των ενδομεταλλικών φάσεων (IM) και η τιμή του εκθέτη του CPE υποδηλώνει ότι το αλουμίνιο συμπεριφέρεται ως πορώδες ηλεκτρόδιο. Καθώς ο χρόνος εμφάνισης αυξάνεται οι φάσεις διαλύονται και γίνονται πλουσιότερες στα πιο ευγενή συστατικά τους, π.χ. Cu οδηγώντας τη διάβρωση στη μήτρα του αλουμινίου περιμετρικά των φάσεων όπου δημιουργούνται εγκοπές (trenching). Σε μεγαλύτερες περιόδους εμφάνισης (>14h) παρατηρείται αύξηση στις τιμές του R_{ox} υποδεικνύοντας την μείωση της «επούλωσης» του επιφανειακού φιλμ οξειδίου στις ελαττωματικές περιοχές των ενδομεταλλικών φάσεων IMs. Στις μεσαίες συχνότητες το ζεύγος R_{ct}/Cdl προσομοιώνει τις αντιδράσεις μεταφοράς φορτίου που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του κράματος κοντά στα IMs. Με την αύξηση του χρόνου έκθεσης υπάρχει μία μικρή μείωση στην αντίσταση R_{ct} η οποία οφείλεται στη δράση των ιόντων χλωρίου στο φιλμ οξειδίου.

Όμοια σε άλλη εργασία [12] μελετήθηκε η συμπεριφορά διάβρωσης του κράματος αλουμινίου AA2198 Al-Cu-Li σε διαφορετικά στάδια τεχνητής γήρανσης με ηλεκτροχημικές μετρήσεις σε διάλυμα 3,5% NaCl. Η επιφάνεια του κράματος αλουμινίου όπως και οι διεργασίες που λάμβαναν χώρα λόγω της διάβρωσης δίνονται στην επόμενη εικόνα όπως και το ισοδύναμο κύκλωμα με τα αντίστοιχα ηλεκτρικά στοιχεία. [15][16]



Εικόνα 10 : Σχηματική παράσταση διεργασίας διάβρωσης και αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα.

Από την μελέτη των αντίστοιχων τιμών των στοιχείων διαπιστώθηκε ότι η αντοχή στη διάβρωση του κράματος επηρεάζεται από την μικροδομή του και μειώνεται σταδιακά με την αύξηση της έκθεσης στο διάλυμα. Το επιφανειακό φιλμ και η αντίσταση στην μεταφορά του φορτίου παρέχουν ικανοποιητική προστασία της μήτρας του κράματος αλουμίνιου έναντι της διάβρωσης.

Condition	Solution-anneal	T6-20 min	T6-2.5 h	T6-4.5 h	T6-18 h	T6-30 h
R_s ($\Omega \text{ cm}^2$)	33.8	24.1	20.8	30.5	23.5	37.3
R_f ($\Omega \text{ cm}^2$)	7880	4390	2780	2320	2330	3130
Error. R_f (%)	1.87	3.52	9.22	2.56	1.64	3.95
R_{ct} ($\Omega \text{ cm}^2$)	6500	4430	4040	3730	1190	6400
Error. R_{ct} (%)	0.80	1.02	0.67	0.81	3.26	0.74
C1 ($\mu\text{F}/\text{cm}^2$)	123	200	359	477	512	426
Error.C1 (%)	2.00	3.27	4.05	3.74	3.95	1.78
C2 ($\mu\text{F}/\text{cm}^2$)	9.7	12.6	13.8	17.9	24.4	13.6
Error.C2 (%)	0.90	1.13	0.41	1.25	3.42	1.42

Πίνακας 7 : Πίνακας τιμών των παραμέτρων του ηλεκτρικού κυκλώματος.

Γενικά από την εξέταση μικροφωτογραφιών, διαπιστώθηκε ότι η διάβρωση στις επιφάνειες των κραμάτων αλουμίνιου παρουσιάζουν ανομοιομορφία. Οι λάκκοι διάβρωσης αναπτύσσονται σε ορισμένες θέσεις που προκύπτουν από την σοβαρή διάβρωση, ενώ σε άλλα σημεία της επιφάνειάς τους δεν εμφανίζονται σημεία διάβρωσης μόνο κάποια αλλαγή στο χρώμα (σκούρο).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης (Εμπέδησης).

3.1 Γενικά.

Η φασματοσκοπία ηλεκτροχημικής εμπέδησης ή ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης (electrochemical impedance spectroscopy-EIS) είναι μία από τις πιο διαδεδομένες ηλεκτροχημικές τεχνικές που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων διάβρωσης ενός υλικού. Η τεχνική αυτή ανιχνεύει τις διηλεκτρικές ιδιότητες ενός μέσου σε ένα φάσμα συχνοτήτων .[17]

Η χρησιμότητά της βασίζεται στη μελέτη των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των υλικών (π.χ. της αγωγιμότητας, της διηλεκτρικής σταθεράς, της παρουσίας πόρων και ρωγμών κ.α.) όπως και των διεπιφανειών τους με άλλα υλικά (ο ρυθμός αντίδρασης, η ηλεκτροχωρητικότητα, οι συντελεστές διάχυσης κ.α.).

Η ηλεκτροχημική διαδικασία σε ένα ηλεκτρόδιο μπορεί να προσομοιωθεί με ένα ισοδύναμο κύκλωμα αποτελούμενο από αντιστάτες και πυκνωτές. Η εφαρμοζόμενη εναλλασσόμενη τάση μπορεί να παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα από την ηλεκτροχημική αντίδραση στο ηλεκτρόδιο. Το ίδιο εναλλασσόμενο ρεύμα μπορεί να παραχθεί εάν η τάση εφαρμοστεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα. Επομένως, η ηλεκτροχημική συμπεριφορά στο ηλεκτρόδιο είναι ισοδύναμη σε αντίσταση, γνωστή ως αντίσταση Faraday (Z).

Τα κύρια πλεονεκτήματα της φασματοσκοπίας εμπέδησης είναι τα εξής:

- Μη καταστρεπτική μέθοδος.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα διαλύματα ηλεκτρολυτών με μικρή αγωγιμότητα χωρίς σημαντικές απώλειες ρεύματος.
- Τα λαμβανόμενα δεδομένα μπορούν να περιγραφούν με τη χρήση ισοδύναμων κυκλωμάτων.
- Η πειραματική διαδικασία εφαρμόζεται σ' εργαστηριακούς χώρους.

Μειονεκτήματα :

- Υψηλού κόστους τεχνική.
- Η εξαγωγή ποσοτικών δεδομένων απαιτεί πολύπλοκη ανάλυση.

3.2 Ορισμός της σύνθετης αντίστασης (εμπέδησης).

Ως έννοια, η ηλεκτρική αντίσταση είναι η δυνατότητα ενός στοιχείου κυκλώματος ν' αντιστέκεται στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Η αντίσταση δίνεται από τον νόμο του Ohm σε συνάρτηση της τάσης E και της έντασης I του ρεύματος

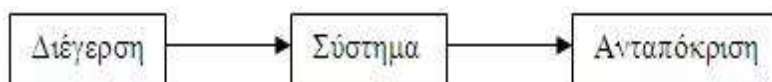
$$R = \frac{E}{I}$$

Αυτή η σχέση περιορίζεται σ' ένα μόνο στοιχείο του κυκλώματος, την ιδανική αντίσταση κι έχει πολλές απλουστευτικές ιδιότητες, όπως :

- Ακολουθεί τον νόμο του Ohm σε όλα τα επίπεδα τάσης και ρεύματος.
- Η αντίστασή της είναι ανεξάρτητη της συχνότητας.
- Τα σήματα τάσης και ρεύματος του εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω μιας αντίστασης βρίσκονται σε φάση μεταξύ τους.

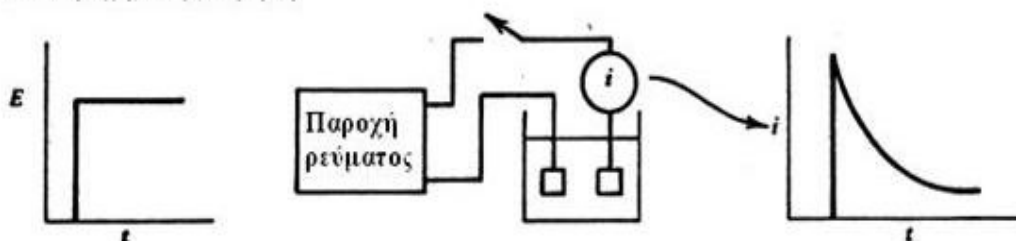
Στην πραγματικότητα όμως περιέχονται στοιχεία κυκλώματος που παρουσιάζουν μια πιο σύνθετη συμπεριφορά και μας αναγκάζουν να εγκαταλείψουμε την αντίληψη της απλής αντίστασης και στη θέση της να χρησιμοποιήσουμε την σύνθετη αντίσταση (εμπέδηση). Όπως η απλή αντίσταση, έτσι και η εμπέδηση είναι η ικανότητα ενός κυκλώματος (κι όχι στοιχείου κυκλώματος) ν' αντισταθεί στην ροή του ηλεκτρικού ρεύματος αλλά χωρίς τις απλουστευτικές ιδιότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Η ηλεκτροχημική εμπέδηση μετριέται εφαρμόζοντας ένα δυναμικό εναλλασσόμενου ρεύματος σε μία ηλεκτροχημική κυψέλη (κελί) κι έπειτα μετράμε το διερχόμενο ρεύμα της. Υποθέτουμε ότι εφαρμόζουμε ένα ημιτονοειδές δυναμικό διέγερσης και η ανταπόκριση σ' αυτή τη διέγερση είναι ένα σήμα AC ρεύματος. Αυτό το σήμα μπορεί να αναλυθεί σε σειρά Fourier.



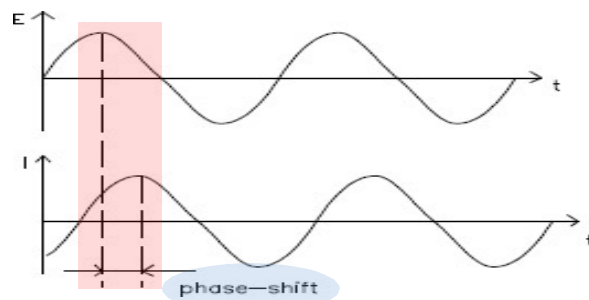
Εικόνα 11 : Αρχή λειτουργίας EIS

Ηλεκτροχημική μέτρηση



Εικόνα 12 : Σχηματική διάταξη EIS

Η ηλεκτροχημική αντίσταση μετριέται χρησιμοποιώντας ένα μικρό (μικρού πλάτους) σήμα διέγερσης. Αυτό γίνεται ώστε η απόκριση να είναι ψευδο-γραμμική. Σ' ένα



Εικόνα 13 : Ημιτονοειδής απόκριση ρεύματος σε γραμμικό σύστημα.

γραμμικό ή ψευδο-γραμμικό σύστημα, η απόκριση του ρεύματος σ' ένα ημιτονοειδές δυναμικό θα είναι κι αυτή ημιτονοειδής στην ίδια συχνότητα αλλά μετατοπίζεται σε φάση. [18]

Το σήμα διέγερσης εκφράζεται ως συνάρτηση του χρόνου κι είναι :

$$E_t = E_o * \sin(\omega t)$$

Όπου E_t είναι το δυναμικό τη χρονική στιγμή t , E_o είναι το πλάτος του σήματος και ω η κυκλική συχνότητα. Η σχέση μεταξύ κυκλικής συχνότητας ω (rad/s) και συχνότητας f (Hz) είναι :

$$\omega = 2 \pi f$$

Σ' ένα γραμμικό σύστημα, το σήμα απόκρισης I_t μετατοπίζεται κατά φάση Φ σε σχέση με την τάση κι έχει πλάτος I_o δίνεται από την εξίσωση :

$$I_t = I_o * \sin(\omega t + \varphi)$$

Μία έκφραση ανάλογη με τον νόμο του Ohm μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την σύνθετη αντίσταση (εμπέδηση) του συστήματος ως εξής :

$$Z = \frac{E_t}{I_t} = \frac{E_o \sin(\omega t)}{I_o \sin(\omega t + \varphi)} = Z_o \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \varphi)}$$

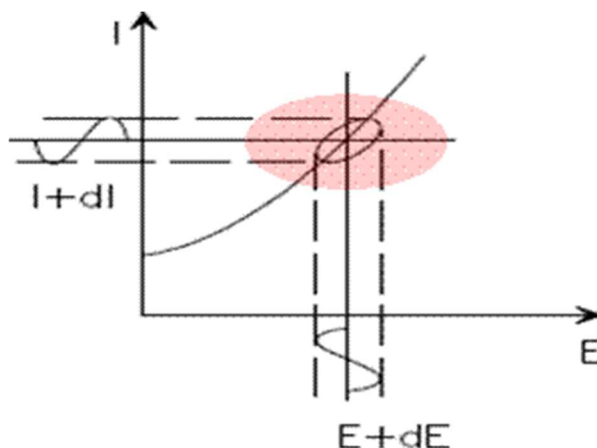
Συνεπώς η σύνθετη αντίσταση εκφράζεται σ' ένα μέγεθος Z_o και μια μετατόπιση φάσης φ . Αν σχεδιάσουμε το εφαρμοζόμενο ημιτονοειδές σήμα E_t στον άξονα X και το σήμα ημιτονοειδούς απόκρισης I_t στον άξονα Y, σχηματίζεται μία ωοειδής καμπύλη γνωστή ως καμπύλη Lissajous Εικόνα 15.

Με τη βοήθεια της σχέσης του Euler έχουμε :

$$E_t = E_o * e^{(j\omega t)}, \quad I_t = I_o * e^{(j\omega t - \varphi)}$$

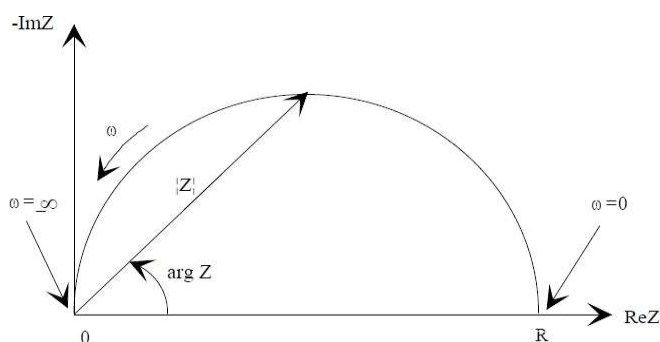
και η σύνθετη αντίσταση θα γίνει :

$$Z_{(\omega)} = \frac{Et}{It} = Z_0 * e^{j\varphi} = Z_0 (\cos\varphi + j\sin\varphi)$$



Εικόνα 14 : Γραφική παράσταση Lissajous

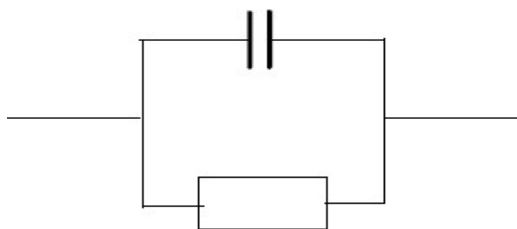
Η σχέση για το $Z_{(\omega)}$ αποτελείται από ένα πραγματικό κι ένα φανταστικό μέρος. Τοποθετείτε το πραγματικό μέρος στον άξονα X και το φανταστικό μέρος στον άξονα Y και σχεδιάζεται το παρακάτω διάγραμμα γνωστό ως Nyquist.



Εικόνα 15 : Διάγραμμα Nyquist με το διάνυσμα εμπέδησης.

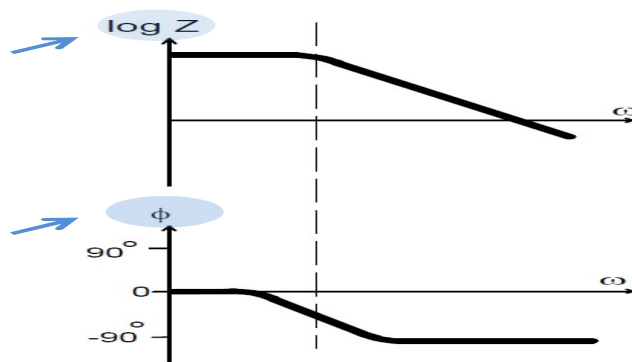
Στο διάγραμμα Nyquist η σύνθετη αντίσταση αναπαρίσταται μ' ένα διάνυσμα μήκους $|Z|$, ξεκινάει από την αρχή των αξόνων του συστήματος κι είναι στραμμένο κατά γωνία $\varphi = \arg Z$. Παρατηρούμε ότι στο δεξί μέρος της καμπύλης σχεδιάζονται οι χαμηλές συχνότητες και οι υψηλότερες αριστερά. Το διάγραμμα έχει ένα σημαντικό κενό, βλέποντας ένα σημείο του διαγράμματος δεν μπορεί να προσδιοριστεί σε ποια συχνότητα μετρήθηκε.

Το διάγραμμα Nyquist προκύπτει από το παρακάτω ηλεκτρικό κύκλωμα και το ημικύκλιο είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα ότι το κύκλωμα περιέχει μία σταθερά χρόνου (time constant).



Εικόνα 16 : Ηλεκτρικό κύκλωμα RC

Μία άλλη δημοφιλή μέθοδος αναπαράστασης είναι το διάγραμμα Bode. Σε αντίθεση με το διάγραμμα Nyquist το συγκεκριμένο διάγραμμα περιέχει πληροφορίες συχνότητας. [18]

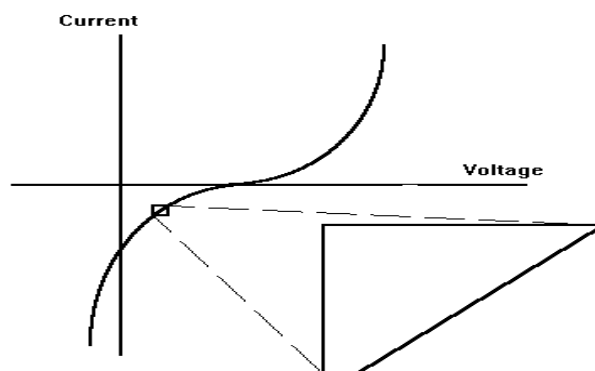


Εικόνα 17 : Διαγράμματα Bode, πλάτους και φάσης.

3.3 Ηλεκτροχημεία – Ένα γραμμικό σύστημα.

Η θεωρία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων διακρίνεται σε γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα (κυκλώματα). Η ανάλυση της σύνθετης αντίστασης των γραμμικών κυκλωμάτων είναι πιο εύκολη από την ανάλυση των μη γραμμικών.

Σ' ένα δυναμικό ηλεκτροχημικό στοιχείο η είσοδος είναι το δυναμικό κι η έξοδος είναι το ρεύμα. Τα ηλεκτροχημικά κύτταρα δεν είναι γραμμικά. Ωστόσο το παρακάτω σχήμα δείχνει πως τα ηλεκτροχημικά συστήματα μπορούν να είναι ψευδο-γραμμικά
Εικόνα 18.

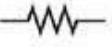




Εικόνα 18 : Ψευδογραμμικότητα του EIS.

Κατά την εκτέλεση της EIS, ένα μικρό ρεύμα AC (1~10 mV) εφαρμόζεται στο κελί. Λόγω του μικρού δυναμικού σήματος το σύστημα είναι ψευδο-γραμμικό διότι μετράμε μόνο το ρεύμα στη συχνότητα διέγερσης.

3.4 Στοιχεία ηλεκτρικού κυκλώματος.

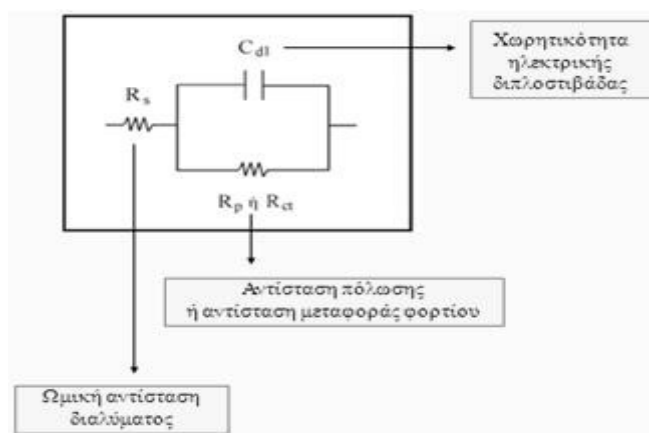
Τα δεδομένα μιας πειραματικής εφαρμογής EIS αναλύονται συνήθως σ' ένα ισοδύναμο μοντέλο ηλεκτρικού κυκλώματος. Τα περισσότερα από τα στοιχεία κυκλώματος του μοντέλου είναι κοινά ηλεκτρικά στοιχεία, όπως είναι οι αντιστάσεις, πυκνωτές και πηνία. Επομένως είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε την σύνθετη αντίσταση των συνιστωσών του κυκλώματος. Παρακάτω δίνονται τα γνωστά στοιχεία ενός κυκλώματος : [19]

Στοιχείο Κυκλώματος	Εξίσωση Εμπέδησης
Ωμική αντίσταση (R) 	$Z = R + 0j$
Πυκνωτής (C) 	$Z = 0 - \frac{j}{\omega C}$
Πηνίο (L) 	$Z = 0 + j\omega L$

Εικόνα 19 : Εξίσωση εμπέδησης στοιχείων κυκλώματος με $\omega=2\pi f$, $j=\sqrt{-1}$

Παρατηρούμε ότι η εμπέδηση μιας αντίστασης είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα και δεν έχει φανταστικό στοιχείο. Η εμπέδηση ενός πηνίου αυξάνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα κι έχουν μόνο μία φανταστική συνιστώσα. Η εμπέδηση έναντι της συμπεριφοράς συχνότητας ενός πυκνωτή είναι αντίθετη από εκείνη ενός πηνίου. Η εμπέδηση του πυκνωτή μειώνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα κι έχουν επίσης ένα φανταστικό στοιχείο.

Ένα ηλεκτροχημικό κύτταρο EIS μοντελοποιείται ως ένα κύκλωμα ηλεκτρικού ρεύματος όπως δείχνει το επόμενο κύκλωμα :



Εικόνα 20 : Ηλεκτρικό κύκλωμα EIS.

3.4.1 Αντίσταση διαλύματος.

Η αντίσταση του διαλύματος είναι συχνά ένας σημαντικός παράγοντας στην εμπέδηση μιας ηλεκτροχημικής κυψέλης γι αυτό κατά την μοντελοποίηση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Η αντίσταση ενός ιοντικού διαλύματος εξαρτάται από την ιοντική συγκέντρωση, τον τύπο των ιόντων, τη θερμοκρασία και τη γεωμετρία της περιοχής στην οποία μεταφέρεται το ρεύμα και δίνεται από την σχέση :

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

ρ η ειδική αντίσταση του διαλύματος, A εμβαδόν, l μήκος.

Αντί για την ειδική αντίσταση χρησιμοποιείται η ειδική αγωγιμότητα $\kappa = \frac{1}{\rho}$ και η παραπάνω σχέση γίνεται $R = 1/\kappa * l/A \Rightarrow \kappa = \frac{l}{RA}$ και μετριέται σε S/m. Λόγω της μη ομοιόμορφης κατανομής ρεύματος στον ηλεκτρολύτη δημιουργείτε πρόβλημα για τον υπολογισμό της αντίστασης του διαλύματος κι αφορά τον προσδιορισμό της διαδρομής ροής και της γεωμετρίας του ηλεκτρολύτη που μεταφέρει το ρεύμα. Ευτυχώς αντιμετωπίζεται όταν προσαρμοστούν τα πειραματικά δεδομένα EIS σ' ένα θεωρητικό μοντέλο. [20]

3.4.2 Αντίσταση μεταφοράς φορτίου.

Εμφανίζεται λόγω της μεταφοράς φορτίου από μία ηλεκτροχημική αντίδραση. Έχει μία συγκεκριμένη ταχύτητα κι εξαρτάται από το είδος της αντίδρασης, τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση ιόντων και το δυναμικό. Υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$R_{ct} = \frac{RT}{nF i_0}$$

R η σταθερά των αερίων, T η θερμοκρασία, F η σταθερά Faraday, n το δυναμικό και i_0 η πυκνότητα ρεύματος.

Στα συστήματα διάβρωσης, η R_{ct} (αντίσταση μεταφοράς φορτίου) υποδηλώνει την δυσκολία που προσφέρει το ηλεκτροχημικό διπλό στρώμα υλικού-ηλεκτρολύτη στην διέλευση μεταλλικών ιόντων, δηλ στην διάλυση του μετάλλου.

3.4.3 Αντίσταση πόλωσης.

Όποτε το δυναμικό ενός ηλεκτροδίου αλλάζει τιμή σ' ανοιχτό κύκλωμα, αυτό ονομάζεται ως πόλωση του ηλεκτροδίου. Σ' αυτή την κατάσταση μπορεί να προκαλέσει τη ροή ρεύματος μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων στην επιφάνειά του ηλεκτροδίου. Η ποσότητα του ρεύματος ελέγχεται από την κινητική των αντιδράσεων και την διάχυση των αντιδρώντων προς το ηλεκτρόδιο και μακριά απ' αυτό.

Στα ηλεκτρικά κύτταρα όπου ένα ηλεκτρόδιο υφίσταται ομοιόμορφη διάβρωση σ' ανοιχτό κύκλωμα, το δυναμικό ελέγχεται από το ισοζύγιο δύο διαφορετικών χημικών αντιδράσεων. Μία από τις αντιδράσεις δημιουργεί καθοδικό ρεύμα κι η άλλη ανοδικό ρεύμα. Εξισορροπείτε όταν τα δύο ρεύματα είναι ίσα. Εάν το ηλεκτρόδιο διαβρώνεται, η τιμή του ρεύματος ονομάζεται ως ρεύμα διάβρωσης.

Από την αντίσταση πόλωσης μπορούμε να έχουμε πληροφορίες για τον ρυθμό διάβρωσης που υφίσταται το ηλεκτρόδιο. Το υλικό πολώνεται γύρω στα ± 10 mV σε σχέση με το δυναμικό του ανοικτού κυκλώματος και καθώς μεταβάλλεται από την τιμή αυτή, δημιουργείτε ένα ρεύμα κι η αντίσταση πόλωσης είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ρεύματος και γι αυτό χρησιμοποιείτε και στη μέθοδο EIS.

3.4.4 Χωρητικότητα διπλού στρώματος (διπλοστοιβάδας).

Ένα ηλεκτρικό διπλό στρώμα υπάρχει στη διεπιφάνεια μεταξύ του ηλεκτροδίου και του διαλύματος. Αυτό το διπλό στρώμα σχηματίζεται καθώς τα ιόντα του διαλύματος απορροφούνται (κολλάνε) πάνω στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Το φορτισμένο ηλεκτρόδιο διαχωρίζεται από τα φορτισμένα ιόντα από ένα μονωτικό χώρο σε αποστάσεις της κλίμακας angstroms.

Τα φορτία που διαχωρίζονται από έναν μονωτή σχηματίζουν έναν πυκνωτή (θεωρία ηλεκτρομαγνητισμού). Η τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή υπολογίζεται στα 20 μf έως 60 μf για κάθε 1cm² επιφάνειας του ηλεκτροδίου αν κι η τιμή αυτή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το δυναμικό του ηλεκτροδίου, η θερμοκρασία, οι ιοντικές συγκεντρώσεις, τα στρώματα οξείδωσης η τραχύτητα του ηλεκτροδίου, η προσρόφιση ακαθαρσιών κ.α.

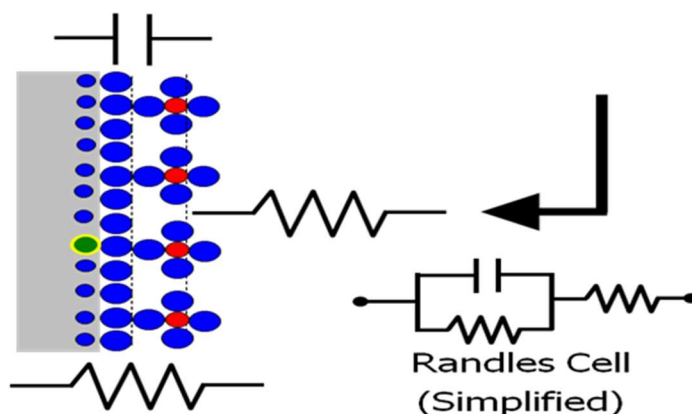
3.4.5 Χωρητικότητα επίστρωσης.

Ένας πυκνωτής σχηματίζεται όταν δύο αγωγικές πλάκες διαχωρίζονται από ένα μη αγωγικό μέσο, που ονομάζεται διηλεκτρικό. Η τιμή της χωρητικότητας εξαρτάται από το μέγεθος των πλακών, την απόσταση μεταξύ των πλακών και τις ιδιότητες του διηλεκτρικού. Η σχέση είναι :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

Όπου ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά, ϵ_r η διηλεκτρική σταθερά του υλικού, A το εμβαδόν της κάθε πλάκας και d η μεταξύ τους απόσταση.

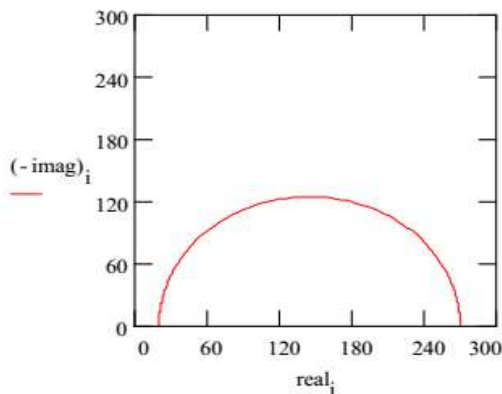
Η επόμενη εικόνα μας δείχνει μία απλή μοντελοποίηση ενός ηλεκτροχημικού κελιού ως ηλεκτρικό κύκλωμα που αποτελείτε από αντιστάσεις και πυκνωτές.



Εικόνα 21 : Ηλεκτροχημεία ως ηλεκτρικό κύκλωμα.

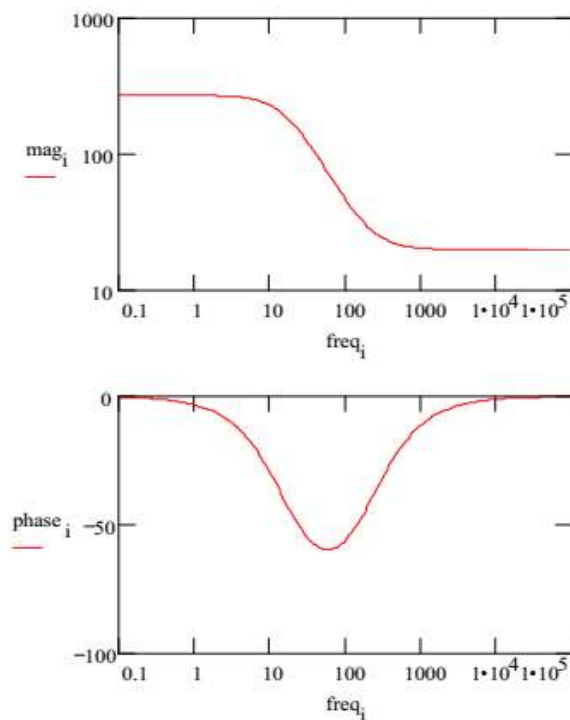
Η απλουστευμένη κυψέλη Randles είναι μία από τα πιο κοινά μοντέλα ηλεκτροχημικών κυψελών. Περιλαμβάνει αντίσταση διαλύματος, πυκνωτή διπλού στρώματος και μεταφορά φορτίου (αντίσταση πόλωσης). Η χωρητικότητα διπλού στρώματος είναι παράλληλη με την αντίσταση μεταφοράς φορτίου. Εκτός απ' ότι είναι ένα χρήσιμο μοντέλο από μόνη της, είναι και σημείο εκκίνησης για άλλα πιο πολύπλοκα μοντέλα.

Στο επόμενο σχήμα είναι ένα σχεδιάγραμμα Nyquist για ένα τυπικό απλοποιημένο Randles cell. Οι παράμετροι αυτού υπολογίσθηκαν για επιφάνεια 1cm^2 ηλεκτροδίου που υποβάλλεται σε ομοιόμορφη διάβρωση με ρυθμό $1\text{mm}/\text{έτος}$. Έγιναν υποθέσεις για τους συντελεστές Tafel, την πυκνότητα των μετάλλων και του ισοδύναμου βάρους καθώς και για χωρητικότητα $40\ \mu\text{P}/\text{cm}^2$ κι αντίσταση διαλύματος $20\ \Omega$. Η αντίσταση πόλωσης υπολογίστηκε ότι είναι $250\ \Omega$.



Εικόνα 22 : Διάγραμμα Nyquist για ρυθμό διάβρωσης $1\text{mm}/\text{έτος}$.

Επίσης για το ίδιο Randles cell είναι το επόμενο σχεδιάγραμμα Bode.



Εικόνα 23 : Διάγραμμα Bode για ρυθμό διάβρωσης $1\text{mm}/\text{έτος}$.

3.5 Επισκόπηση μοντέλων.

Ο σκοπός ενός μοντέλου διάβρωσης είναι η πρόβλεψη ενός αποτελέσματος. Ως εκ τούτου, τα μοντέλα είναι πολύτιμα εργαλεία για την γρήγορη απόκτηση γνώσης και άποψης δύσκολων και σύνθετων προβλημάτων διάβρωσης.

Ως ορισμός της λέξης «μοντέλου» θεωρείται η αναπαράσταση κάποιου αντικειμένου, συμπεριφοράς ή συστήματος που κάποιος θέλει να κατανοήσει. Ένα καλά αναπτυγμένο (εγκεκριμένο) μοντέλο θα μπορούσε να πραγματοποιήσει σημαντικά τμήματα επιστημονικής έρευνας. Η εγκυρότητα ενός μοντέλου βασίζεται όχι μόνο στην προσαρμογή του σε εμπειρικές παρατηρήσεις αλλά και στην ικανότητά του να παρεκκλίνει σε καταστάσεις ή δεδομένα πάρα των αρχικών.

Τα δεδομένα της φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης αναλύονται γενικά με βάση ένα ισοδύναμο μοντέλο κυκλώματος. Ο αναλυτής προσπαθεί να βρει ένα μοντέλο του οποίου η αντίσταση ταιριάζει με τα δεδομένα που μετρήθηκαν.

Ο τύπος των ηλεκτρικών εξαρτημάτων στο μοντέλο κι η συνδεσμολογία τους ελέγχουν το σχήμα του φάσματος του μοντέλου. Οι παράμετροι του μοντέλου (π.χ. η τιμή της αντίστασης) ελέγχουν το μέγεθος κάθε χαρακτηριστικού του φάσματος. Κι οι δύο αυτοί παράγοντες επηρεάζουν το βαθμό στον οποίο το φάσμα σύνθετης αντίστασης του μοντέλου ταιριάζει μ' ένα μετρήσιμο φάσμα EIS.

Στα φυσικά μοντέλα, κάθε στοιχείο του θεωρείται ότι προέρχεται από μία φυσική διαδικασία στο ηλεκτροχημικό κύτταρο. Η επιλογή του φυσικού μοντέλου που θα εφαρμοστεί γίνεται από την γνώση των φυσικών χαρακτηριστικών του κυττάρου.

Επίσης τα μοντέλα μπορεί να είναι και εμπειρικά. Τα στοιχεία του κυκλώματος δεν αντιστοιχίζονται σε φυσικές διεργασίες στο κελί. Το μοντέλο επιλέγεται για να δίνει την καλύτερη δυνατή αντιστοίχιση ανάμεσα στην σύνθετη αντίσταση του μοντέλου και της μετρήσιμης σύνθετης αντίστασης. [20]

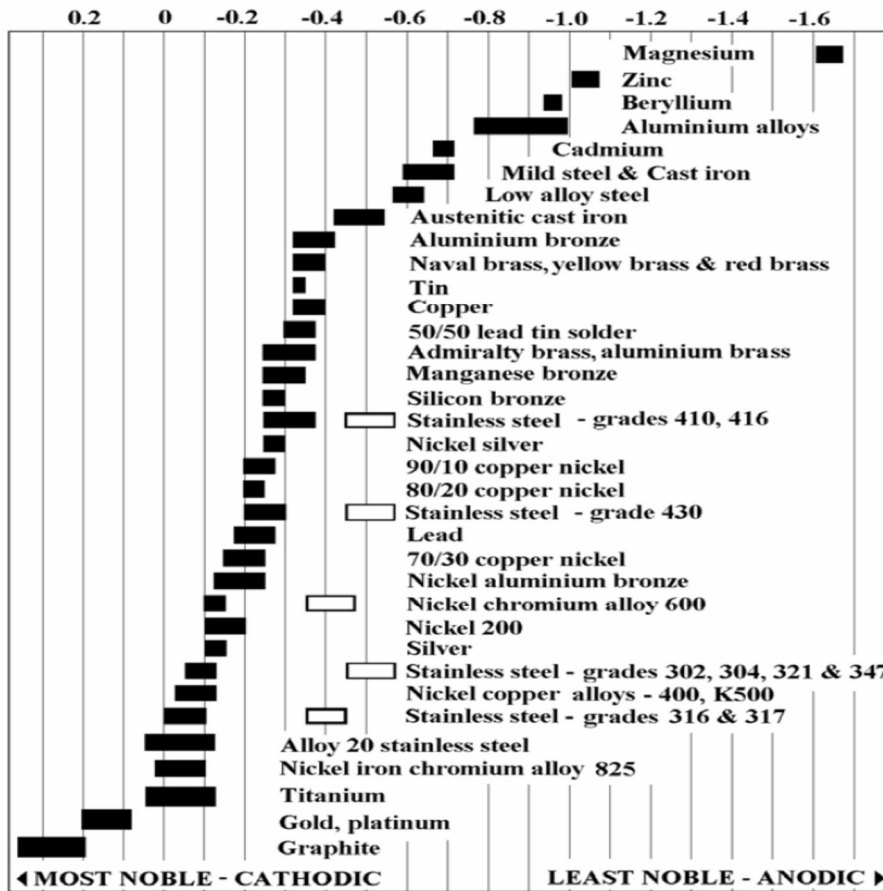
3.6 EIS και διάβρωση υλικών.

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου της ηλεκτροχημικής σύνθετης αντίστασης (EIS) είναι το γεγονός ότι πρόκειται για μία μη-καταστρεπτική τεχνική που μας δίνει δεδομένα για εξελισσόμενες χρονικά διαδικασίες όπως είναι η διάβρωση των υλικών.

Η επιστήμη μελετάει τόσο το φαινόμενο της δράσης όσο και το αποτέλεσμα της. Κατά την διάβρωση το υλικό υπό την επίδραση του περιβάλλοντός του χάνει ηλεκτρόνια, τα οποία δεσμεύονται από το οξυγόνο του περιβάλλοντος. Υπάρχει δηλαδή αύξηση του σθένους του μετάλλου κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση :



Το φαινόμενο είναι τις περισσότερες φορές επιφανειακό κι εντοπίζεται στην εκτεθειμένη προς το περιβάλλον επιφάνεια του μετάλλου.



Εικόνα 24 : Γαλβανική σειρά συνηθισμένων κραμάτων - μετάλλων.

Το ηλεκτρολυτικό στοιχείο αποτελείται από την άνοδο, την κάθοδο και τον ηλεκτρολύτη.

Ως άνοδος χαρακτηρίζεται το λιγότερο ευγενές (χημικά ενεργό) μέταλλο που απελευθερώνει ηλεκτρόνια με αποτέλεσμα τη δημιουργία των θετικά φορτισμένων ιόντων.

Ως κάθοδος χαρακτηρίζεται το περισσότερο ευγενές (χημικά αδρανές) μέταλλο. Τα ηλεκτρόνια της ανόδου που ελευθερώνονται οδεύουν προς την κάθοδο κι εκεί εκφορτίζουν τα θετικά ιόντα του ηλεκτρολύτη.

Ο ηλεκτρολύτης είναι ένα υδατικό διάλυμα το οποίο επιτρέπει τη μετακίνηση των ιόντων από την άνοδο προς την κάθοδο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Μηχανική συμπεριφορά των κραμάτων της σειράς 2xxx.

4.1 Μηχανική συμπεριφορά μεταλλικών υλικών.

Η μηχανική συμπεριφορά μεταλλικών υλικών ασχολείται κατά κύριο λόγο με την απόκριση των μεταλλικών υλικών σε εξωτερικές δυνάμεις ή μηχανικά φορτία. Στις περιπτώσεις αυτές είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις οριακές τιμές τους (αντοχές) των μετάλλων ώστε να μην ξεπερνιούνται και οδηγούνται σε αστοχία οι κατασκευές.

Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών υπό την επίδραση δυνάμεων είναι σύνθετη και απαιτεί συνδυασμό διαφόρων κλάδων της επιστήμης όπως της αντοχής υλικών, της τεχνολογίας των υλικών και της φυσικής μεταλλουργίας. Ερευνώντας απ την σκοπιά της αντοχής των υλικών με τις θεωρίες της ελαστικότητας και πλαστικότητας, μπορεί να υπολογιστεί, να αναλυθεί και να διαστασιολογηθεί κάθε δομικό στοιχείο των κατασκευών και των στοιχείων μηχανών.

Στην πραγματικότητα όμως παίζουν σημαντικό ρόλο η μικροδομή του μετάλλου,, η συμπεριφορά του σε υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες και η χρονική φυσική ή τεχνητή γήρανση,

4.1.1 Αντοχή σε εφελκυσμό.

Με τον όρο εφελκυσμό ορίζεται η διαδικασία καταπόνησης ενός δοκιμίου εφαρμόζοντας δύο ίσου μέτρου κι αντίθετης κατεύθυνσης δυνάμεις κατά μήκος του άξονά του τείνοντας να το επιμηκύνουν. [21]

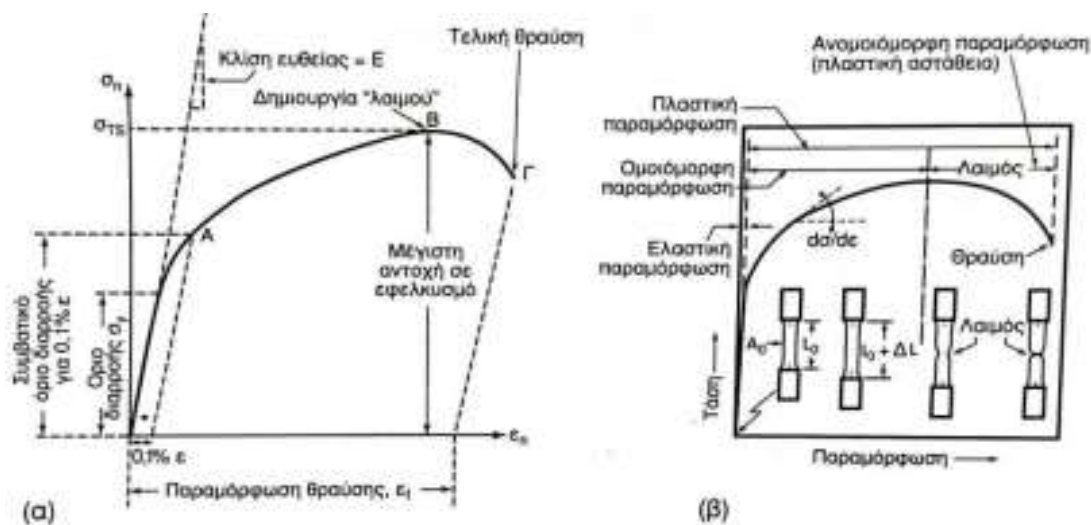
Η εφελκυστική τάση που μελετάται δίνεται από τον τύπο : $\sigma = F / A_0$

και μονάδα μέτρησης το $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2$

Ένα υλικό που επιδέχεται μεγάλες παραμορφώσεις μέχρι την θραύση του θεωρείτε ως όλκιμο. Τα όλκιμα υλικά μπορούν να παραμορφωθούν πλαστικά και να αποταμιεύουν μεγάλες τιμές πυκνότητας ενέργειας παραμόρφωσης έως την θραύση τους. Οι τάσεις όταν ξεπεράσουν μια κρίσιμη τιμή για κάθε υλικό οι παραμορφώσεις που δημιουργούνται είναι πλέον πλαστικές και δεν επανέρχονται. Πριν την κρίσιμη αυτή τιμή το υλικό βρίσκεται στην ελαστική του κατάσταση παρατηρώντας μία γραμμικότητα στην μεταβολή της τάσης συναρτήσει της παραμόρφωσης. Αυτή την φάση την περιγράφει ο Νόμος του Hooke με τον τύπο : $\sigma = \varepsilon * E$

όπου ε η μεταβολή του μήκους του σε σχέση με το αρχικό

και E το μέτρο ελαστικότητας, χαρακτηριστική σταθερά του κάθε υλικού και ισούται με την κλίση της επαπτόμενης ευθείας, στην ελαστική περιοχή της καμπύλης σ - ϵ , όπως φαίνεται τυπικά στην επόμενη εικόνα : [22]



Εικόνα 25 : (α) Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης εφελκυσμού, (β) Παράσταση του εφελκυσμού δοκιμίου έως την θραύση του.

Το μέτρο ελαστικότητας των κραμάτων αλουμινίου κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 69-79 GPa με την τιμή των 69 GPa να αναφέρεται στο καθαρό αλουμίνιο. Η τιμή του είναι περίπου το ένα τρίτο του χάλυβα, κάτι που σημαίνει ότι το αλουμίνιο παραμορφώνεται ελαστικά τριπλάσια από τον χάλυβα. Επίσης μια ιδιαίτερη ιδιότητά τους είναι ότι δεν γίνονται ψαθυρά σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Όπως τα περισσότερα μέταλλα ενισχύεται με την ψυχρηλασία κι ακόμη περισσότερο με κραμάτωση με διάφορα στοιχεία.

Οι κυριότερες μηχανικές εφελκυστικές ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του είναι : [23]

- Μέτρο ελαστικότητας (E), όπως αναφέραμε και παραπάνω είναι η κλίση της επαπτόμενης ευθείας στην καμπύλη ονομαστικών τάσεων – ονομαστικών παραμορφώσεων στην ελαστική περιοχή και μετράται σε GPa.
- Όριο διαρροής (R_p), είναι το σημείο εκείνο που αλλάζει η παραμόρφωση του δοκιμίου από ελαστική σε πλαστική (μόνιμη) και μετράται σε MPa.
- Η αντοχή σε εφελκυσμό (R_m), είναι η μέγιστη τάση κατά την οποία το υλικό εμφανίζει «λαίμωση» και πριν την αστοχία του λόγω θραύσης και μετράται σε MPa.
- Η παραμόρφωση θραύσης (A_f), είναι η παραμόρφωση έως την τελική θραύση του δοκιμίου και ως το πηλίκο της μεταβολής του μήκους μέτρησης προς το αρχικό μήκος αναφοράς κι εκφράζεται ως επί τοις εκατό (%) παραμόρφωση.

- Ομοιόμορφη παραμόρφωση (**A_g**), το σημείο της μέγιστης ονομαστικής τάσης που το δοκίμιο παραμορφώνεται ομοιόμορφα κι εκφράζεται ως επί τοις εκατό (%) ομοιόμορφη παραμόρφωση.
- Ολική παραμόρφωση (**A_t**), είναι η συνολική αξονική παραμόρφωση πριν την μακροσκοπική θραύση του δοκιμίου, ως άθροισμα της ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης κι εκφράζεται ως επί τοις εκατό (%) ολική παραμόρφωση.
- Πυκνότητα ενέργειας παραμόρφωσης (**W**), είναι το εμβαδόν κάτω από ολόκληρη την εφελκυστική καμπύλη ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης μέχρι την θραύση και μετράται σε MJ / m³.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : Πειραματική διαδικασία.

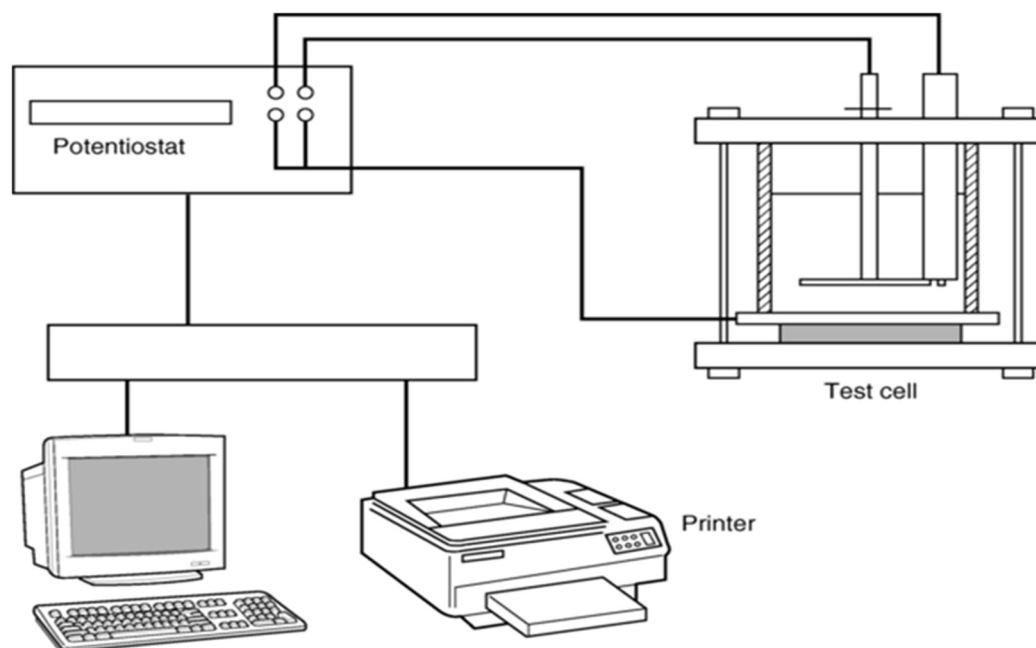
5.1 Γενικά.

Σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας είναι να παρουσιάσει τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την πειραματική διαδικασία της ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης και να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τον προσδιορισμό του μηχανισμού διάβρωσης στα κράματα αλουμινίου AA2198-T8 και AA2198-T3.

5.2 Πειραματικός εξοπλισμός εμπέδησης (EIS).

Για την πραγματοποίηση των πειραματικών εφαρμογών που περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω συσκευές και υλικά : [24]

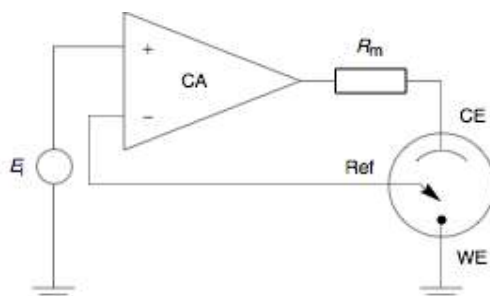
- Ποτενσιοστάτης.
- Πειραματικό ηλεκτρολυτικό κελί.
- Βολτόμετρο-αμπερόμετρο, για την παρακολούθηση του δυναμικού και του ρεύματος.
- Ηλεκτρόδιο εργασίας (working).
- Ηλεκτρόδιο Αναφοράς (reference).
- Ηλεκτρόδιο Μέτρησης (counter).



Εικόνα 26 : Πειραματική διάταξη εφαρμογής ηλεκτροχημικών τεχνικών σε εργαστηριακές δοκιμές.

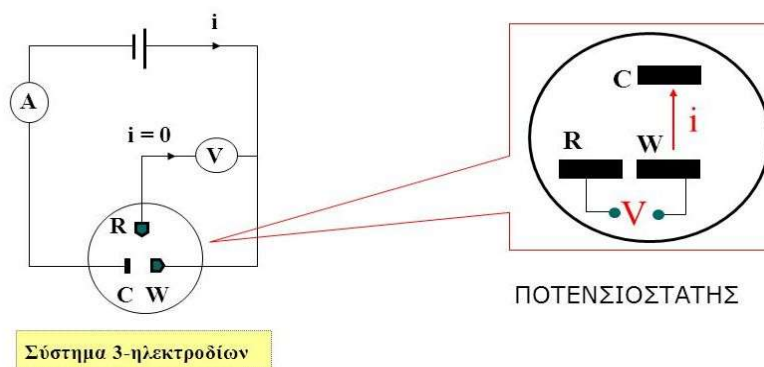
5.2.1 Ποτενσιοστάτης.

Ένας ποτενσιοστάτης είναι μία συσκευή ελέγχου και μέτρησης. Αποτελείται από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο ελέγχει το δυναμικό σε ολόκληρο το κελί ανιχνεύοντας μεταβολές στην αντίστασή του, μεταβάλλοντας ανάλογα το ρεύμα που τροφοδοτεί στο σύστημα. Ανάλογα την συνολική αντίσταση, προκειμένου η τάση να διατηρηθεί σταθερή σύμφωνα με τον νόμο του Ohm, θα έχει και το αντίστοιχο ρεύμα.



Εικόνα 27 : Σχηματική περιγραφή ποτενσιοστάτη.

Ένας ποτενσιοστάτης μετρά τη διαφορά δυναμικού μεταξύ του ηλεκτροδίου εργασίας (working) και του ηλεκτροδίου αναφοράς (reference), εφαρμόζει το ρεύμα μέσω του ηλεκτροδίου μέτρησης (counter) και μετρά το ρεύμα ως πτώση τάσης ($V=I \cdot R$) σε μία σειρά αντιστάσεων Z.



Σύστημα 3-ηλεκτροδίων

Εικόνα 28 : Σχηματική περιγραφή λειτουργίας ποτενσιοστάτη.



Εικόνα 29 : Ποτενσιοστάτης “CorrTest” με τυπικό κελί 3 ηλεκτροδίων

5.2.2 Ηλεκτρολυτικό κελί.

Το ηλεκτρολυτικό κελί αποτελείται από τέσσερα επιμέρους στοιχεία, την άνοδο, την κάθοδο, τον ηλεκτρολύτη και τις ηλεκτρικές συνδέσεις.

Για την άνοδο και την κάθοδο θα χρησιμοποιηθούν τα δύο (2) μεταλλικά ηλεκτρόδια (δοκίμια) που συνδέονται ηλεκτρικά για να έχουμε κυκλοφορία ηλεκτρικού ρεύματος.

Ο ηλεκτρολύτης είναι ένα ηλεκτρικά αγώγιμο υγρό. Για τον λόγο αυτό δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε καθαρό νερό (απιονισμένο) ή βρύσης καθώς η ειδική αγωγιμότητά τους είναι πολύ μικρή σε σχέση με την τιμή της ειδικής αγωγιμότητας π.χ. του διαλύματος NaCl 3,5%.

Οι ηλεκτρικές συνδέσεις (ακροδέκτες ηλεκτροδίων) θα προσαρμοστούν ανάλογα με τα ηλεκτρόδια και θα συνδεθούν με τον ποτενσιοστάτη με ηλεκτρικά καλώδια διαφορετικών χρωματισμών και κατάλληλης διατομής.



Εικόνα 30 : Ηλεκτρολυτικό κελί GAMRY για επίπεδα ηλεκτρόδια.

5.2.3 Ηλεκτρόδια.

Όπως αναφέρθηκε θα χρησιμοποιηθούν τρία (3) ηλεκτρόδια, ηλεκτρόδιο εργασίας (working), ηλεκτρόδιο μέτρησης (counter) και ηλεκτρόδιο αναφοράς (reference).

Ένα ηλεκτρόδιο είναι ένα στερεό (ημι-αγώγιμο) που εμβαπτίζεται σ' ένα διάλυμα (ηλεκτρολύτη). Ένα ηλεκτρόδιο σ' ένα ηλεκτροχημικό κελί αναφέρεται ως άνοδος ή κάθοδος. Η άνοδος ορίζεται ως το ηλεκτρόδιο στο οποίο τα ηλεκτρόνια αφήνουν το στοιχείο και λαμβάνει χώρα η διάβρωση και η κάθοδος ως το ηλεκτρόδιο στο οποίο τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στο στοιχείο και λαμβάνει χώρα η αναγωγή. Κάθε ηλεκτρόδιο μπορεί να είναι είτε άνοδος είτε κάθοδος, ανάλογα με την φορά του ρεύματος μέσα στο κελί.

Ηλεκτρόδιο εργασίας.

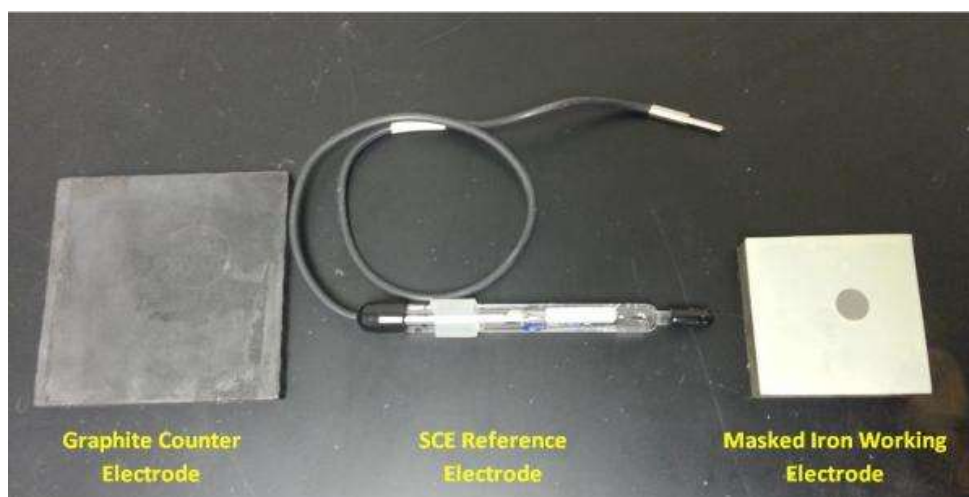
Είναι το δοκίμιο, το μέταλλο ή κράμα μετάλλου το οποίο μελετάτε. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν αεροναυπηγικά κράματα αλουμινίου.

Ηλεκτρόδιο αναφοράς

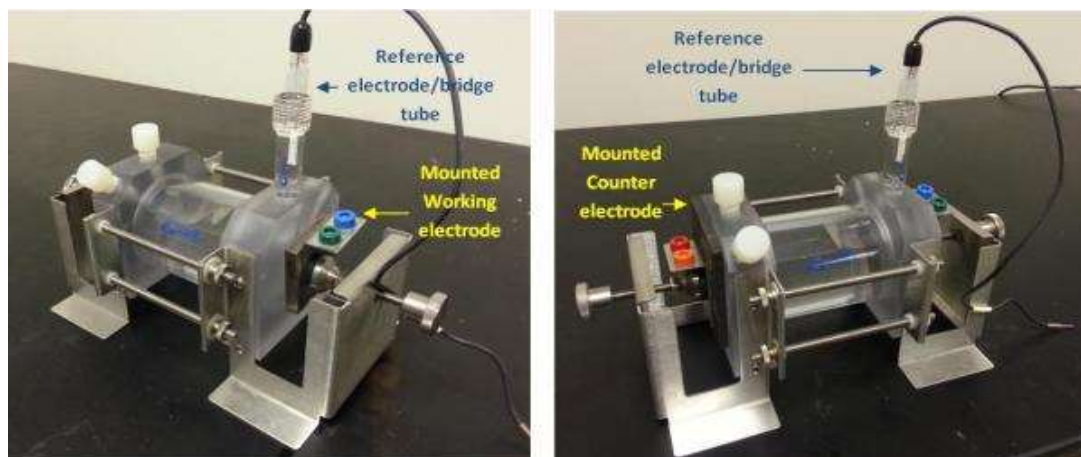
Για να μπορέσει να μετρηθεί το δυναμικό, αλλά και να έχει την δυνατότητα να του επιβάλλει μια επιθυμητή τιμή χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Όπως υποδηλώνει και το όνομά του, το ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμεύει ως πειραματικό σημείο αναφοράς για τις πιθανές μετρήσεις. Το ηλεκτρόδιο αυτό, δεν πρέπει να διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα καθώς αυτό μπορεί να καταστρέψει τον έλεγχο του επιβαλλόμενου δυναμικού και να μεταβάλει την τιμή του. Επομένως πρέπει να διατηρεί σταθερό δυναμικό κατά την πειραματική διαδικασία σε απόλυτη κλίμακα. Τοποθετείται κοντά στο ηλεκτρόδιο εργασίας. Τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια αναφοράς είναι χλωριούχος άργυρος/άργυρος (AgCl/Ag), κορεσμένο ηλεκτρόδιο καλομέλανος (SCE).

Ηλεκτρόδιο μέτρησης ή βοηθητικό.

Το ηλεκτρόδιο μέτρησης ή βοηθητικό είναι το μέταλλο που προστίθεται στο κελί για να μπορεί να διατηρηθούν σταθερές οι τιμές των δυναμικών. Χρησιμοποιείται για να επιτρέψει την ροή του ρεύματος που εισέρχεται ή εξέρχεται από το κελί. Ως βοηθητικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται συνήθως αδρανές υλικά όπως είναι ο γραφίτης ή η πλατίνα για να αποφευχθεί η διάβρωσή τους. 16][20]



Εικόνα 31 : Ενδεικτικά υλικά για πειραματική διαδικασία EIS της εταιρείας GAMRY.



Εικόνα 32 : Τοποθέτηση ηλεκτροδίων σε ηλεκτροχημικό κελί της εταιρείας GAMRY.

5.3 Κατασκευή – Αγορά πειραματικού εξοπλισμού (EIS).

Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε ο απαραίτητος εξοπλισμός που απαιτείται για να πραγματοποιηθούν οι πειραματικές δοκιμές στα κράματα αλουμινίου και να ληφθούν μετρήσεις εξάγοντας τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα απ αυτές.

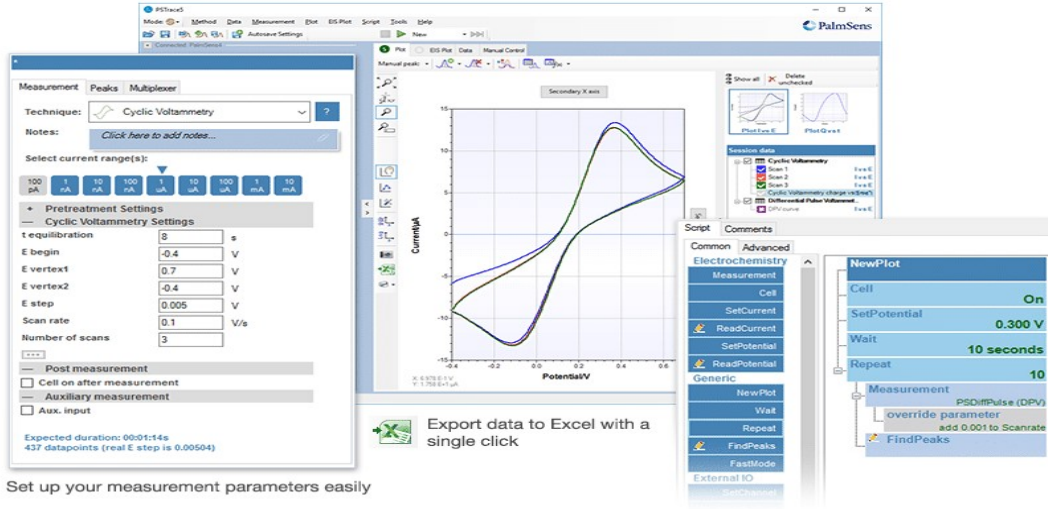
Ποτενσιοστάτης – Βολτόμετρο - Αμπερόμετρο

Για την συγκεκριμένη εργασία προμηθεύτηκε από το εμπόριο πλήρες όργανο μέτρησης πειραμάτων διάβρωσης της εταιρείας PalmSens® και συγκεκριμένα το μοντέλο palmsens4® :



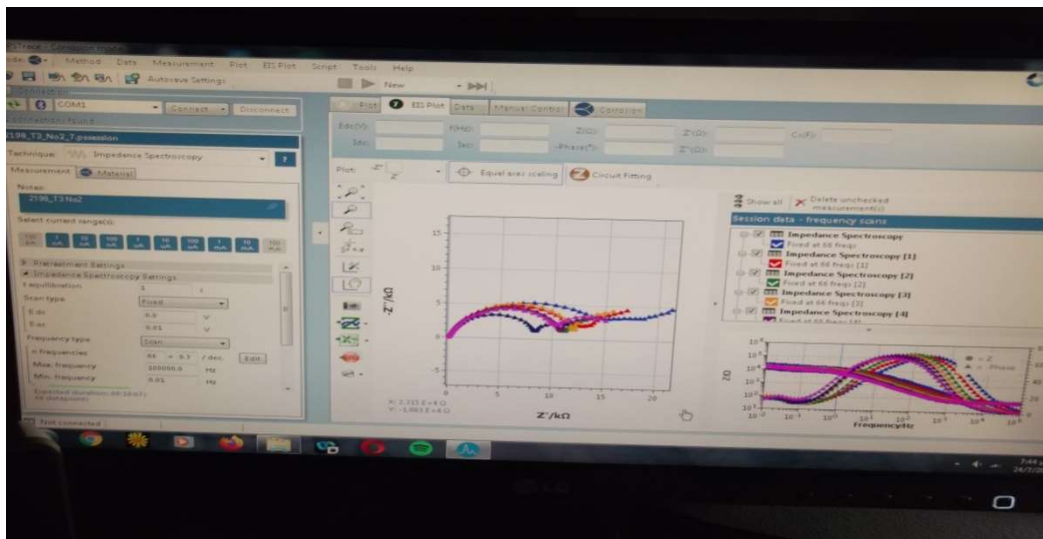
Εικόνα 33 : Ποτενσιοστάτης – Βολτόμετρο – Αμπερόμετρο της εταιρείας PalmSens.

Συνοδεύεται από το αντίστοιχο λογισμικό PSTrace5® για περιβάλλον Η/Υ Windows για την πειραματική δοκιμή, την καταχώρηση και την επεξεργασία των δεδομένων :



Set up your measurement parameters easily

Scripting for running a set of automated tasks



Εικόνα 34 : Λογισμικό πειραματικών δοκιμών (EIS) PSTrace5 της εταιρείας PalmSens.

Ηλεκτρολυτικό κελί



Εικόνα 35 : Κατασκευή ηλεκτρολυτικού κελιού για επίπεδα ηλεκτρόδια.

Στο ηλεκτρολυτικό κελί πραγματοποιούνται όλες οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις-διαβρώσεις στα δοκίμια αφού εφαρμοστεί ηλεκτρικό ρεύμα.

Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε ως δείγμα το ηλεκτρολυτικό κελί της εταιρείας GAMRY και διαμορφώθηκαν αντίστοιχα τα κατασκευαστικά του κομμάτια.

Είναι κατασκευασμένο από χημικά ανθεκτικό υλικό (τεφλόν) και τα μεταλλικά του μέρη από ανοξείδωτο χάλυβα. Όλα τα μεταλλικά μέρη του είναι απομονωμένα, κυρίως από τα ηλεκτρόδια, παρεμβάλλοντας μονωτικά υλικά για την αποφυγή μεταφοράς ρεύματος ή βραχυκυκλώματος. Ο διάφανος σωλήνας επίσης είναι από ανθεκτικό πλαστικό.

Οι οπές που τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια δημιουργήθηκαν στις διαστάσεις των ηλεκτροδίων. Επίσης δημιουργήθηκαν οπές για την πλήρωση του διαλύματος και της εξαέρωσης.

Τα ηλεκτρόδια εργασίας και μέτρησης τοποθετήθηκαν αντίθετα στις εξωτερικές πλευρές του κελιού και στερεώθηκαν με σύσφιγξη από μονωτικό υλικό. Για την στεγανοποίηση τους τοποθετήθηκε ελαστικό παρέμβυσμα.

Επίσης το ηλεκτρόδιο αναφοράς προσαρμόστηκε κοντά στο ηλεκτρόδιο εργασίας.



Εικόνα 36 : Κατασκευή ηλεκτρολυτικού κελιού για επίπεδα ηλεκτρόδια. Τελική μορφή με εγκατεστημένα τα ηλεκτρόδια

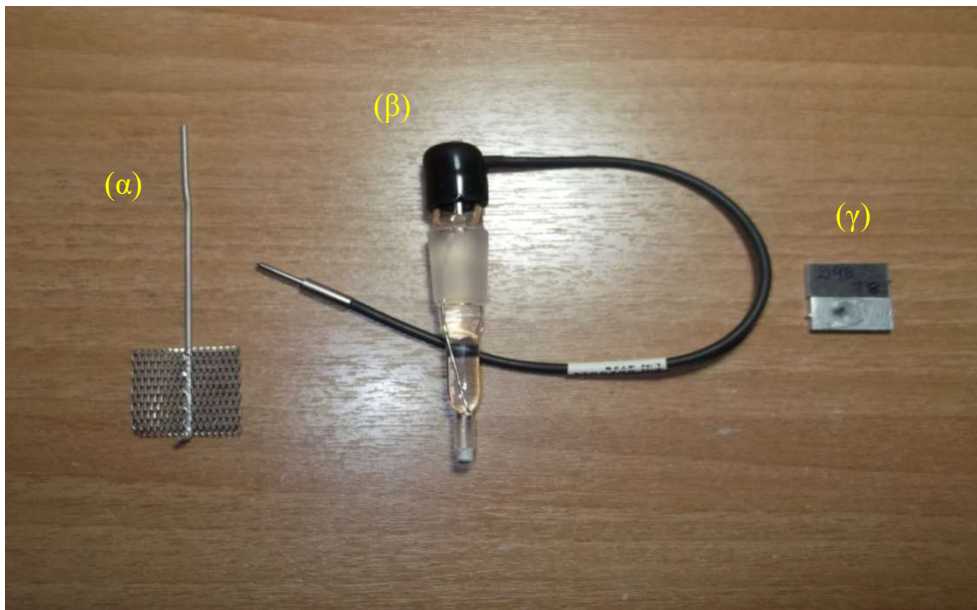
Ηλεκτρόδια

Και τα ηλεκτρόδια προμηθεύτηκαν από την αγορά :

Ηλεκτρόδιο μέτρησης ή βοηθητικό « πλατίνα»

Ηλεκτρόδιο αναφοράς «χλωριούχος άργυρος/άργυρος (AgCl/Ag)»

Ηλεκτρόδιο εργασίας «κράμα αλουμινίου 2198-T8 και 2198-T3»



Εικόνα 37 : Ηλεκτρόδια (α) μέτρησης (β) αναφοράς (γ) εργασίας

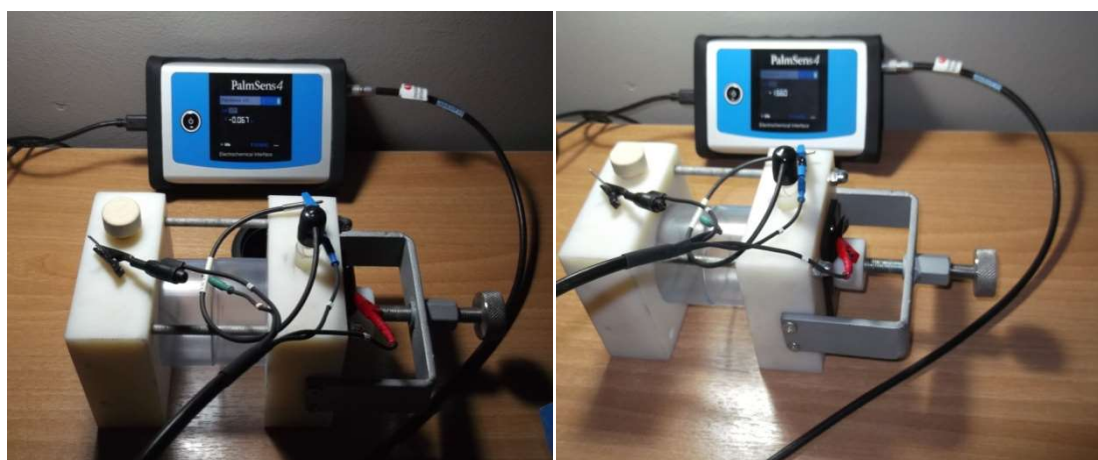
5.4 Συνδεσμολογία πειραματικού εξοπλισμού.

Ο ποτενσιοστάτης αφού συνδέθηκε με τον Η/Υ σε θύρα USB κατόπιν συνδέθηκε και με τα ηλεκτρόδια του κελιού όπως φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες και συγκεκριμένα :

Μαύρος ακροδέκτης με το βοηθητικό ηλεκτρόδιο (πλατίνα)

Μπλέ ακροδέκτης με το ηλεκτρόδιο αναφοράς (AgCl/Ag)

Κόκκινος ακροδέκτης με το ηλεκτρόδιο εργασίας (δοκίμιο 2198)



Εικόνα 38 : Συνδεσμολογία πειραματικού εξοπλισμού

5.5 Δεδομένα πειράματος.

Τα πειραματικά δεδομένα καθώς και οι ρυθμίσεις που είχαν δοθεί στο λογισμικό πριν ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία παρουσιάζονται παρακάτω.

Αποστάσεις ηλεκτροδίων

Counter ~ Reference : 48 cm

Reference ~ working : 24 cm

Ποσότητα ηλεκτρολύτη

(NaCl + H₂O) : 160 ml

Ηλεκτρολύτης 3,5% NaCl

Αναλογία συστατικών : 3,5 ± 0,1 gr NaCl / 96,5 gr H₂O

Θερμοκρασία πειραμάτων

Θερμοκρασία δωματίου : 25 ± 5° C

Επιφάνεια δοκιμίου

Επιφάνεια δοκιμίου στο διάλυμα : $0,5 \text{ cm}^2$

Συχνότητες

Εύρος συχνοτήτων μέτρησης : $100.000 \text{ Hz (max)} \sim 0,01 \text{ Hz (min)}$

Αριθμός μετρήσεων

n frequencies : $66 = 9,3 / \text{dec}$

5.6 Εκτέλεση πειράματος ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας εμπέδησης (EIS).

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με την χρήση τριών (3) ηλεκτροδίων, εργασίας, μέτρησης (βοηθητικό) και αναφοράς.

Γι αρχή τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια όπως φαίνονταν σε προηγούμενη εικόνα με το ηλεκτρόδιο αναφοράς (RE) πάντα κοντά στο ηλεκτρόδιο εργασίας (WE). Τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι εκτεθειμένα στον διάλυμα.

Γεμίστηκε το κελί με τον ηλεκτρολύτη-διάλυμα (συνήθως χρησιμοποιείτε NaCl 3,5%) και προσέχθηκε να μην εγκλωβιστεί αέρας (φυσαλίδα).

Συνδέθηκαν τα ηλεκτρόδια με τον ποτενσιοστάτη σύμφωνα με τις οδηγίες.

Ο ποτενσιοστάτης συνδέθηκε με τον H/Y ο οποίος μέσω του προγράμματος έλεγχε και πραγματοποιούσε το πείραμα.

Οι παράμετροι (σταθερές) που χρησιμοποιήθηκαν εξαρτώνται από την πειραματική ρύθμιση κι επηρεάζονται από τους τύπους των υλικών, το διάλυμα κ.α.

Ρυθμίστηκε η αρχική και η τελική συχνότητα, δηλαδή το εύρος συχνοτήτων μέσα στο οποίο θα παρθούν όλες οι μετρήσεις.

Ρυθμίστηκαν τα βήματα (εύρος) των μετρήσεων, δηλ. κάθε πότε θ' αλλάζει το πρόγραμμα την συχνότητα για να παίρνουν και νέα μέτρηση. Κάθε σημείο δεδομένων αντιστοιχεί σε διαφορετική συχνότητα του εφαρμοζόμενου ρεύματος AC.

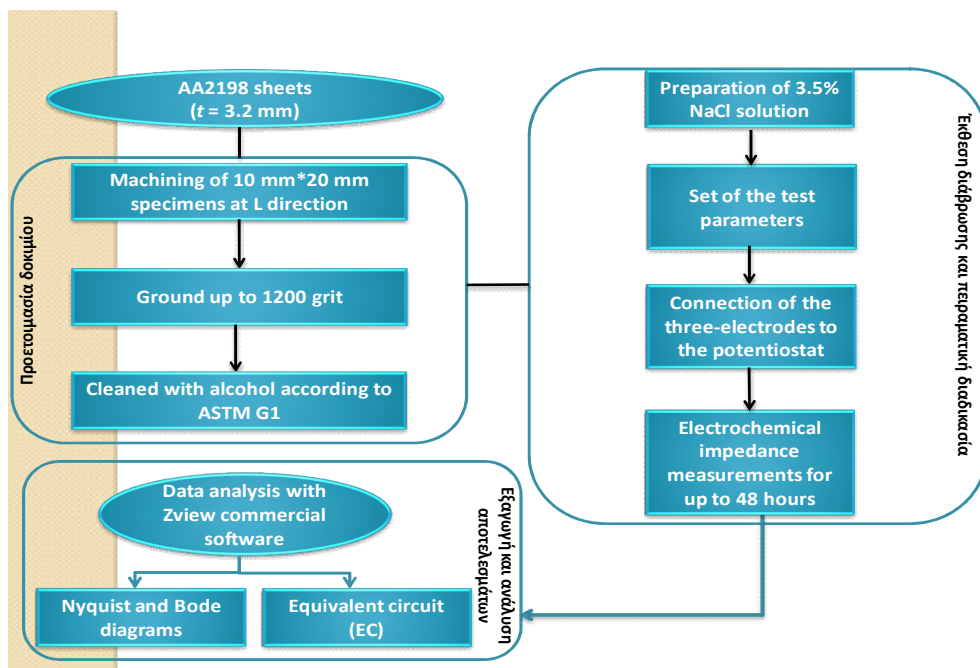
Από το ηλεκτρόδιο αναφοράς καταγράφηκε το αρχικό δυναμικό V το οποίο παραμένει σταθερό καθόλη την διάρκεια του πειράματος.

Για κάθε αλλαγή συχνότητας και με δεδομένο το δυναμικό, καταγράφετε το αντίστοιχο ρεύμα I.

Από το ζεύγος δυναμικού V και ρεύματος I υπολογίστηκε η σύνθετη αντίσταση Z και το ρεύμα διάβρωσης I_{corr} , ζητούμενα από την πειραματική διαδικασία.

5.7 Μεθοδολογία προσέγγισης – Διάγραμμα ροής.

Η μεθοδολογία προσέγγισης περιλάμβανε αρχικά την προμήθεια ελασμάτων κράματος αλουμινίου AA2198-T8 και T3 ονομαστικού πάχους $t=3.2$ mm και στη συνέχεια μηχανουργική κοπή των δοκιμίων σε διαστάσεις $10\text{mm} \times 20\text{mm}$. Τα δοκίμια καθαρίστηκαν κι ετοιμάστηκαν για την εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5 % NaCl. Η πειραματική διαδικασία της ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας εμπέδησης εκτελείται σε σύστημα τριών (3) ηλεκτροδίων. Υπάρχει το ηλεκτρόδιο εργασίας (δοκίμιο AA2198-T8 και T3 στην περίπτωση μας), το ηλεκτρόδιο μέτρησης και το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια στο ηλεκτρολυτικό κελί όπου περιέχεται ο ηλεκτρολύτης. Έπειτα συνδέθηκαν τα τρία (3) ηλεκτρόδια με τον ποτενσιοστάτη μέσω ηλεκτρικών αγωγών και ρυθμίστηκαν οι παράμετροι του πειράματος όπως η αρχική συχνότητα, η τελική συχνότητα, ο αριθμός των μετρήσεων και το δυναμικό στο οποίο θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις. Με την ολοκλήρωση του πειράματος ελήφθησαν τα δεδομένα και έπειτα δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα Nyquist και BODE από το λογισμικό. Τέλος, επιλέχθηκε κατάλληλο ισοδύναμο κύκλωμα από μια λίστα του λογισμικού και πραγματοποιήθηκε σύγκριση (fit) των τιμών της πειραματικής διαδικασίας με του ισοδύναμου κυκλώματος.



Εικόνα 39 : Διάγραμμα ροής της πειραματικής διαδικασίας.

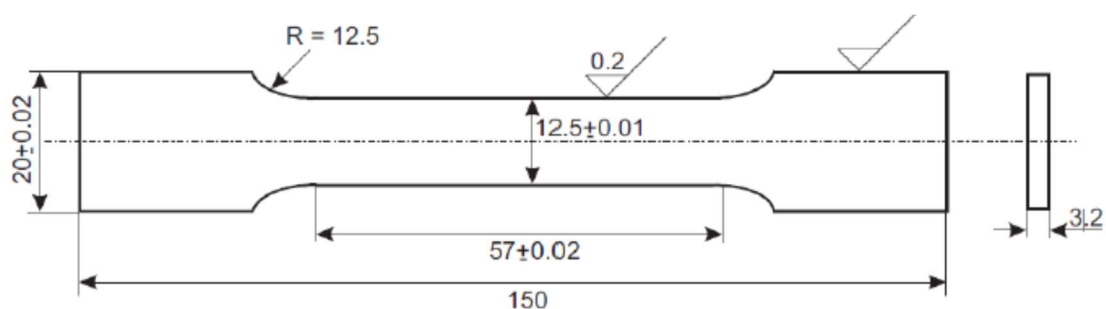
5.8 Πειραματικός εξοπλισμός μηχανικής καταπόνησης (εφελκυσμού).

5.8.1 Δοκίμια εφελκυσμού.

Για την πειραματική διαδικασία εφελκυσμού, χορηγήθηκαν από την εταιρεία Constellium τα δοκίμια της σειράς AA2198, ενώ τα δοκίμια της σειράς AA2024 παρασχέθηκαν από την Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία (ΕΑΒ). Τα δείγματα κόπηκαν και κατεργάστηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E8 και οι γεωμετρικές διαστάσεις τους φαίνονται στις επόμενες εικόνες.

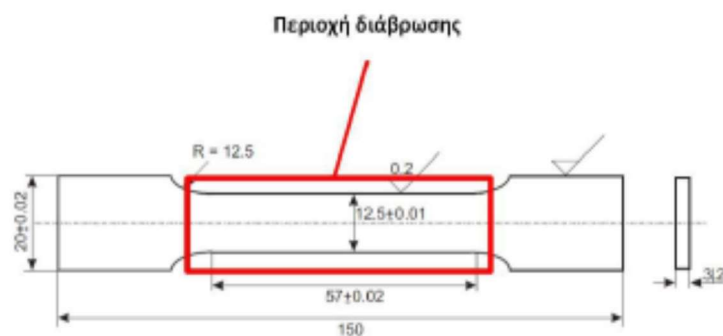


Εικόνα 40 : Κοπή δοκιμίων από πλάκα αλουμινίου.



Εικόνα 41 : Σκαρίφημα δοκιμίου εφελκυσμού.

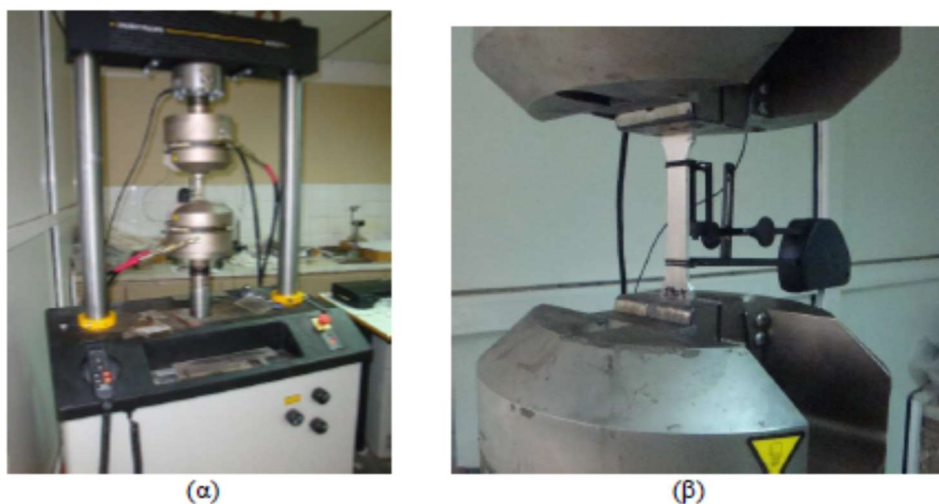
Τα δοκίμια πριν την εφαρμογή της δοκιμής εφελκυσμού, εμβαπτίστηκαν σε διαλύματα ήπιας διάβρωσης 3.5% NaCl ή της επιταχυνόμενης διάβρωσης-αποφλοιώσεως EXCO (EXfoliation Corrosion) σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G44, στην επιφάνεια ελέγχου τους όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα :



Εικόνα 42 : Διαβρωμένη επιφάνεια του δοκιμίου.

5.8.1 Μηχανολογικός εξοπλισμός εφελκυσμού.

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι δοκιμές εφελκυσμού, χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Αντοχής και Υλικών της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σύμφωνα με την προδιαγραφή ESTM E8, ο οποίος περιλαμβάνει μία σερβο-υδραυλική μηχανή Instron 100 KN με σταθερό ρυθμό μετατόπισης ίσος με 0,7 mm/min. Χρησιμοποιήθηκε ένας καταγραφέας δεδομένων σε όλες τις δοκιμές εφελκυσμού κι οι τιμές φορτίου, μετατόπισης και αξονικής καταπόνησης καταγράφηκαν και αποθηκεύτηκαν σε Η/Υ.



Εικόνα 43 : (α) Πειραματική διάταξη εφελκυσμού (β) τοποθετημένο δοκίμιο για εφελκυσμό με προσαρμοσμένο το επιμηκνσιομετρο.

Ένα εξωτερικό επιμηκνσιομετρο Instron με μέγιστη διαδρομή $50 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ προσαρτήθηκε στο ελεγχόμενο μήκος του δοκιμίου.

5.9 Εκτέλεση πειράματος μηχανικής αντοχής (εφελκυσμού).

Για τον προσδιορισμό της υποβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων αλουμινίου AA2198 και AA2024 από την επίδραση της διάβρωσης, διεξήχθησαν μηχανικές εφελκυστικές δοκιμές.

Με τον όρο εφελκυσμό ορίζεται η μηχανική καταπόνηση ενός υλικού όταν του επιβάλλονται δυνάμεις ίσες και αντίθετες με σκοπό να αυξήσουν το μήκος του.

Η διαδικασία των πειραμάτων ακολουθήθηκε με την παρακάτω σειρά σε όλη την σειρά δοκιμών.

Αρχικά ευθυγραμμίστηκαν οι αρπάγες της μηχανής ώστε να εξασφαλίσουμε ότι το δοκίμιό μας δεν θα υποστεί στρέψη.

Τοποθετήθηκε το δοκίμιο στις αρπάγες και ευθυγραμμίστηκε κι αυτό ώστε να επιβεβαιωθεί ότι θα υποστεί μόνο αξονική φόρτιση.

Τοποθετήθηκε στις άκρες του δοκιμίου ένα επιμηκυσσιόμετρο ώστε να καταγράφεται η επιμήκυνση.

Επιλέχθηκε ο ρυθμός μετατόπισης με σταθερή τιμή στα 0,7 mm/min.

Από τις πειραματικές τιμές της εφαρμοζόμενης δύναμης και της αντίστοιχης επιμήκυνσης υπολογίζεται η καμπύλη των ονομαστικών τάσεων-παραμορφώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : Πειραματικά αποτελέσματα.

6.1 Γενικά.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών πειραμάτων ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης (EIS) για τους διάφορους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα καθώς και των μηχανικών εφελκυστικών δοκιμών για τα κράματα αλουμινίου AA2198-T3 και AA2198-T8. Τα εν λόγω αποτελέσματα θα ελεγχθούν και θα αξιολογηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων σύμφωνα και με την διεθνή βιβλιογραφία.

6.2 Αποτελέσματα φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης (EIS).

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών δοκιμών EIS για τα AA2198-T8 και AA2198-T3 έπειτα από την έκθεσή τους στους διάφορους χρόνους διάβρωσης σε διάλυμα NaCl 3,5%. Από τα εν λόγω πειράματα προκύπτουν τα διαγράμματα (Nyquist-Bode) κι από τα οποία εξάγονται ποιοτικά συμπεράσματα για τους μηχανισμούς διάβρωσης ενώ από την εξαγωγή των αντίστοιχων ισοδύναμων κυκλωμάτων τους προκύπτουν πίνακες των παραμέτρων από τις οποίες απαρτίζονται τα αντίστοιχα κυκλώματα. Οι τιμές για τα κράματα αλουμινίου AA2198-T8 και AA2198-T3 παρουσιάζονται ενδεικτικά για τους πρώτους χρόνους έκθεσης παρακάτω, ενώ αναλυτικά για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα παρουσιάζονται στο τέλος στο Παράρτημα πινάκων μετρήσεων.

Πανεπιστήμιο Αιγαίου - Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης
Διπλωματική εργασία ΜΕΔΜΟΔΕ του ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΟΥΛΗ

Για το κράμα αλουμινίου AA2198-T8 :

Fixed at 66 freqs 2198-T8 [Oh]

neg.							neg.						
freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F	freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F
<u>100000</u>	3,89956	-0,23842	77,3938	77,2146	5,26337	3307070	<u>27,9353</u>	69,6723	0,015497	5600,9	1945,69	5252,09	921861
<u>78038,3</u>	4,22868	-0,07153	77,8447	77,6328	5,74007	2814520	<u>21,8003</u>	68,1308	0,019312	6871,82	2559,67	6377,3	873531
<u>60899,7</u>	5,52433	0,023842	78,164	77,8009	7,52472	2879290	<u>17,0125</u>	66,2496	0,01502	8363,36	3368,37	7655,06	818272
<u>47525,1</u>	6,9199	-0,07153	78,8472	78,2728	9,49964	2836680	<u>13,2763</u>	63,8834	0,01502	10167,5	4475,73	9129,39	761550
<u>37087,8</u>	8,48735	-0,02384	79,5792	78,7077	11,7452	2736970	<u>10,3606</u>	61,0644	0,016451	12259,9	5931,65	10729,4	698458
<u>28942,7</u>	10,3753	-0,07153	80,6932	79,3738	14,5324	2642750	<u>8,08523</u>	57,6222	0,023723	14625,4	7831,91	12351,7	627477
<u>22586,4</u>	12,5616	-0,11921	82,0504	80,0863	17,8451	2532480	<u>6,30957</u>	53,89	0,018907	17254	10168,4	13939,3	552612
<u>17626</u>	15,2117	-0,02384	84,0119	81,0684	22,0436	2441270	<u>4,92388</u>	49,9093	0,017428	20042,2	12907,2	15332,8	474362
<u>13755</u>	18,2978	-0,02384	86,6209	82,2411	27,1952	2350360	<u>3,84251</u>	45,605	0,020623	22912,4	16029,5	16371,7	395265
<u>10734,2</u>	21,8519	-0,02384	90,1311	83,6551	33,5476	2262620	<u>2,99863</u>	41,4162	0,020433	25673,5	19253,2	16983,7	319989
<u>8376,78</u>	26,0022	-0,07153	95,0161	85,3984	41,6556	2192450	<u>2,34008</u>	37,4192	0,01924	28352,1	22517,6	17227,9	253305
<u>6537,09</u>	30,4444	-0,07153	101,791	87,7559	51,5775	2118480	<u>1,82616</u>	33,7548	0,025964	30718,7	25540,2	17068,5	195846
<u>5101,43</u>	35,2423	-0,02384	110,829	90,5159	63,9521	2049870	<u>1,4251</u>	31,2167	0,033069	33124,9	28328,8	17167,8	153724
<u>3981,07</u>	40,3352	0,054836	121,742	92,8007	78,7988	1971060	<u>1,11213</u>	28,6256	0,029779	35435,3	31104	16975,6	118626
<u>3106,76</u>	45,1441	0,011921	137,968	97,3126	97,8034	1909160	<u>0,867884</u>	26,5652	0,026012	37668,6	33691,8	16846	91862,5
<u>2424,46</u>	49,6682	0,007153	158,989	102,899	121,198	1846260	<u>0,672781</u>	25,1417	0,022149	40179,8	36373,1	17070,7	72644,3
<u>1892,01</u>	53,8064	0,021458	185,766	109,698	149,918	1782200	<u>0,528539</u>	23,3134	0,023294	42645,9	39164,1	16877,5	56048,8
<u>1476,49</u>	57,5427	0,002384	219,97	118,051	185,609	1721900	<u>0,412463</u>	21,8486	0,028396	45792,3	42503	17041,9	44165,3
<u>1152,23</u>	60,7553	0,016689	263,73	128,843	230,115	1665960	<u>0,321879</u>	20,2501	0,029206	47736	44785,5	16522,3	33415,1
<u>899,179</u>	63,4978	0,021458	317,85	141,835	284,449	1607060	<u>0,251189</u>	19,2512	0,027204	50017,2	47220,4	16491,2	26027,5
<u>701,704</u>	65,8374	0,011921	385,14	157,649	351,397	1549290	<u>0,196023</u>	17,8178	0,022912	52032	49536,3	15921,3	19609,5
<u>547,598</u>	67,7617	0,007153	469,476	177,678	434,555	1495160	<u>0,152973</u>	16,6529	0,026488	54120,3	51850,4	15509,4	14907
<u>427,336</u>	69,2991	0,059605	574,063	202,925	537	1441860	<u>0,119378</u>	15,9592	0,025773	55927,8	53772,2	15377,5	11534,3
<u>333,485</u>	70,5337	0,064373	703,977	234,602	663,736	1390760	<u>0,09316</u>	14,7956	0,026584	58164,1	56235,6	14854,3	8694,35
<u>260,246</u>	71,5051	-0,00238	864,692	274,297	820,033	1340900	<u>0,072701</u>	14,1512	0,031829	59484,8	57679,7	14543	6643,11
<u>203,092</u>	72,1996	0,011921	1063,41	325,087	1012,51	1292020	<u>0,056734</u>	13,0154	0,041747	58926,4	57412,5	13271	4730,75
<u>158,489</u>	72,6477	0,026226	1308,53	390,264	1248,98	1243760	<u>0,044275</u>	14,498	0,048852	61282,8	59331,4	15349,9	4267,89
<u>123,682</u>	72,8543	0,00453	1611,86	475,18	1540,23	1196940	<u>0,034551</u>	15,5069	0,072599	60964,4	58745,2	16299,1	3538,39
<u>96,5196</u>	72,8803	0,011206	1987,89	585,172	1899,81	1152140	<u>0,026963</u>	18,5158	0,082326	64109,9	60791,3	20359,2	3449,12
<u>75,3222</u>	72,7611	0,012636	2446,48	725,03	2336,58	1105820	<u>0,021042</u>	18,2384	0,091768	67084,7	63714,6	20995,6	2775,78
<u>58,7802</u>	72,33	0,011683	3017	915,764	2874,66	1061690	<u>0,01642</u>	19,9986	0,107313	70412,8	66167	24081	2484,5
<u>45,871</u>	71,7515	0,011206	3713,5	1162,84	3526,74	1016460	<u>0,012814</u>	19,4606	0,134731	73831,5	69613,5	24597,6	1980,45
<u>35,797</u>	70,8726	0,012159	4560,18	1494,23	4308,42	969046	<u>0,01</u>	20,6233	0,154615	78386,3	73363	27609,4	1734,75

Πίνακας 8 : Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T8 στις 0 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

Αντίστοιχα οι τιμές για το κράμα AA2198-T3 είναι :

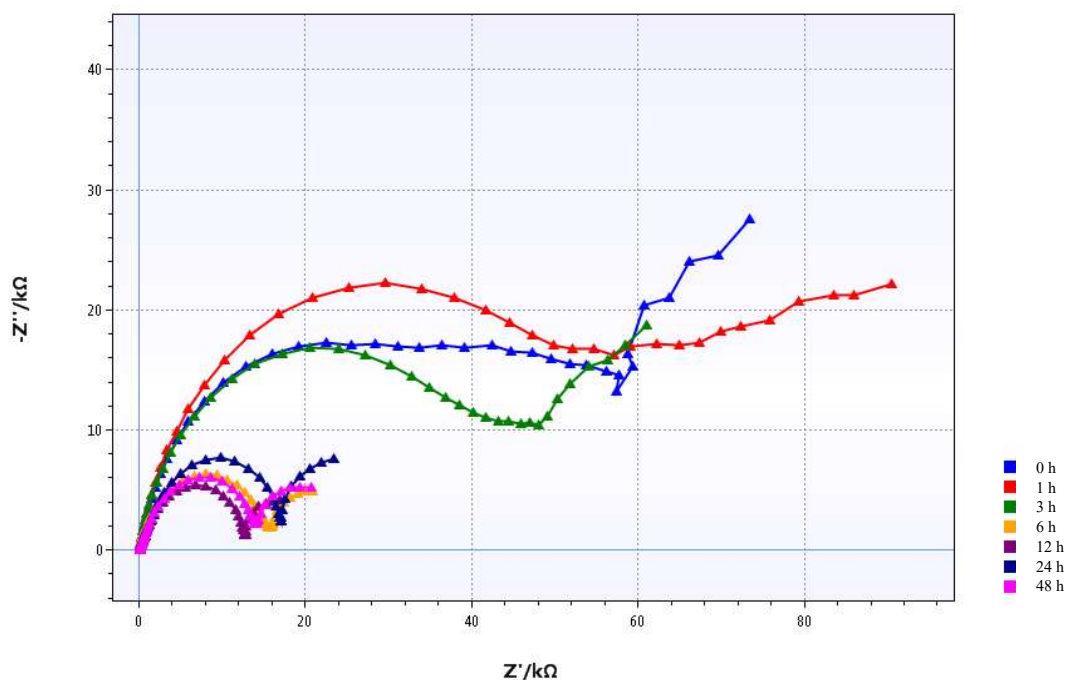
Fixed at 66 freqs 2198-T3 [Oh]

neg.							neg.						
freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F	freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F
<u>100000</u>	5,30314	-0,23842	87,8698	87,4937	8,12138	5102810	<u>27,9353</u>	72,6064	-0,03219	13072,2	3907,74	12474,5	2189560
<u>78038,3</u>	6,10254	-0,11921	88,2529	87,7528	9,382	4600270	<u>21,8003</u>	71,1256	-0,03097	16126,7	5216,92	15259,6	2090180
<u>60899,7</u>	7,91777	-0,07153	88,8368	87,9899	12,2374	4682580	<u>17,0125</u>	69,3683	-0,0315	19756,5	6961,4	18489,4	1976390
<u>47525,1</u>	9,98239	-0,16689	89,6964	88,3385	15,5485	4642910	<u>13,2763</u>	67,1967	-0,03154	24169	9367,16	22280	1858540
<u>37087,8</u>	12,5304	-0,07153	90,9251	88,7593	19,7269	4596950	<u>10,3606</u>	64,6623	-0,03197	29345,8	12558,6	26522,8	1726570
<u>28942,7</u>	15,4438	-0,11921	92,7403	89,3917	24,6961	4491030	<u>8,08523</u>	61,6435	-0,03216	35378,6	16803,3	31133,5	1581610
<u>22586,4</u>	19,0286	-0,16689	95,2602	90,0548	31,0586	4407660	<u>6,30957</u>	58,2232	-0,03264	42351,7	22302,9	36003,5	1427330
<u>17626</u>	23,2102	-0,11921	99,1399	91,1161	39,0716	4327080	<u>4,92388</u>	54,3486	-0,03226	50006,3	29146,3	40634	1257120
<u>13755</u>	28,0437	-0,07153	104,603	92,3218	49,1787	4250280	<u>3,84251</u>	49,998	-0,03278	58341,9	37503	44691,2	1078990
<u>10734,2</u>	33,446	-0,11921	112,559	93,9197	62,0368	4184070	<u>2,99863</u>	45,3395	-0,03321	66704,5	46886,9	47445,9	893926
<u>8376,78</u>	39,164	-0,01192	121,28	94,0334	76,5935	4031330	<u>2,34008</u>	40,6141	-0,03369	75086	56998,7	48878	718661
<u>6537,09</u>	45,1296	-0,02623	137,266	96,8417	97,2807	3995680	<u>1,82616</u>	36,0353	-0,0334	82831,9	66982,4	48728,7	559118
<u>5101,43</u>	50,7215	-0,01669	158,849	100,566	122,962	3941330	<u>1,4251</u>	31,5189	-0,03335	89745,2	76504,9	46917	420103
<u>3981,07</u>	55,8127	0,011921	187,216	105,197	154,866	3873790	<u>1,11213</u>	27,6876	-0,03369	95712,3	84752,7	44472,8	310762
<u>3106,76</u>	60,3238	-0,02146	224,752	111,274	195,273	3811800	<u>0,867884</u>	24,4421	-0,03407	100687	91662,3	41661,5	227183
<u>2424,46</u>	64,1385	-0,01192	272,912	119,043	245,58	3741000	<u>0,672781</u>	21,6426	-0,03397	104977	97576,4	38717,2	164760
<u>1892,01</u>	67,3067	-0,00238	334,127	128,906	308,26	3664540	<u>0,528539</u>	19,7069	-0,03426	108830	102455	36698,3	121872
<u>1476,49</u>	69,96	-0,02146	411,755	141,099	386,825	3588600	<u>0,412463</u>	18,3884	-0,03464	112337	106601	35437,6	91839,3
<u>1152,23</u>	71,9295	-0,02623	510,339	158,3	485,167	3512450	<u>0,321879</u>	17,5575	-0,03493	116110	110701	35025,9	70837,3
<u>899,179</u>	73,5223	-0,01669	632,065	179,281	606,106	3424320	<u>0,251189</u>	17,1699	-0,0355	120163	114807	35472,8	55985,5
<u>701,704</u>	74,7847	-0,03099	784,513	205,893	757,013	3337620	<u>0,196023</u>	17,1645	-0,03599	124791	119233	36828,1	45359,3
<u>547,598</u>	75,7577	-0,01669	977,818	240,566	947,764	3260930	<u>0,152973</u>	17,3397	-0,0361	129647	123755	38639,4	37138,6
<u>427,336</u>	76,3928	0,030994	1217,22	286,368	1183,05	3176520	<u>0,119378</u>	17,7053	-0,03616	135641	129216	41251,3	30941,4
<u>333,485</u>	76,7198	-0,036	1513,85	347,751	1473,37	3087220	<u>0,09316</u>	18,1843	-0,03487	142105	135008	44347,3	25958,4
<u>260,246</u>	76,9918	-0,03314	1884,06	424,084	1835,71	3001710	<u>0,072701</u>	18,2021	-0,03598	149836	142338	46804,2	21379,8
<u>203,092</u>	77,1194	-0,02646	2346,79	523,144	2287,73	2919290	<u>0,056734</u>	18,2448	-0,03653	158009	150063	49477,6	17637,4
<u>158,489</u>	77,088	-0,0155	2916,99	651,812	2843,23	2831340	<u>0,044275</u>	18,5526	-0,03787	165553	156949	52674,8	14653,3
<u>123,682</u>	76,9087	-0,03457	3629,03	821,988	3534,71	2746890	<u>0,034551</u>	19,051	-0,03793	175555	165940	57302,9	12439,9
<u>96,5196</u>	76,6167	-0,03076	4506,15	1043,02	4383,78	2658540	<u>0,026963</u>	19,2386	-0,03748	186326	175921	61395	10401,2
<u>75,3222</u>	76,1663	-0,03028	5588,15	1336,15	5426,06	2567960	<u>0,021042</u>	19,3571	-0,03749	195744	184679	64880,3	8577,68
<u>58,7802</u>	75,575	-0,03076	6935,18	1727,64	6716,54	2480600	<u>0,01642</u>	19,1839	-0,0359	206540	195071	67869,2	7002,25
<u>45,871</u> </													

Βάσει των μετρήσεων δημιουργήθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα Nyquist και Bode των δύο υλικών που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Οι χρόνοι έκθεσης σε διάβρωση που επιλέχθηκαν είναι οι εξής : 0, 1, 3, 6, 12, 24, 48 ώρες αντίστοιχα και οι διαφορές μεταξύ των διαγραμμάτων για την κάθε ώρα παρουσιάζονται παρακάτω :

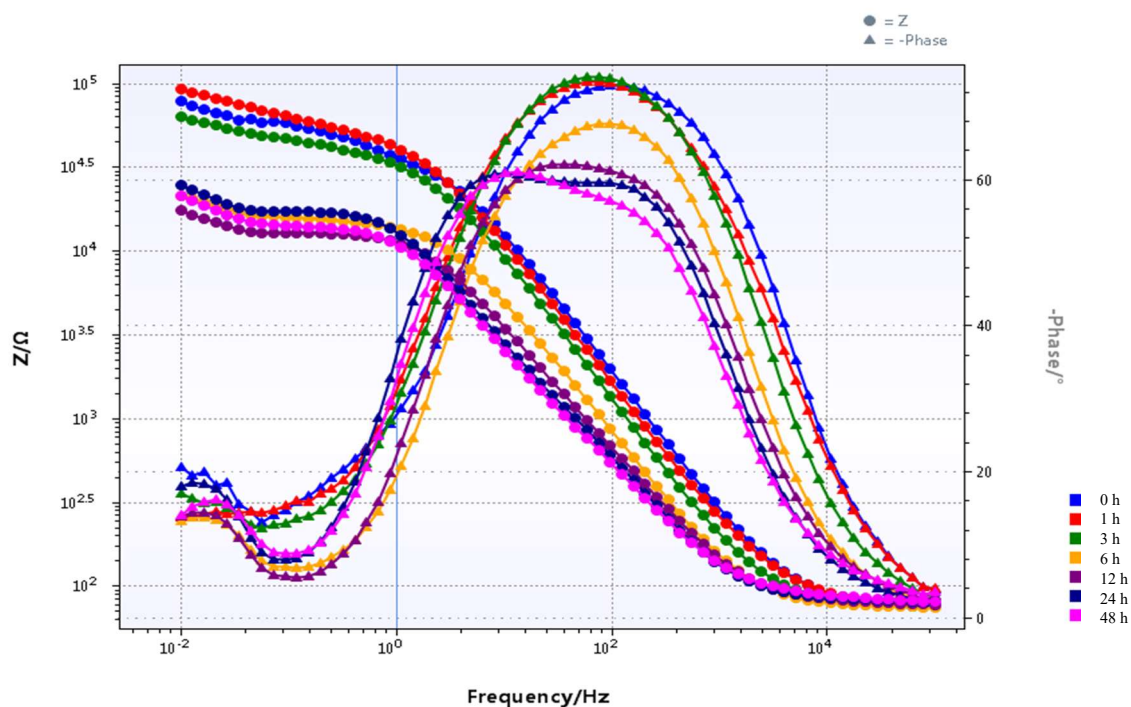
Για το κράμα αλουμινίου AA2198-T8

Παρατηρώντας τις καμπύλες στο διάγραμμα Nyquist, διαπιστώνεται ότι μέχρι και τις 3 ώρες έκθεσης στο διάλυμα NaCl του δοκιμίου AA2198-T8 η πτώση της καμπύλης είναι μικρή που σημαίνει ότι η αντίσταση από το προστατευτικό φιλμ, παραμένει σχεδόν σταθερή. Στη συνέχεια υπάρχει αισθητή πτώση των καμπυλών, δείγμα ότι το προστατευτικό φιλμ σπάει και η διάβρωση εισέρχεται στο εσωτερικό του κράματος.



Διάγραμμα 1 : Διάγραμμα Nyquist του κράματος AA2198-T8 για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα NaCl 3,5%.

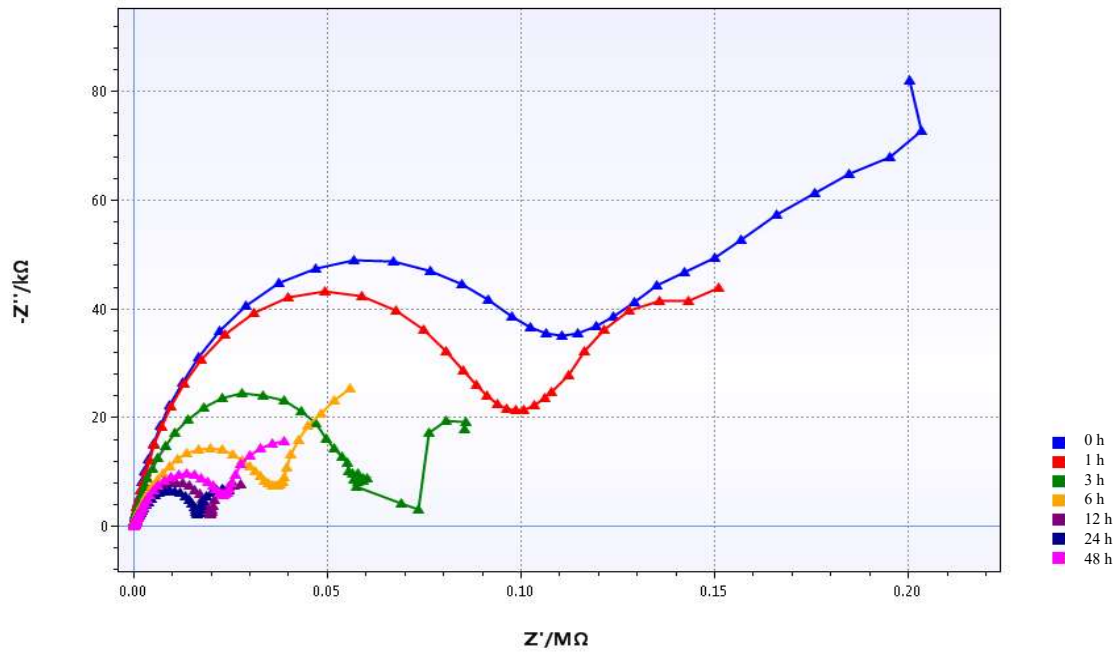
Στο αντίστοιχο διάγραμμα Bode ($Z \sim Fr$), επιβεβαιώνεται κι εδώ η πτώση της αντίστασης του προστατευτικού φιλμ μετά τις 6 ώρες έκθεσης στο διάλυμα NaCl, με το μέτρο της αντίστασης Z να μειώνεται αισθητά.



Διάγραμμα 2 : Διάγραμμα Bode του κράματος AA2198-T8 για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα NaCl 3,5%.

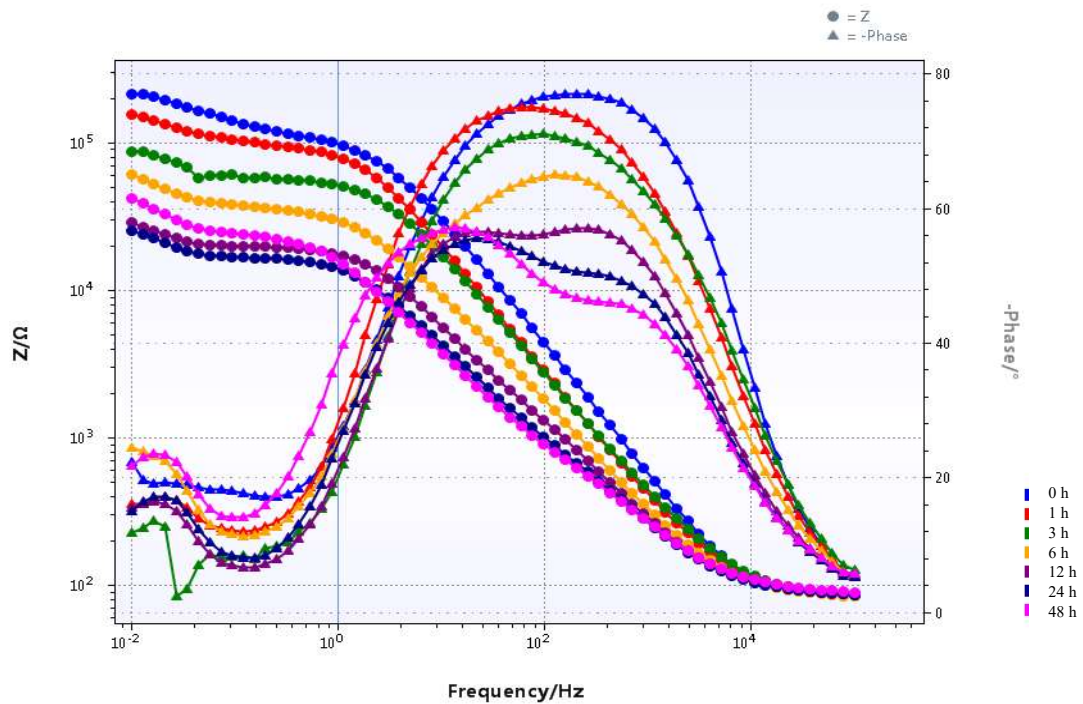
Για το κράμα αλουμινίου AA2198-T3

Αντίστοιχα το ίδιο φαινόμενο παρατηρείτε και στο διάγραμμα Nyquist του δοκιμίου AA2198-T3, αλλά με την πτώση των καμπυλών να είναι σταδιακή, πράγμα που σημαίνει ότι κι η αντίσταση του κράματος μειώνεται σταδιακά με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα NaCl.



Διάγραμμα 3 : Διάγραμμα Nyquist του κράματος AA2198-T3 για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα NaCl 3,5%.

Στο διάγραμμα Bode ($\text{Ph}^\circ \sim \text{Fr}$) η ακτίνα σε όλους τους χρόνους έκθεσης είναι κάτω από τις 90° με ανώτατο όριο στις μεσαίες συχνότητες ($10^2\text{-}10^1$ Hz) και κατώτατο όριο στις χαμηλές συχνότητες (10^{-1} Hz).



Διάγραμμα 4 : Διάγραμμα Bode του κράματος AA2198-T8 για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα NaCl 3,5% .

6.3 Μοντελοποίηση – επιλογή ισοδύναμου κυκλώματος.

Στόχος της μοντελοποίησης είναι η επιλογή ενός ισοδύναμου κυκλώματος που να μπορεί να προσομοιώνει όσο καλύτερα γίνεται την συμπεριφορά σε διάβρωση των δειγμάτων στα οποία έγιναν οι πειραματικές μετρήσεις. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PSTrace5 το οποίο με βάση και το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα που σχεδιάστηκε στο λογισμικό ή που επιλέχθηκε από τη βιβλιοθήκη των ετοιμών κυκλωμάτων του λογισμικού, έκανε το κατάλληλο ‘fitting’.

Το λογισμικό ως εργαλείο, βοηθάει να σχεδιαστούν ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα και να χρησιμοποιηθούν αργότερα στο κομμάτι της προσομοίωσης. Δίνεται η δυνατότητα να σχεδιαστεί το κατάλληλο κύκλωμα και οι σχέσεις μεταξύ των επιλεγμένων στοιχείων όπως ωμικές αντιστάσεις, πυκνωτές, πηνία, κόμβοι αναφοράς, στοιχεία σταθερής φάσης (CPE) και στοιχεία διάχυσης (Warburg).

Με βάση τη μορφή των διαγραμμάτων Nyquist και των αποτελεσμάτων έπειτα από αρκετές δοκιμές κυκλωμάτων, τα ηλεκτρικά κυκλώματα (ισοδύναμα κυκλώματα) που επιλέχθηκαν στην παρούσα εργασία φαίνονται παρακάτω όπως και τα διαγράμματα των στοιχείων των κυκλωμάτων τους.

Τα στοιχεία των ισοδύναμων κυκλωμάτων που παρουσιάζονται παρακάτω είναι :

- $R1$: είναι η αντίσταση του ηλεκτρολύτη (διαλύματος). Αντιπροσωπεύει την αντίσταση του διαλύματος (ηλεκτρολύτη) με την τιμή του να κυμαίνεται από 1 έως 100 ω κι σχεδόν να αγνοείται λόγω των μικρών τιμών του σε σχέση με τις άλλες αντιστάσεις.
- $R2$: αντίσταση επιφανειακού προστατευτικού φιλμ (στρώματος οξειδίου).
- $Q1$: χωρητικότητα προστατευτικού επιφανειακού στρώματος οξειδίου, μη ιδανικός πυκνωτής. Το ζεύγος $R2//Q1$ (στοιχείο σταθερής φάσης) αντιπροσωπεύει την χωρητικότητα του προστατευτικού φιλμ συνδεδεμένη παράλληλα με την αντίσταση - αγώγιμες διαδρομές που συνδέονται με τις ελαττωματικές θέσεις στην επιφάνεια του υλικού οι οποίες δημιουργούνται από τις ενδομεταλλικές φάσεις (IMCs) και οδηγούν στην διάσπαση του φιλμ και ως εκ τούτου σε μη προστατευμένη (ακάλυπτη) επιφάνεια του υλικού. Ένα στοιχείο σταθερής φάσης (constant phase element - CPE), που εκφράζεται ως Q στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε αντί του ιδανικού πυκνωτή για να τονίσει την ανομοιογένεια της επιφάνειας του κράματος.
- $R3$: αντίσταση μεταφοράς φορτίου (διπλοστοιβάδας).
- $Q2$: χωρητικότητα μεταφοράς φορτίου, μη ιδανικός πυκνωτής. Το ζεύγος $R3//Q2$ (στοιχείο σταθερής φάσης), το οποίο εμφανίζεται μετά τις 12 ώρες

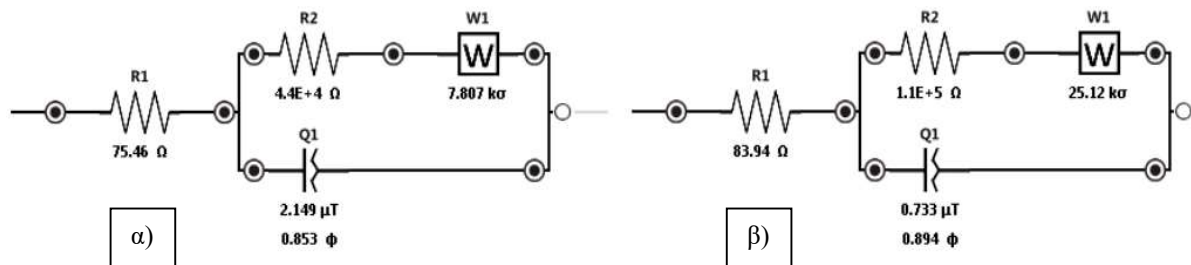
διάβρωσης, αντιπροσωπεύει την αντίσταση μεταφοράς φορτίου συζευγμένη με τη φόρτιση του διπλού στρώματος.

- *W*: Warburg (διάχυση) αντίσταση. Αντιπροσωπεύει το στοιχείο διάχυσης “Warburg”, το οποίο μοιάζει με ένα στοιχείο σταθερής φάσης (CPE) αλλά με $n=0,5$. Αποδίδεται στις διαδικασίες διάβρωσης χαμηλής συχνότητας που ελέγχουν κινητικά τη διάλυση των κραμάτων, η οποία εξελίσσεται σε μια διαδικασία ελεγχόμενη με διάχυση.

Για όλα τα αποτελέσματα κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα προσομοίωσης του μηχανισμού διάβρωσης. Αυτά επιλέχθηκαν από μια λίστα κυκλωμάτων και παρουσιάζονται όσα είχαν το καλύτερο ‘fit’ (ταίριασμα) με τις καμπύλες των διαγραμμάτων Bode. Από τα ισοδύναμα κυκλώματα ελήφθησαν οι τιμές των στοιχείων των κυκλωμάτων και έγινε σύγκριση μεταξύ των δύο δοκιμίων και των διαφορετικών ωρών διάβρωσης. Τέλος ελέγχθηκε το ποσοστό λάθους (error) για κάθε τιμή και συνολικά ώστε να βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων. Για χρόνο έκθεσης $t=0$ ώρες κατασκευάστηκε και για τα δύο υλικά, το ίδιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα προσομοίωσης, έπειτα από διάφορες δοκιμές σε διαφορετικά μοντέλα, από τα οποία επιλέχθηκε αυτό που έδινε το καλύτερο ‘fit’. Οι τιμές των στοιχείων των κυκλωμάτων παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες και το “fitting” (κόκκινη γραμμή) στα αντίστοιχα διάγραμμα τους.

6.3.1 Αποτελέσματα ισοδύναμου μοντέλου AA2198-T8 και T3 για t=0h.

Στον χρόνο αναφοράς (0 ώρες) παρατηρείτε μόνο η αντίσταση του προστατευτικού φιλμ (R2), με την τιμή της στο AA2198-T3 να είναι διπλάσια του AA2198-T8.



Σχήμα : Ισοδύναμο κύκλωμα πειραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 0 ώρες.

2198_T8_0h

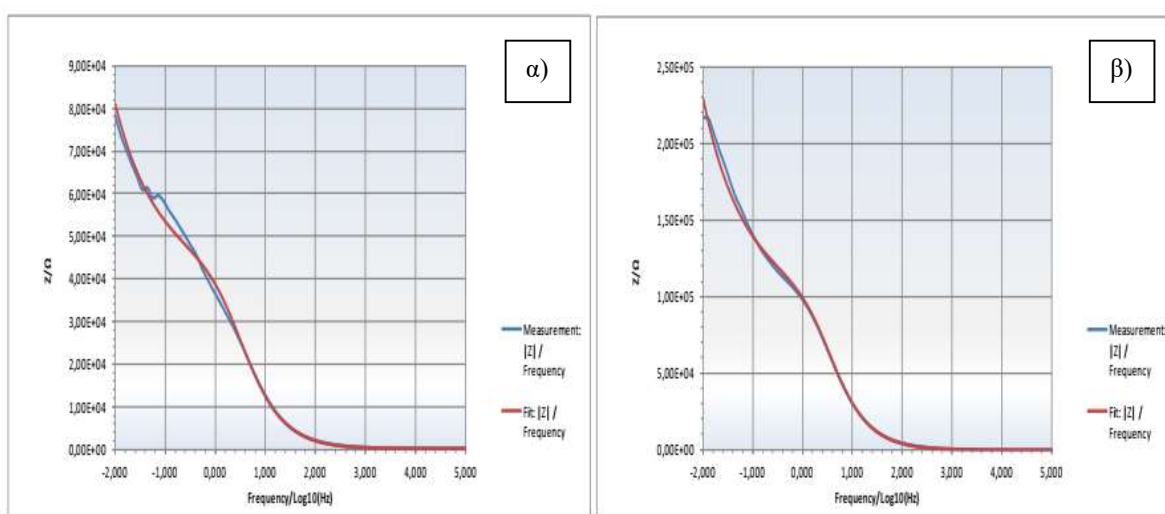
Circuit:	R([RW]Q)			
Fixed	Element	Fitted Value	Unit	Error%
True	R 1	75.46	Ω	1.271
True	R 2	4.449E+4	Ω	1.491
True	W 1	7.807	kΩ	3.740
True	Q 1	2.149	μT	2.234
True	n 1	0.853	φ	0.371

2198_T3_0h

Circuit:	R([RW]Q)			
Fixed	Element	Fitted Value	Unit	Error%
True	R 1	83.94	Ω	1.144
True	R 2	1.078E+5	Ω	1.243
True	W 1	25.12	kΩ	2.618
True	Q 1	0.733	μT	1.732
True	n 1	0.894	φ	0.261

Πίνακας τιμών των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος πειραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 0 ώρες.

Εικόνα 44 : Ισοδύναμα κυκλώματα με τους αντίστοιχους πίνακες των στοιχείων τους, των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 0 ώρες έκθεσης.

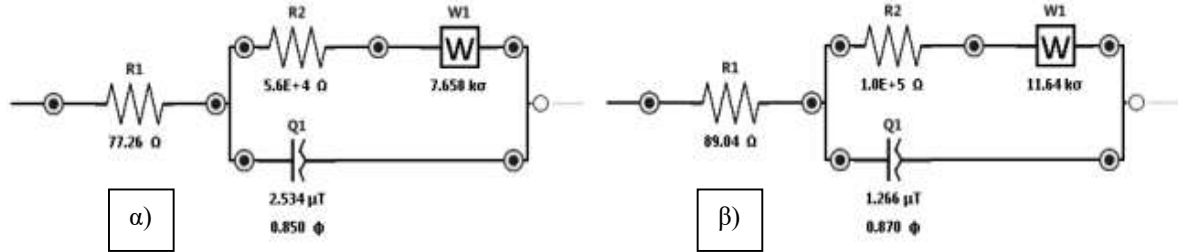


Διάγραμμα Bode πειραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 0 ώρες.

Διάγραμμα 5 : Διαγράμματα Bode των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 0 ώρες έκθεσης.

6.3.2 Αποτελέσματα ισοδύναμου μοντέλου ΑΑ2198-T8 και T3 για t=1h.

Και στον δεύτερο χρόνο έκθεσης (1 ώρα) η τιμή της αντίστασης του προστατευτικού φιλμ διατηρείτε με μία μικρή μείωση στο ΑΑ2198-T3.



Σχήμα : Ισοδύναμο κύκλωμα παραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) ΑΑ2198-T8 και β) ΑΑ2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 1 ώρες.

2198_T8_1h

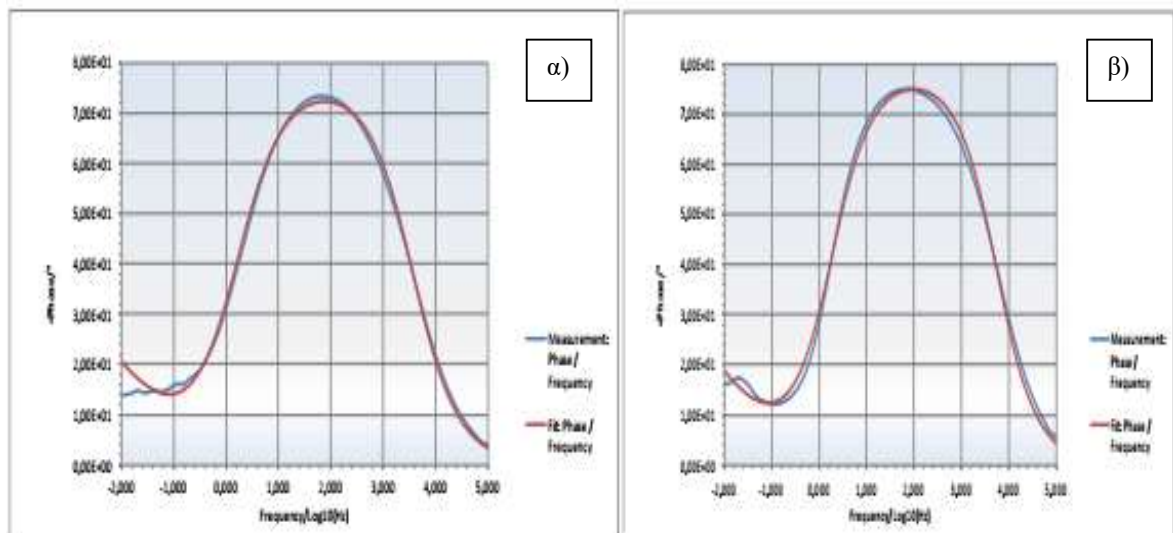
Circuit:		R([RW]Q)			
Fixed	Element	Fitted Value	Unit	Error%	
True	R 1	77.26	Ω	1.104	
True	R 2	5.573E+4	Ω	1.392	
True	W 1	7.658	kΩ	4.239	
True	Q 1	2.534	μT	1.874	
True	n 1	0.850	φ	0.325	

2198_T3_1h

Circuit:		R([RW]Q)			
Fixed	Element	Fitted Value	Unit	Error%	
True	R 1	89.04	Ω	1.342	
True	R 2	9.661E+4	Ω	1.498	
True	W 1	11.64	kΩ	5.225	
True	Q 1	1.266	μT	2.101	
True	n 1	0.870	φ	0.344	

Πίνακας τιμών των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος παραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) ΑΑ2198-T8 και β) ΑΑ2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 1 ώρες.

Εικόνα 45 : Ισοδύναμο κυκλώματα με τους αντίστοιχους πίνακες των στοιχείων τους, των κραμάτων αλουμινίου α) ΑΑ2198-T8 και β) ΑΑ2198-T3 για 1 ώρες έκθεσης.

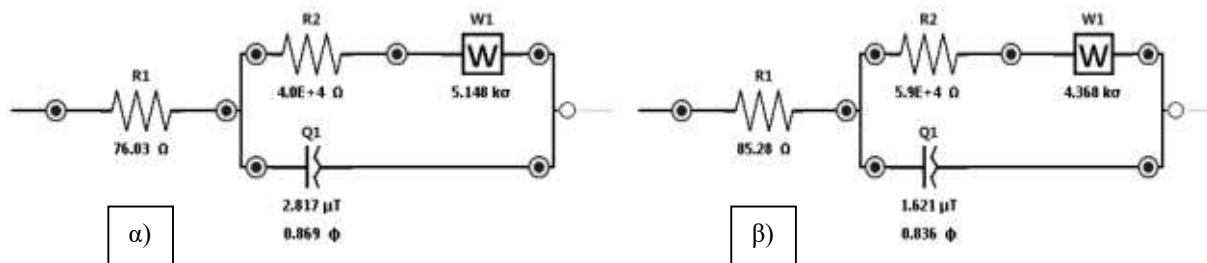


Διάγραμμα Bode παραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) ΑΑ2198-T8 και β) ΑΑ2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 1 ώρες.

Διάγραμμα 6 : Διαγράμματα Bode των κραμάτων αλουμινίου α) ΑΑ2198-T8 και β) ΑΑ2198-T3 για 1 ώρες έκθεσης.

6.3.3 Αποτελέσματα ισοδύναμου μοντέλου ΑΑ2198-T8 και T3 για $t=3h$.

Η μείωση της τιμής της αντίστασης στο ΑΑ2198-T3 είναι σημαντική και φθάνει σε ποσοστό το 45% της αρχικής τιμής της.



Σχήμα : Ισοδύναμο κύκλωμα παραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) ΑΑ2198-T8 και β) ΑΑ2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 3 ώρες.

2198_T8_3h

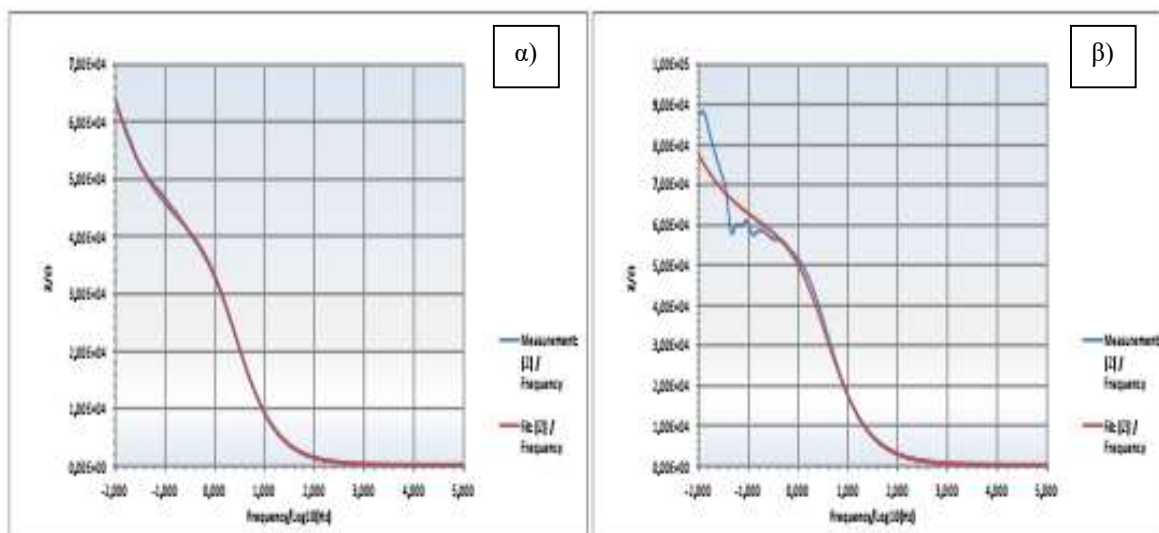
Circuit: R([RW]Q)				
Fixed	Element	Fitted Value	Unit	Error%
True	R 1	76.03	Ω	0.454
True	R 2	4.038E+4	Ω	0.570
True	W 1	5.148	κΩ	1.873
True	Q 1	2.817	μF	0.851
True	n 1	0.869	φ	0.147

2198_T3_3h

Circuit: R([RW]Q)				
Fixed	Element	Fitted Value	Unit	Error%
True	R 1	85.28	Ω	1.998
True	R 2	5.877E+4	Ω	1.875
True	W 1	4.368	κΩ	10.86
True	Q 1	1.621	μF	3.184
True	n 1	0.836	φ	0.527

Πίνακας τιμών των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος παραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) ΑΑ2198-T8 και β) ΑΑ2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 3 ώρες.

Εικόνα 46 : Ισοδύναμα κυκλώματα με τους αντίστοιχους πίνακες των στοιχείων τους, των κραμάτων αλουμινίου α) ΑΑ2198-T8 και β) ΑΑ2198-T3 για 3 ώρες έκθεσης.

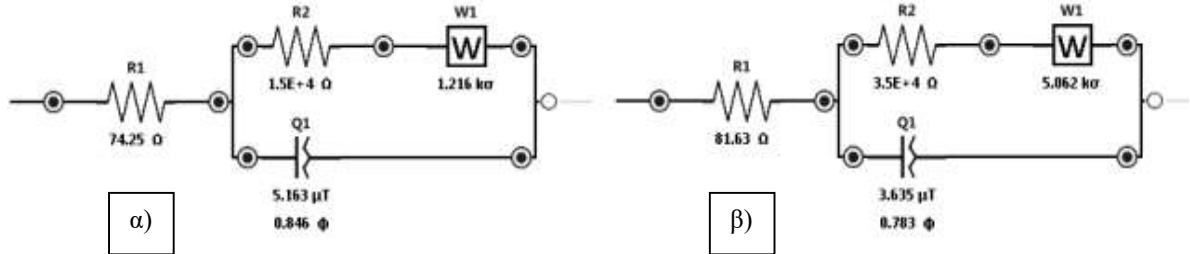


Διάγραμμα Bode παραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) ΑΑ2198-T8 και β) ΑΑ2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 3 ώρες.

Διάγραμμα 7 : Διαγράμματα Bode των κραμάτων αλουμινίου α) ΑΑ2198-T8 και β) ΑΑ2198-T3 για 3 ώρες έκθεσης.

6.3.4 Αποτελέσματα ισοδύναμου μοντέλου AA2198-T8 και T3 για t=6h.

Στον συγκεκριμένο χρόνο έκθεσης, οι τιμές των αντιστάσεων των προστατευτικών φιλμ έχουν μειωθεί αισθητά που σημαίνει ότι η διάβρωση έχει σπάσει το φιλμ.



Σχήμα : Ισοδύναμο κύκλωμα παραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 6 ώρες.

2198_T8_6h

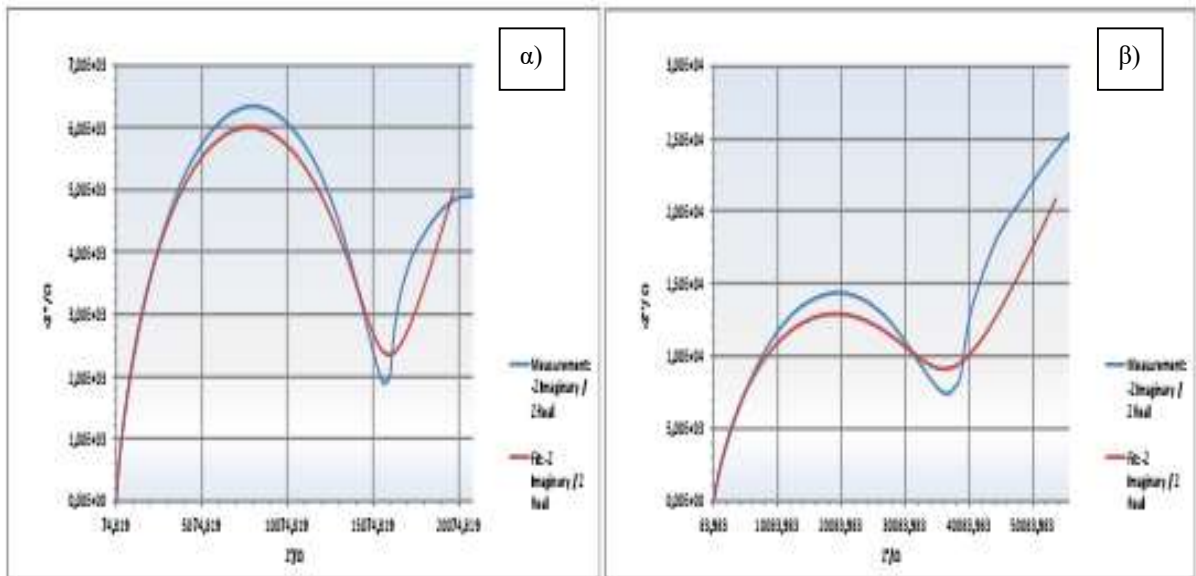
Circuit:	R([RW]Q)			
Fixed	Element	Fitted Value	Unit	Error%
True	R 1	74.25	Ω	0.729
True	R 2	1.500E+4	Ω	0.840
True	W 1	1.216	kΩ	4.351
True	Q 1	5.163	μF	1.657
True	n 1	0.846	φ	0.296

2198_T3_6h

Circuit:	R([RW]Q)			
Fixed	Element	Fitted Value	Unit	Error%
True	R 1	81.63	Ω	1.465
True	R 2	3.460E+4	Ω	1.665
True	W 1	5.062	kΩ	4.669
True	Q 1	3.635	μF	2.460
True	n 1	0.783	φ	0.447

Πίνακας τιμών των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος παραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 6 ώρες.

Εικόνα 47 : Ισοδύναμα κυκλώματα με τους αντίστοιχους πίνακες των στοιχείων τους, των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 6 ώρες έκθεσης.

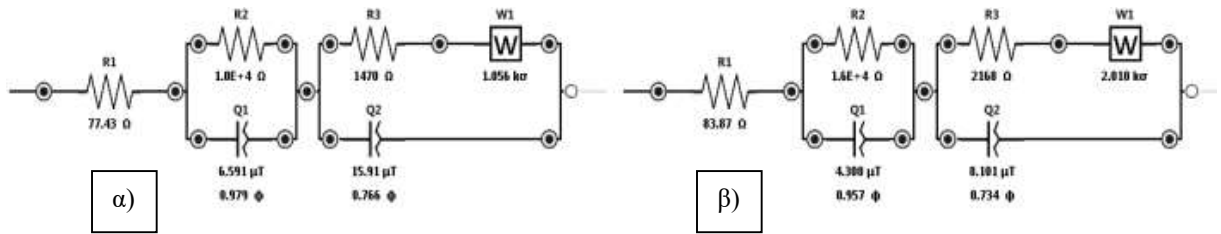


Διάγραμμα Nyquist παραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 6 ώρες.

Διάγραμμα 8 : Διαγράμματα Nyquist των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 6 ώρες έκθεσης.

6.3.5 Αποτελέσματα ισοδύναμου μοντέλου AA2198-T8 και T3 για t=12h.

Σ' αυτόν τον χρόνο έκθεσης (12 ώρες), λόγω της καταστροφής του προστατευτικού φιλμ, εμφανίζεται και η αντίσταση της μεταφοράς φορτίου.



Σχήμα : Ισοδύναμο κύκλωμα παραμετρικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 12 ώρες.

2198_T8_12h

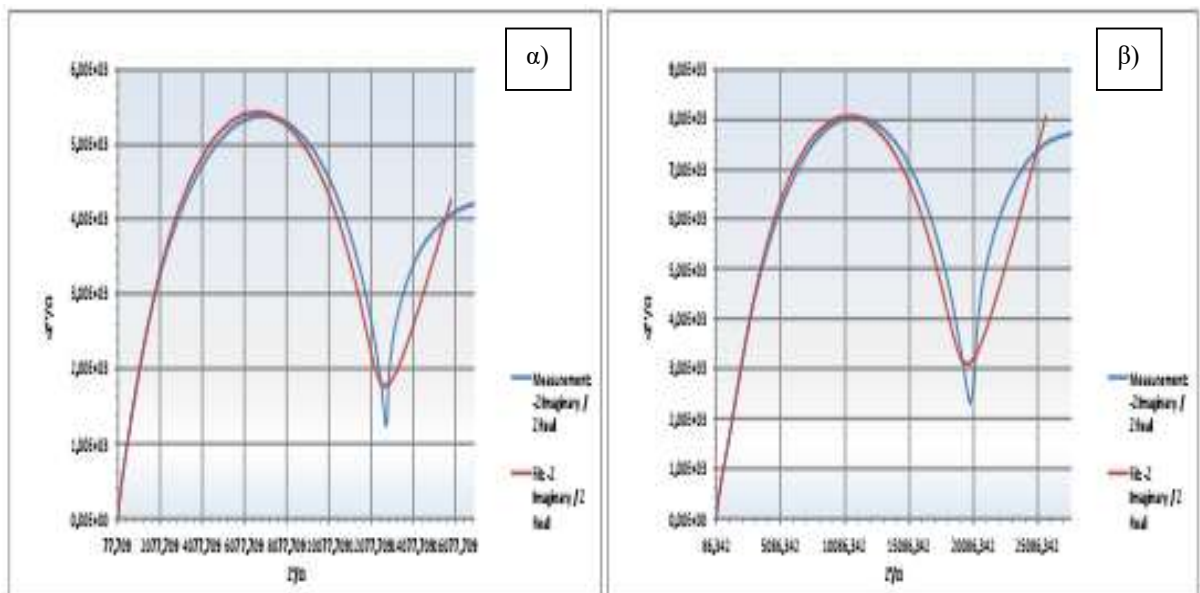
Fixed	Element	Fitted Value	Unit	Error%
True	R 1	77.43	Ω	0.885
True	R 2	1.018E+4	Ω	3.709
True	Q 1	6.591	μF	3.501
True	n 1	0.979	φ	2.018
True	R 3	1470	Ω	22.05
True	W 1	1.056	kΩ	4.449
True	Q 2	15.91	μF	9.386
True	n 2	0.766	φ	1.200

2198_T3_12h

Fixed	Element	Fitted Value	Unit	Error%
True	R 1	83.87	Ω	1.105
True	R 2	1.565E+4	Ω	2.467
True	Q 1	4.308	μF	3.460
True	n 1	0.957	φ	1.706
True	R 3	2168	Ω	13.07
True	W 1	2.010	kΩ	3.749
True	Q 2	8.101	μF	6.751
True	n 2	0.734	φ	1.046

Πίνακας τιμών των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος παραμετρικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 12 ώρες.

Εικόνα 48 : Ισοδύναμα κυκλώματα με τους αντίστοιχους πίνακες των στοιχείων τους, των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 12 ώρες έκθεσης.

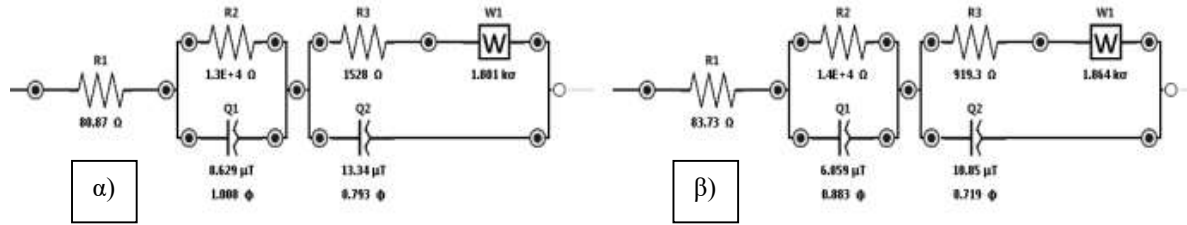


Διάγραμμα Nyquist παραμετρικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 12 ώρες.

Διάγραμμα 9 : Διαγράμματα Nyquist των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 12 ώρες έκθεσης.

6.3.6 Αποτελέσματα ισοδύναμου μοντέλου ΑΑ2198-Τ8 και Τ3 για $t=24h$.

Το ίδιο φαινόμενο της διάβρωσης συνεχίζεται και στις 24 ώρες, με τις αντιστάσεις των κραμάτων αλουμινίου να μειώνονται σταδιακά



Σχήμα : Ισοδύναμο κύκλωμα παραμετρικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) ΑΑ2198-Τ8 και β) ΑΑ2198-Τ3 σε χρόνο έκθεσης 24 ώρες.

2198_T8_24h

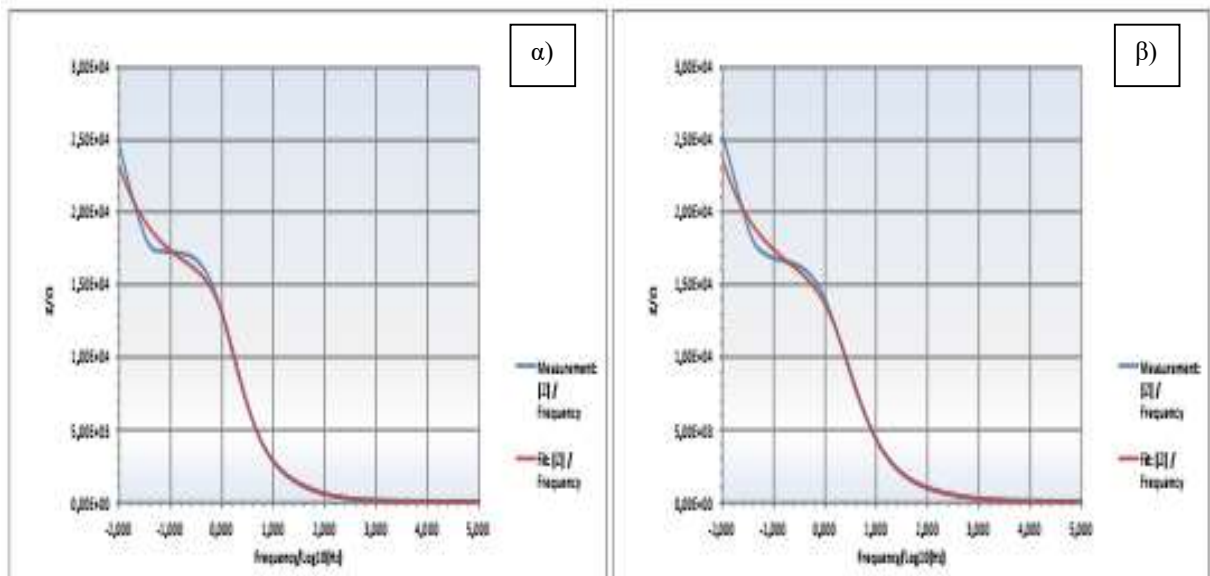
Circuit:	R(RQ)([RW]Q)	Fitted Value	Unit	Error%
Fixed	Element			
True	R 1	80.87	Ω	1.038
True	R 2	1.340E+4	Ω	2.795
True	Q 1	8.629	μT	3.489
True	n 1	1.000	φ	1.922
True	R 3	1528	Ω	15.45
True	W 1	1.801	kΩ	4.743
True	Q 2	13.34	μT	8.216
True	n 2	0.793	φ	1.357

2198_T3_24h

Circuit:	R(RQ)([RW]Q)	Fitted Value	Unit	Error%
Fixed	Element			
True	R 1	83.73	Ω	1.514
True	R 2	1.408E+4	Ω	2.143
True	Q 1	6.859	μT	4.021
True	n 1	0.883	φ	1.741
True	R 3	919.3	Ω	15.58
True	W 1	1.864	kΩ	4.628
True	Q 2	10.85	μT	13.12
True	n 2	0.719	φ	2.174

Πίνακας τιμών των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος παραμετρικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) ΑΑ2198-Τ8 και β) ΑΑ2198-Τ3 σε χρόνο έκθεσης 24 ώρες.

Εικόνα 49 : Ισοδύναμα κυκλώματα με τους αντίστοιχους πίνακες των στοιχείων τους, των κραμάτων αλουμινίου α) ΑΑ2198-Τ8 και β) ΑΑ2198-Τ3 για 24 ώρες έκθεσης.

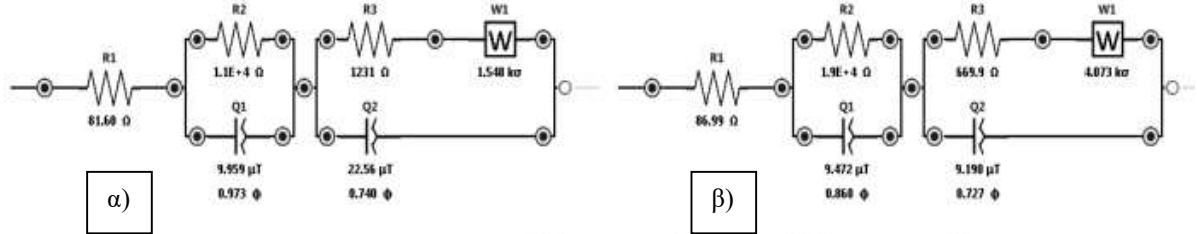


Διάγραμμα Bode παραμετρικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) ΑΑ2198-Τ8 και β) ΑΑ2198-Τ3 σε χρόνο έκθεσης 24 ώρες.

Διάγραμμα 10 : Διαγράμματα Bode των κραμάτων αλουμινίου α) ΑΑ2198-Τ8 και β) ΑΑ2198-Τ3 για 24 ώρες έκθεσης.

6.3.7 Αποτελέσματα ισοδύναμου μοντέλου AA2198-T8 και T3 για t=48h.

Όλο και περισσότερη επιφάνεια της μήτρας του κράματος έρχεται σ' επαφή με το διάλυμα στον μεγαλύτερο χρόνο διάβρωσης (48 ώρες), με την τιμή της αντίστασής της να εξαρτάται κι από την μικροδομή του κράματος.



Σχήμα : Ισοδύναμο κύκλωμα πειραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 48 ώρες.

2198_T8_48h

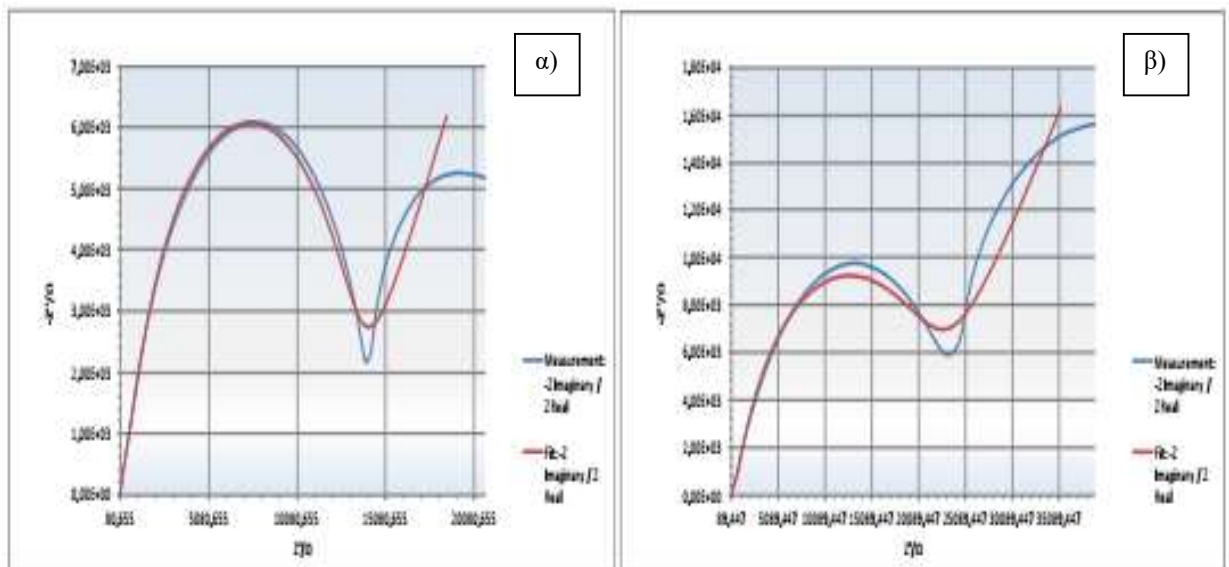
Fixed	Element	Fitted Value	Unit	Error%
True	R 1	81.60	Ω	1.018
True	R 2	1.133E+4	Ω	3.041
True	Q 1	9.959	μT	3.262
True	n 1	0.973	φ	1.951
True	R 3	1231	Ω	20.84
True	W 1	1.548	κσ	4.363
True	Q 2	22.56	μT	9.539
True	n 2	0.740	φ	1.606

2198_T3_48h

Fixed	Element	Fitted Value	Unit	Error%
True	R 1	86.99	Ω	1.568
True	R 2	1.893E+4	Ω	2.125
True	Q 1	9.472	μT	3.300
True	n 1	0.868	φ	1.359
True	R 3	669.9	Ω	13.33
True	W 1	4.073	κσ	3.590
True	Q 2	9.190	μT	17.37
True	n 2	0.727	φ	2.635

Πίνακας τιμών των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος πειραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 48 ώρες.

Εικόνα 50 : Ισοδύναμα κυκλώματα με τους αντίστοιχους πίνακες των στοιχείων τους, των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 48 ώρες έκθεσης.

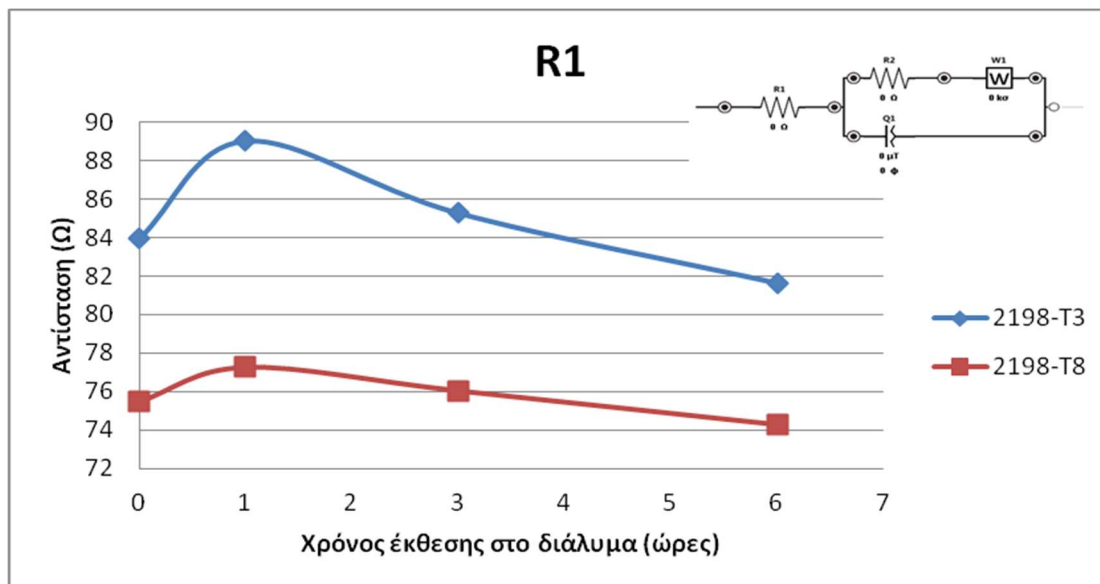


Διάγραμμα Nyquist πειραματικών δοκιμών (EIS) των δοκιμών α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 σε χρόνο έκθεσης 48 ώρες.

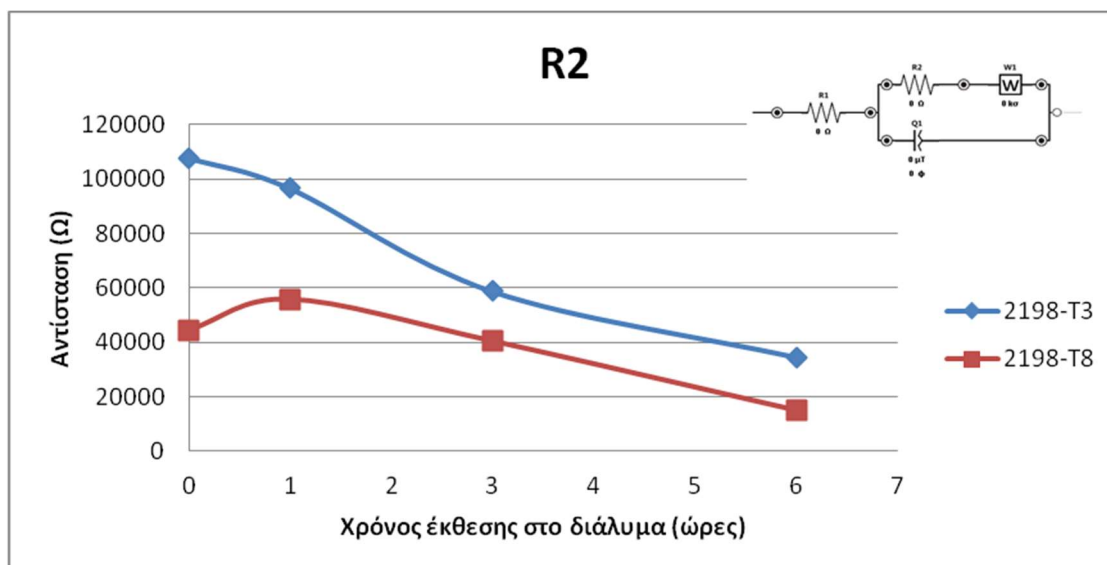
Διάγραμμα 11 : Διαγράμματα Nyquist των κραμάτων αλουμινίου α) AA2198-T8 και β) AA2198-T3 για 48 ώρες έκθεσης.

Παρατηρείται ότι οι καμπύλες των ισοδύναμων κυκλωμάτων ταιριάζουν αρκετά με τις πειραματικές μετρήσεις, πράγμα που υποδηλώνει ότι τα ισοδύναμα κυκλώματα που επιλέχθηκαν αντιπροσωπεύουν σε μεγάλο βαθμό τον μηχανισμό διάβρωσης των AA2198-T8 και AA2198-T3 σε 3,5% NaCl.

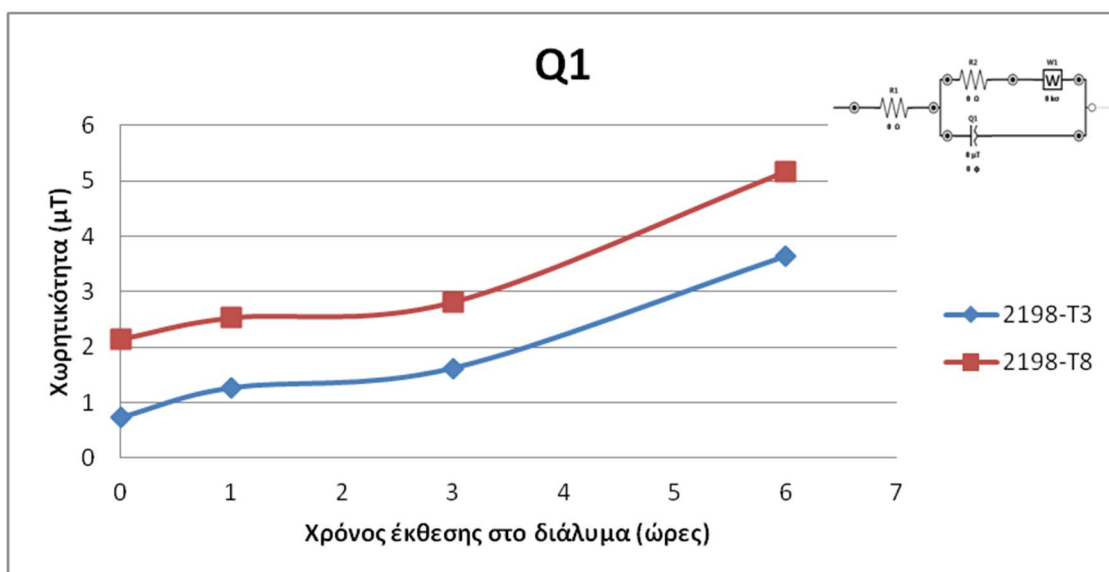
Παρακάτω παρουσιάζεται διαγραμματικά η εξέλιξη των παραμέτρων των ισοδύναμων μοντέλων με τον αυξανόμενο χρόνο διάβρωσης για τα δύο υλικά που μελετήθηκαν και πραγματοποιείται η σύγκρισή τους.



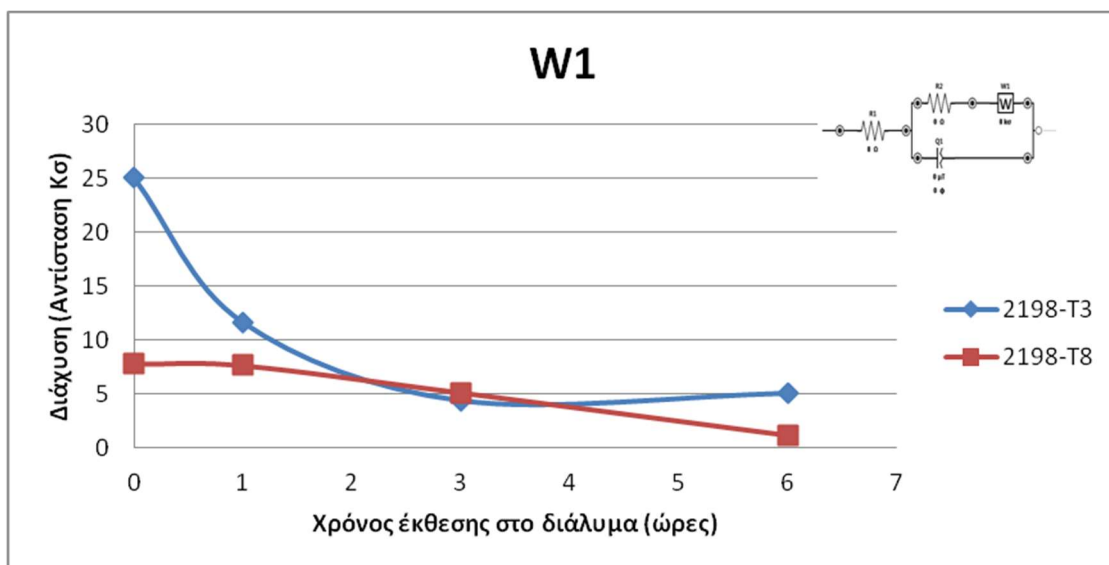
Διάγραμμα 12 : Καμπύλες των αντιστάσεων R1 (διαλύματος) για 0-6 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.



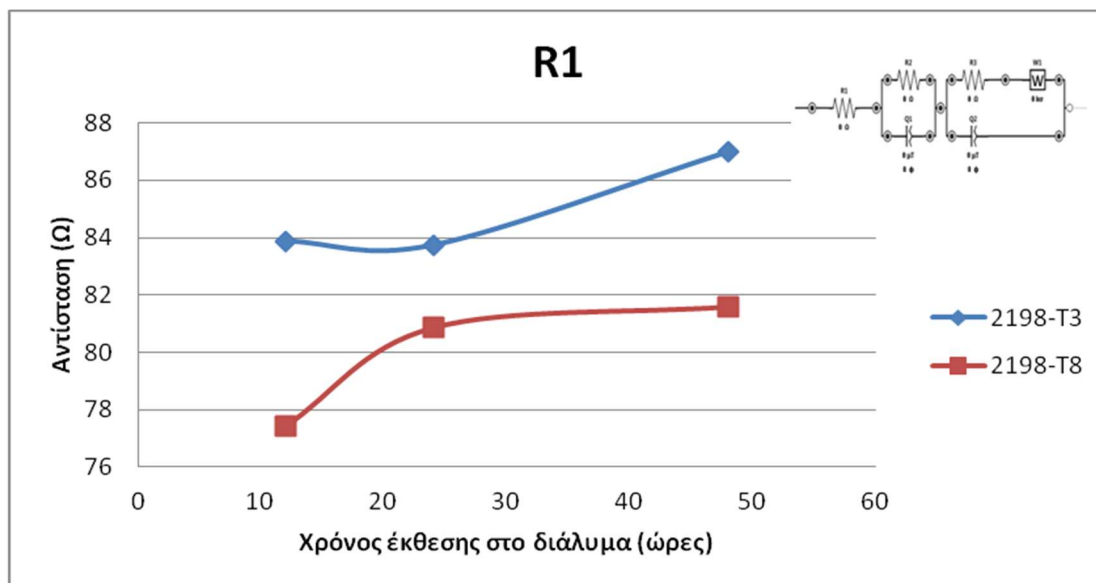
Διάγραμμα 13 : Καμπύλες των αντιστάσεων R2 (προστατευτικού φιλμ) για 0-6 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.



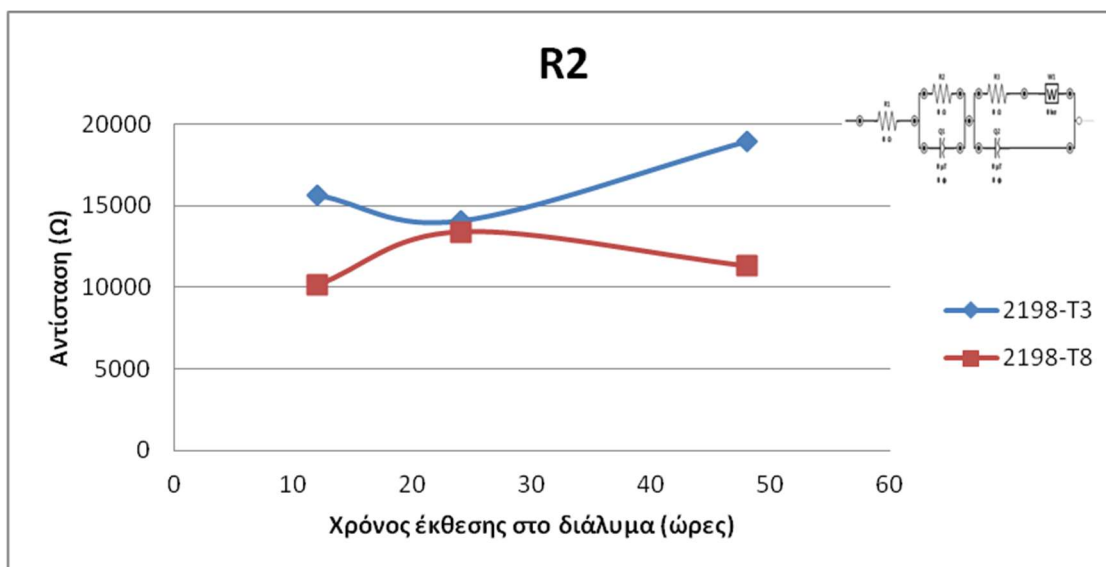
Διάγραμμα 14 : Καμπύλες των στοιχείων Q1 (CPE, προστατευτικού φιλμ) για 0-6 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.



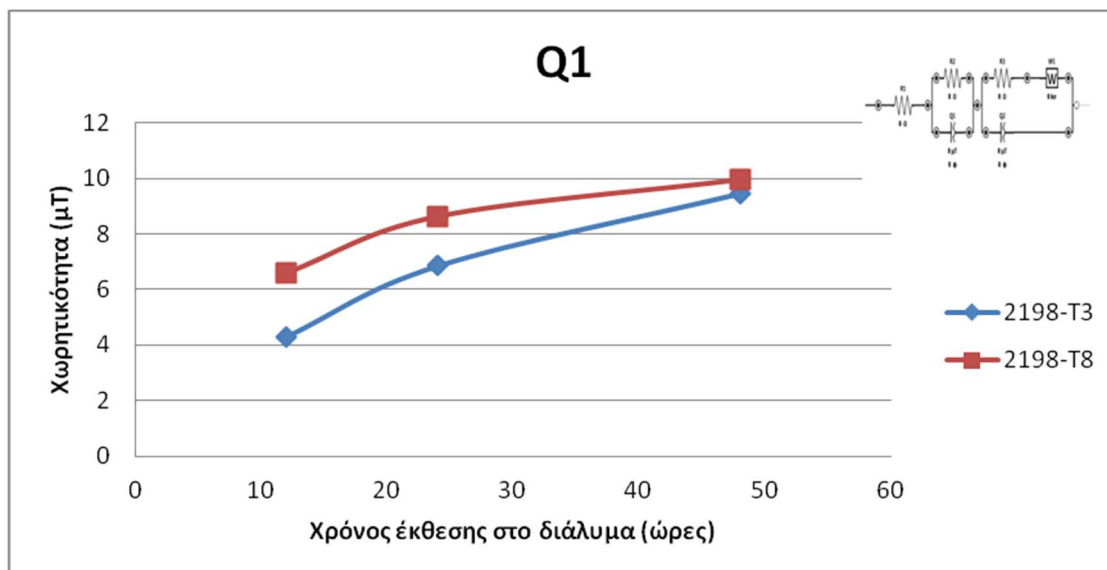
Διάγραμμα 15 : Καμπύλες των στοιχείων W1 (αντίσταση διάχυσης) για 0-6 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.



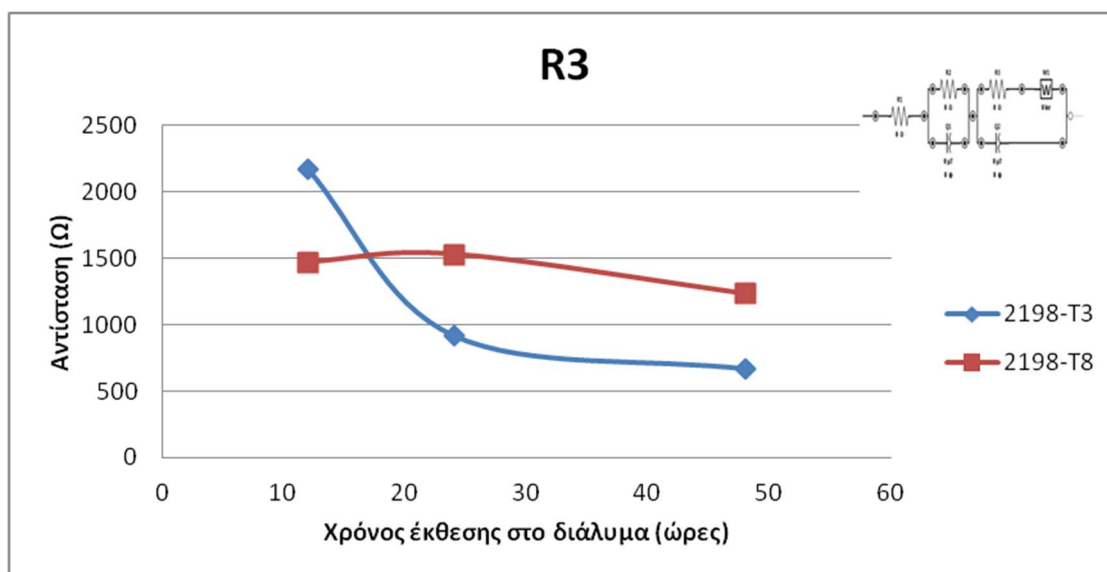
Διάγραμμα 16 : Καμπύλες των αντιστάσεων R1 (διαλύματος) για 12-48 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.



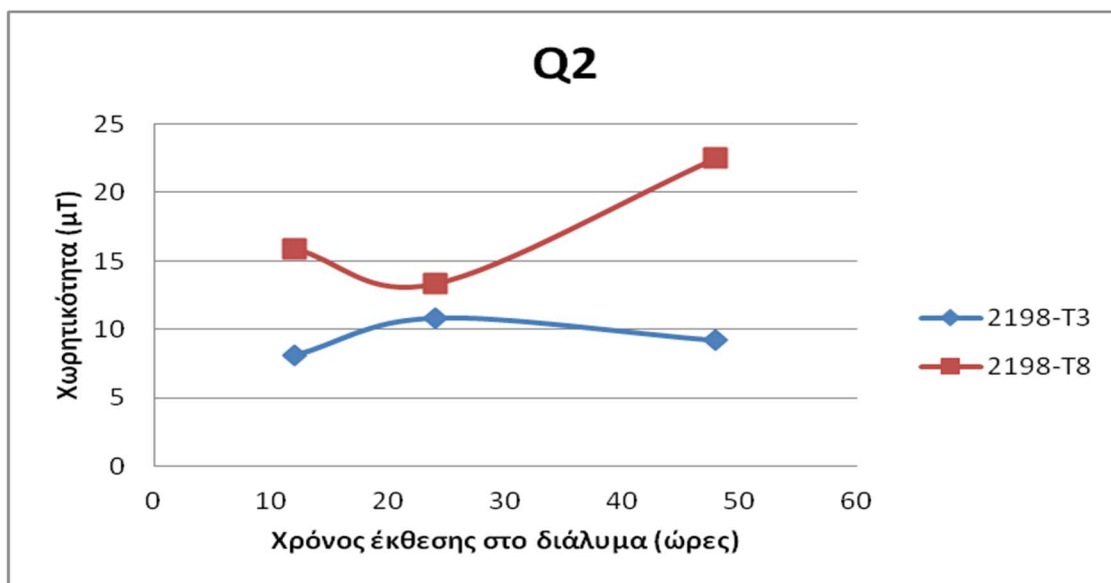
Διάγραμμα 17 : Καμπύλες των αντιστάσεων R2 (προστατευτικού φιλμ) για 12-48 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.



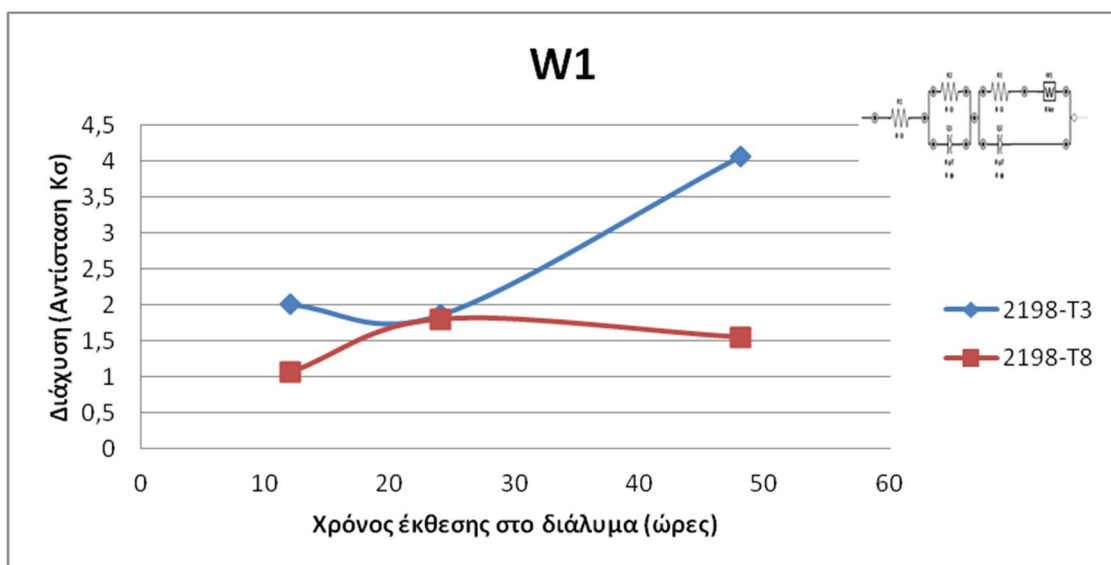
Διάγραμμα 18 : Καμπύλες των στοιχείων Q1 (CPE, προστατευτικού φίλμ) για 12-48 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.



Διάγραμμα 19 : Καμπύλες των αντιστάσεων R3 (μεταφοράς φορτίου) για 12-48 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.



Διάγραμμα 20 : Καμπύλες των στοιχείων Q2 (CPE, μεταφοράς φορτίου) για 12-48 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.

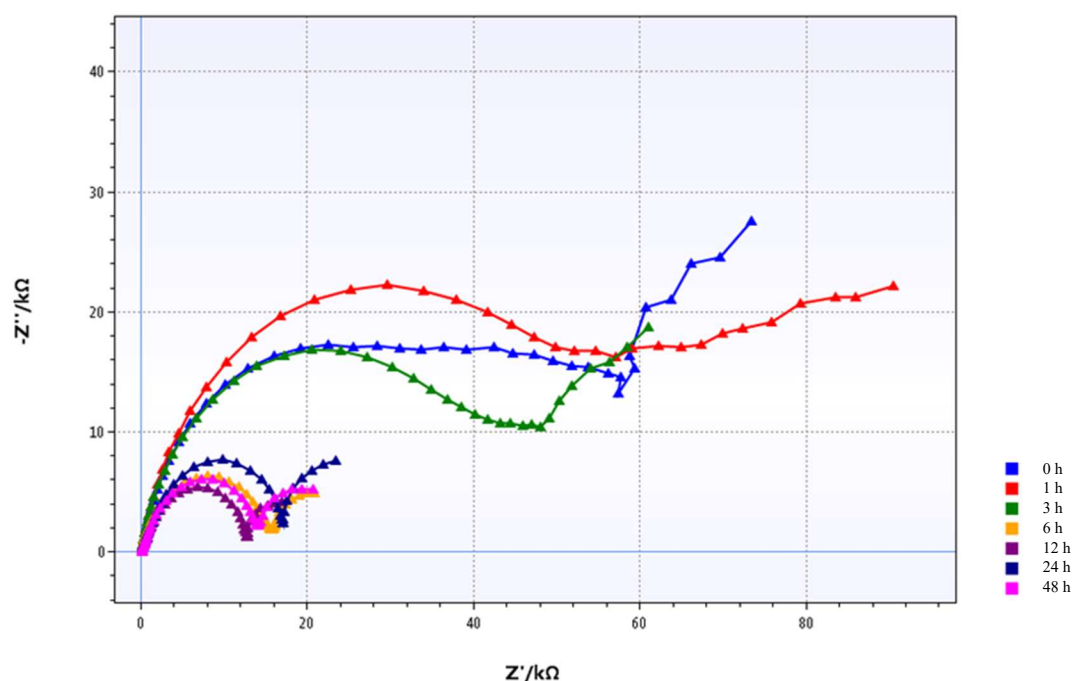


Διάγραμμα 21 : Καμπύλες των στοιχείων W1 (αντίσταση διάχυσης) για 12-48 ώρες στην έκθεση διάβρωσης των δοκιμίων AA2198-T3 και AA2198-T8.

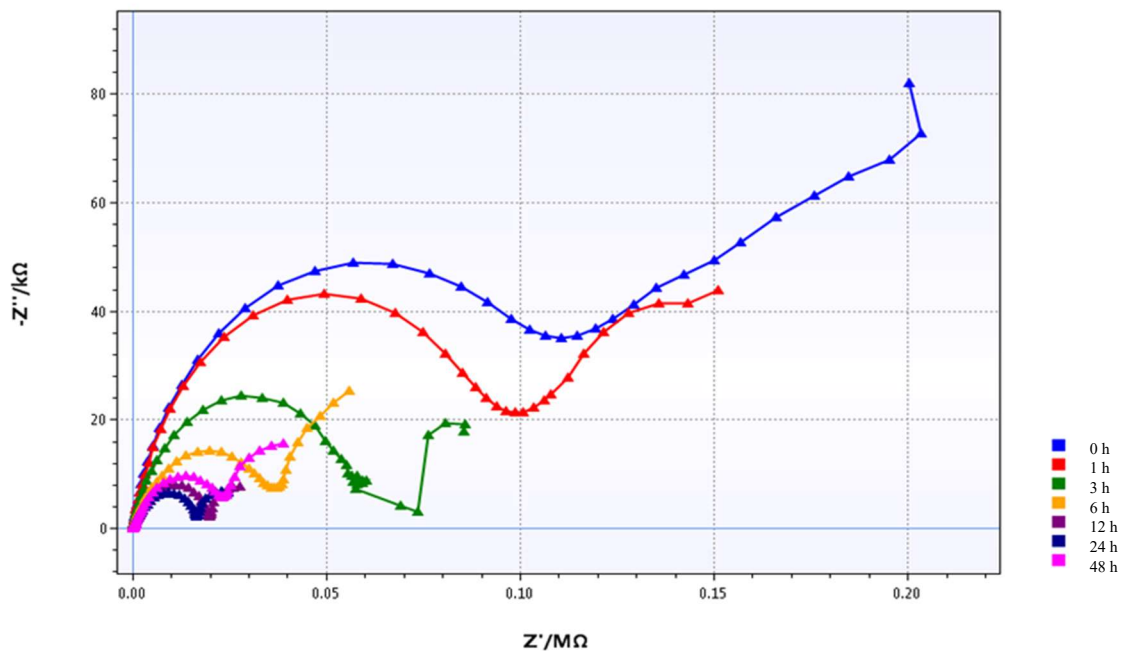
6.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

Όπως αναφέρθηκε από τα διαγράμματα Nyquist και Bode των αντίστοιχων δοκιμών AA2198-T8 και AA2198-T3 κατασκευάζονται τα ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, μοντελοποιώντας το φαινόμενο της διάβρωσης. Συγκρίνοντας τις καμπύλες επιβεβαιώνεται η σωστή επιλογή του ισοδύναμου κυκλώματος.

Δύο καθαροί χωρητικοί βρόχοι (ημικυκλικές καμπύλες) είναι εμφανείς για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα, στα διαγράμματα Nyquist, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του AA2198-T8 παρακάτω, και των δύο κραμάτων αλουμινίου. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία οι δύο καμπύλες αντιπροσωπεύουν τα δύο μέρη της επιφάνειας του κράματος, με την καμπύλη στις υψηλές συχνότητες (HF) (πλήρες ημικύκλιο) να αντιστοιχεί στην επίπεδη παθητική μεμβράνη (στρώμα οξειδίου), ενώ η καμπύλη των χαμηλών συχνοτήτων (LF) (1/4 του τόξου) σχετίζεται με τα εντοπισμένα σημεία διάβρωσης (pits, περικρυσταλλική ή διάβρωση αποφλοιώσης), καταλήγοντας στην διαδικασία της διάχυσης που αντιπροσωπεύει τις ενέργειες κοντά στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. [25][26] Ο χωρητικός βρόχος του τέταρτου του τόξου εξελίσσεται σε μια διαδικασία ελεγχόμενη με διάχυση και αντιπροσωπεύει τις ενέργειες διάχυσης κοντά στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου.



Διάγραμμα 22 : Διάγραμμα Nyquist του κράματος AA2198-T8 για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα NaCl 3,5%.



Διάγραμμα 23 : Διάγραμμα Nyquist του κράματος AA2198-T3 για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα NaCl 3,5%.

Είναι προφανές από τα διαγράμματα Nyquist (22 και 23) ότι το μέτρο της σύνθετης αντίστασης (ακτίνα της ημικυκλικής καμπύλης) του AA2198-T3 είναι υψηλότερο από το αντίστοιχο του AA2198-T8 καθ' όλη την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, υποδεικνύοντας ότι το κράμα αλουμινίου AA2198 σε κατάσταση T3 είναι πιο ανθεκτικό στην διάβρωση. Μία διαφορετική τάση στη μείωση της αντίστασης παρατηρείται για τις δύο διαφορετικές καταστάσεις του υλικού. Για παράδειγμα, έως και τις 3 ώρες έκθεσης σε διάβρωση του υλικού στην κατάσταση του T3, παρατηρείται ξαφνική πτώση του μέτρου της σύνθετης αντίστασης και έπειτα μια συνεχής μείωση με την αύξηση του χρόνου εμβάπτισης. Ωστόσο, καμία σημαντική μείωση δεν εμφανίζεται στο μέτρο της σύνθετης αντίστασης της κατάστασης T8 μέχρι και τις 3 ώρες διάβρωσης. Αντίστοιχη ξαφνική μείωση της αντίστασης παρατηρείται μετά τις 6 ώρες εμβάπτισης για την κατάσταση T8 με το φαινόμενο να ομαλοποιείται για τις μεγαλύτερες ώρες έκθεσης, χωρίς περαιτέρω σημαντική μείωση της αντίστασης. Συνολικά παρατηρήθηκε ότι το μέτρο της σύνθετης αντίστασης μειώθηκε με τον αυξανόμενο χρόνο εμβάπτισης και για τις δύο καταστάσεις (T8 και T3).

Τα παραπάνω δεδομένα δείχνουν την ύπαρξη δύο χρονικών σταθερών έως και τις 6 ώρες εμβάπτισης και για τις δύο καταστάσεις (T8 και T3) – καταναμημένα στις μεσαίες συχνότητες ($10^1 - 10^3$) και στις χαμηλές συχνότητες ($10^{-2} - 10^{-1}$), ενώ μία νέα σταθερά χρόνου φαίνεται να εμφανίζεται μετά τις 12 ώρες εμβάπτισης στο T3 και μετά από 24 ώρες εμβάπτισης για το T8. Οι σταθερές χρόνου στις μεσαίες συχνότητες σχετίζονται με την διαδικασία μεταφοράς φορτίου, η οποία συνδέεται με την φόρτιση

του διπλού στρώματος, ενώ οι σταθερές χρόνου χαμηλών συχνοτήτων συνδέονται με την διαδικασία της διάχυσης. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, όταν η αντίσταση που σχετίζεται με την διάχυση γίνει πολύ μεγάλη, το στοιχείο $R//Q$ (σταθερά χρόνου) μπορεί να αντικατασταθεί από ένα απλό Q (CPE στοιχείο σταθερής φάσης) με την τιμή “ n ” του εκθέτη ίση με 0,5, το οποίο σε ιδανική κατάσταση αντιπροσωπεύεται από ένα στοιχείο Warburg, όπως φαίνεται και στην παρούσα έρευνα. [27]

Παρακάτω δίνεται ο πίνακας με τις συγκεντρωτικές τιμές των στοιχείων των κυκλωμάτων για την καλύτερη κατανόηση του φυσικού υπόβαθρου των μετρήσεων καθώς και της προσομοίωσης με το αντίστοιχο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα.

Ο πίνακας 10 δείχνει την εξέλιξη των τιμών $R//Q$ με τον αυξανόμενο χρόνο έκθεσης στο διάλυμα. Είναι προφανές ότι το $Q1$ αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου διάβρωσης και για τις δύο καταστάσεις. Αυτό αποδίδεται στον σχηματισμό νέων ενεργών θέσεων στις επιφάνειες των δοκιμίων, π.χ. κοιλότητες (pits) ως αποτέλεσμα της διάλυσης / αποκόλλησης των ενδομεταλλικών σωματιδίων (IMC) λόγω του σχηματισμού ενός γαλβανικού κελιού μεταξύ αυτών και της μήτρας, οι οποίες αυξάνουν την περιοχή έκθεσης στο διάλυμα. Το AA2198-T3 παρουσίασε χαμηλότερες τιμές του $Q1$ σε όλη την περίοδο δοκιμών, υποδεικνύοντας την παρουσία παχύτερου προστατευτικού φιλμ στην επιφάνεια από ότι το T8. Η αύξηση του $Q1$ συνοδεύτηκε από μείωση του $R2$ και για τα δύο κράματα και οι χαμηλότερες τιμές $Q1$ του T3 συνοδεύτηκαν από υψηλότερες τιμές του $R2$ σε σχέση με το T8. Οι χαμηλότερες τιμές του $R2$ της κατάστασης T8 μπορούν να αποδοθούν στην υψηλότερη ποσότητα σωματιδίων της φάσης $T1$ σε σύγκριση με το T3. Οι υψηλότερες αυτές ποσότητες στο τεχνητά γηρασμένο κράμα T8 οδήγησαν επίσης σε αυξημένες διαβρωμένες περιοχές λόγω της αφαίρεσης της παθητικής μεμβράνης. Παρά το γεγονός ότι η κατάσταση T3 έδειξε υψηλότερες τιμές αντίστασης στο προστατευτικό φιλμ οξειδίου ($R2$) σε σύγκριση με το T8 για όλη την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, παρατηρήθηκε χαμηλότερος ρυθμός μείωσης της αντίστασης για το T8, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 12. Μία αρχική μικρή αύξηση στην τιμή του $R2$ για το υλικό σε κατάσταση T8 υποδεικνύει μία αρχική μείωση της επιφανειακής δραστηριότητας που μπορεί να οφείλεται στην μερική κάλυψη των ενεργών περιοχών.

Όσον αφορά την εξέλιξη του ζεύγους $R3//Q2$, (βλ. πίνακα 10), που αντιπροσωπεύει τις αντιδράσεις μεταφοράς φορτίου στην διεπιφάνεια της μήτρας του υλικού στις ελαττωματικές θέσεις του προστατευτικού φιλμ με το διάλυμα, παρατηρείται ότι η $R3$ της κατάστασης T8 – αυξομειώνεται με τον αυξανόμενο χρόνο εμβάπτισης λόγω της αποκόλλησης και της πυρήνωσης των ενδομεταλλικών φάσεων / σωματιδίων (IMCs). Αντίστοιχα το $Q2$ παρέμεινε σχεδόν σταθερό από 12 έως 24 ώρες, αποκαλύπτοντας ότι η ηλεκτροχημική ενεργή επιφάνεια παρέμεινε σχεδόν αμετάβλητη. Ωστόσο μία μικρή αύξηση στο $Q2$ μετά από 48 ώρες εμβάπτισης μπορεί να αποδοθεί στο σχηματισμό νέων ενεργών θέσεων. Το αντίστροφο συμβαίνει με το T3, όπου το $R3$ μειώνεται συνεχώς λόγω του εμπλουτισμού των εναπομεινάντων ενεργών IMC με τα πιο ευγενή συστατικά (π.χ. χαλκός - Cu), τα οποία παρόλο που βρίσκονται σε

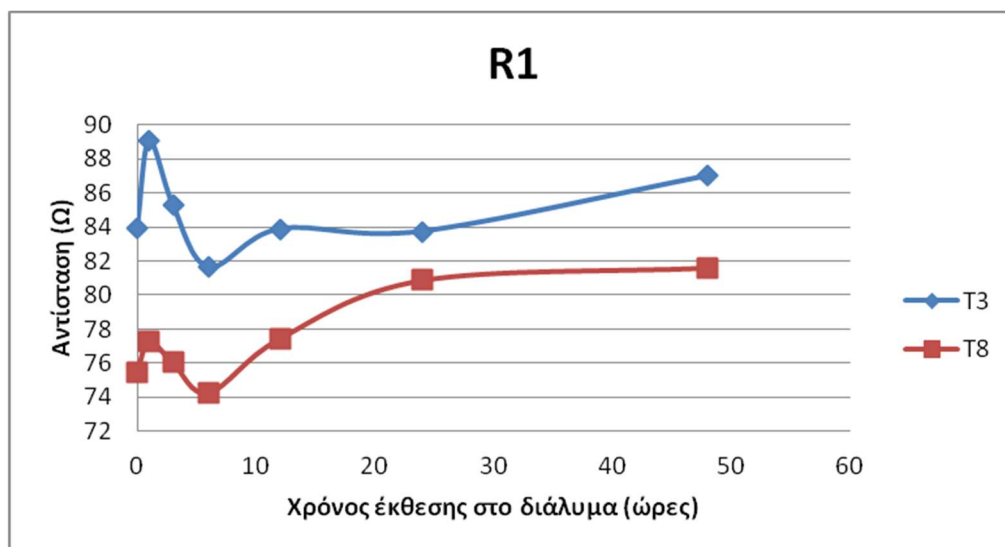
χαμηλότερη πυκνότητα οδηγούν σε ενίσχυση της γαλβανικής δραστηριότητας μεταξύ της μήτρας και των ενδομεταλλικών φάσεων. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε για το Q2 στο T3, όπου η αύξηση του με την εξέλιξη της διάβρωσης δείχνει ότι οι ηλεκτροχημικά ενεργές θέσεις αυξήθηκαν. [29]

Ο χαμηλότερος ρυθμός μείωσης των δύο αντιστάσεων (R2 και R3) που παρατηρήθηκε στην κατάσταση T8 μπορεί να οφείλεται στην ενδοκρυσταλλική διάβρωση που είναι η κύρια μορφή διάβρωσης σ αυτήν την κατάσταση. [28]

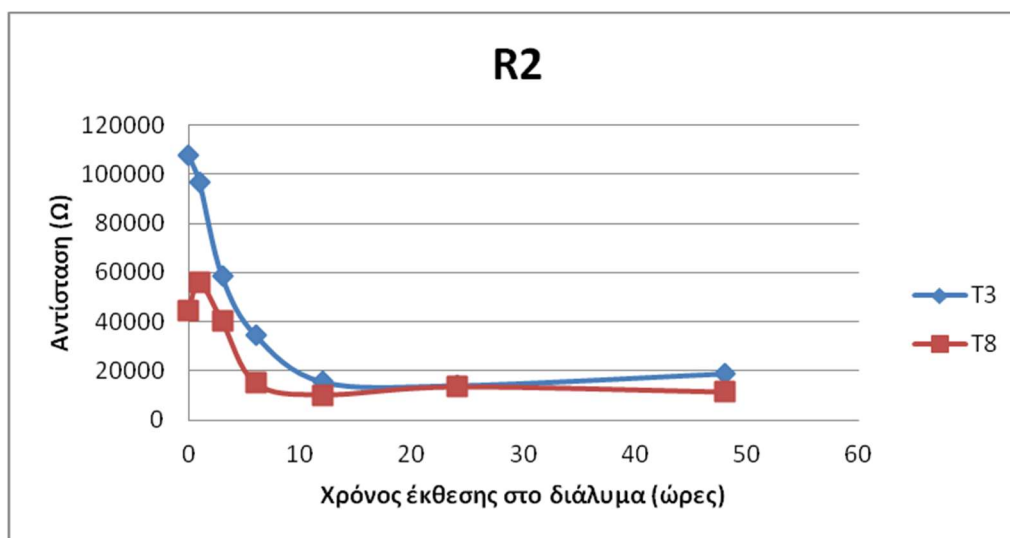
AA2198-T8 / AA2198-T3								
	T	0 h	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	48 h
R1 (Ω)	T8	75,46	77,26	76,03	74,25	77,43	80,87	81,60
	T3	83,94	89,04	85,28	81,63	83,87	83,73	86,99
R2 (Ω)	T8	44490	55730	40380	15000	10180	13400	11330
	T3	107800	96610	58770	34600	15650	14080	18930
Q1 (Μτ)	T8	2,149	2,534	2,817	5,163	6,591	8,629	9,959
	T3	0,733	1,266	1,621	3,635	4,308	6,859	9,472
n1 (φ°)	T8	0,853	0,850	0,869	0,846	0,979	1,00	0,973
	T3	0,894	0,870	0,836	0,783	0,957	0,883	0,868
R3 (Ω)	T8					1470	1528	1231
	T3					2168	919,3	669,9
W1 (Κσ)	T8	7,807	7,658	5,148	1,216	1,056	1,801	1,548
	T3	25,12	11,64	4,368	5,062	2,010	1,864	4,073
Q2 (Μτ)	T8					15,91	13,34	22,56
	T3					8,101	10,85	9,190
n2 (φ°)	T8					0,766	0,793	0,740
	T3					0,734	0,719	0,727
Error (%)	T8	1,821	1,787	0,779	1,575	5,900	4,876	5,702
	T3	1,400	2,102	3,689	2,141	4,169	5,615	5,660

Πίνακας 10 : Πίνακας τιμών των αντίστοιχων στοιχείων των ισοδύναμων κυκλωμάτων για τα κράματα αλουμινίου AA2198-T8 και AA2198-T3 σε κάθε ώρα έκθεσης στο διάλυμα NaCl.

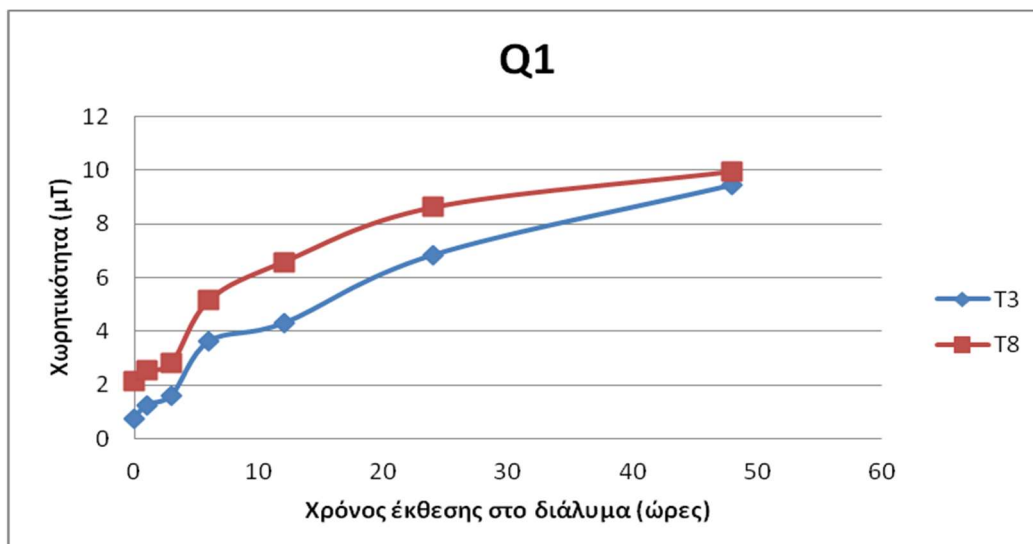
Συγκεντρωτικά, για όλους τους χρόνους έκθεσης, παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μεταβολής των στοιχείων του κυκλώματος με τον αυξανόμενο χρόνο διάβρωσης όπως προκύπτουν από τις τιμές του πίνακα 10, συγκριτικά για τα δύο υλικά :



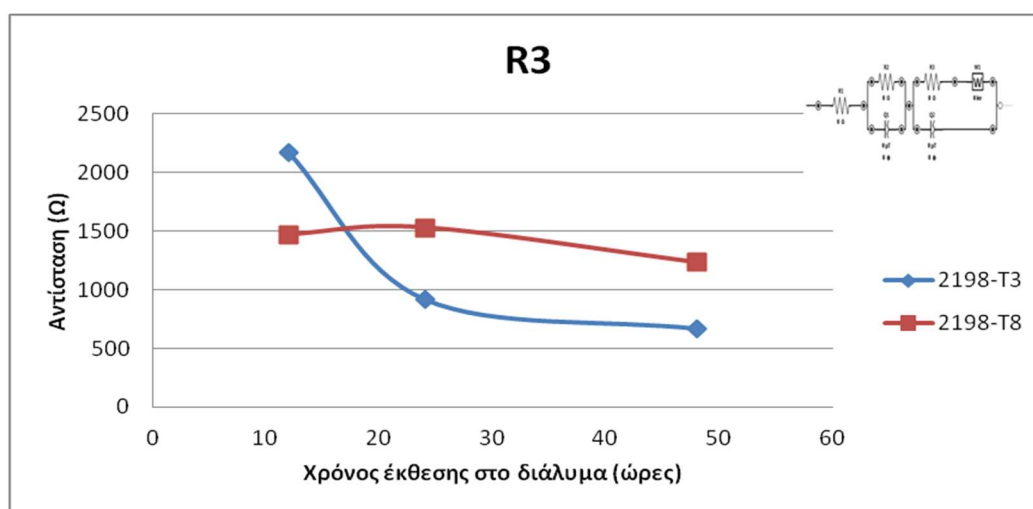
Διάγραμμα 24 : Καμπύλες των αντιστάσεων R1 (διάλυματος) για 0-48 ώρες έκθεσης σε διάλυμα.



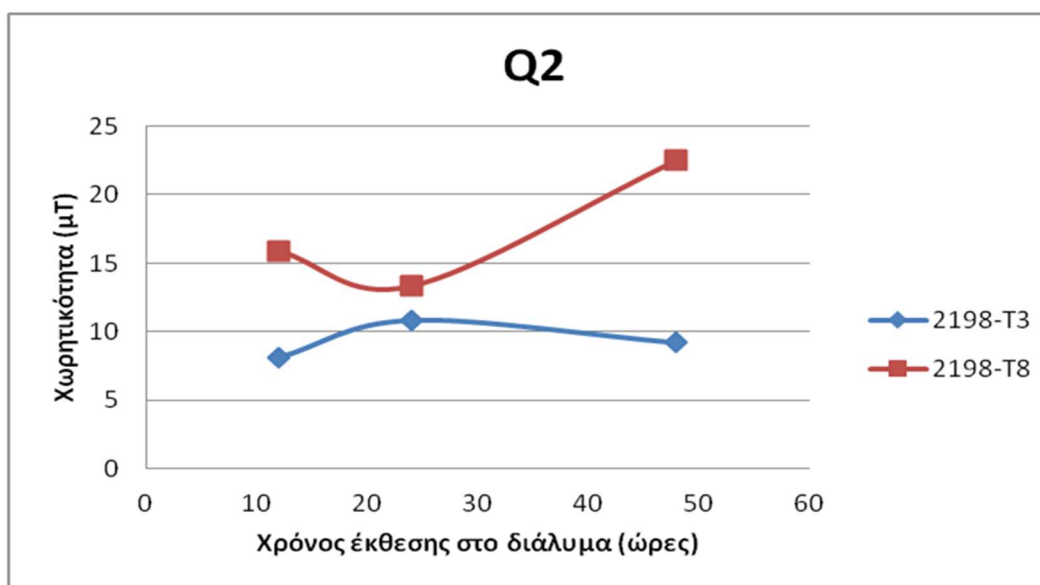
Διάγραμμα 25 : Καμπύλες των αντιστάσεων R2 (προστατευτικού φιλμ) για 0-48 ώρες έκθεσης σε διάλυμα.



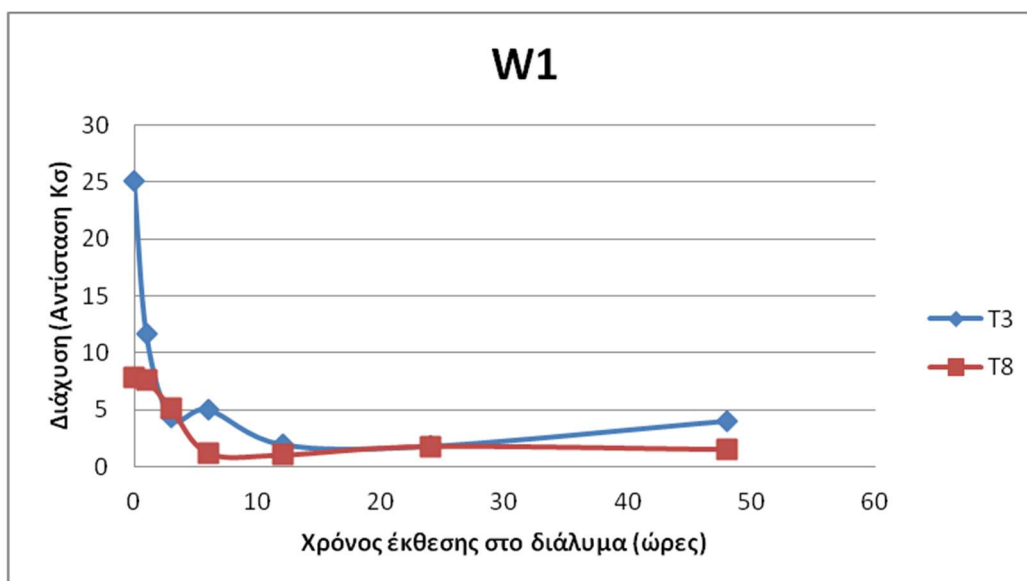
Διάγραμμα 26 : Καμπύλες των στοιχείων Q1 (CPE, προστατευτικού φιλμ) για 0-48 ώρες έκθεσης σε διάλυμα.



Διάγραμμα 27 : Καμπύλες των αντιστάσεων R3 (μεταφοράς φορτίου) για 12-48 ώρες έκθεσης σε διάλυμα.



Διάγραμμα 28 : Καμπύλες των στοιχείων Q2 (CPE, μεταφοράς φορτίου) για 12-48 ώρες έκθεσης σε διάλυμα.

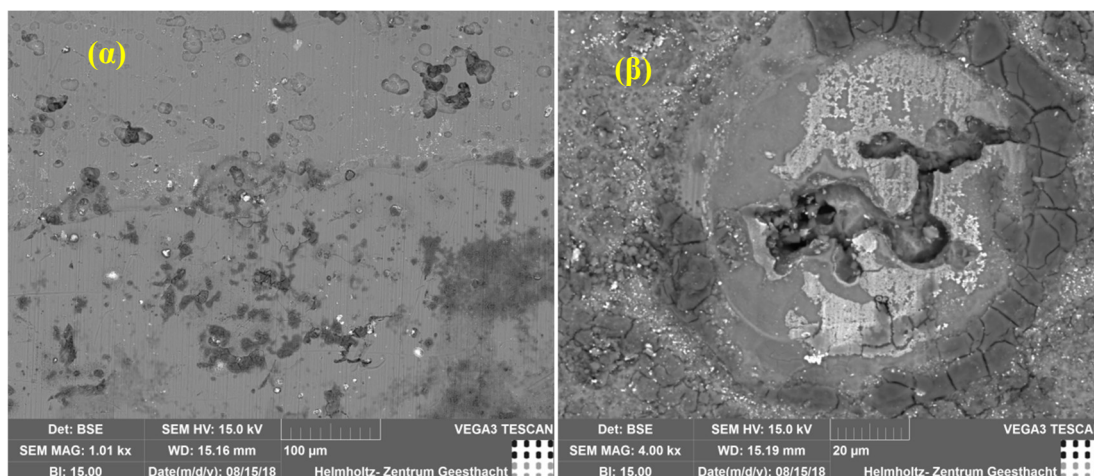


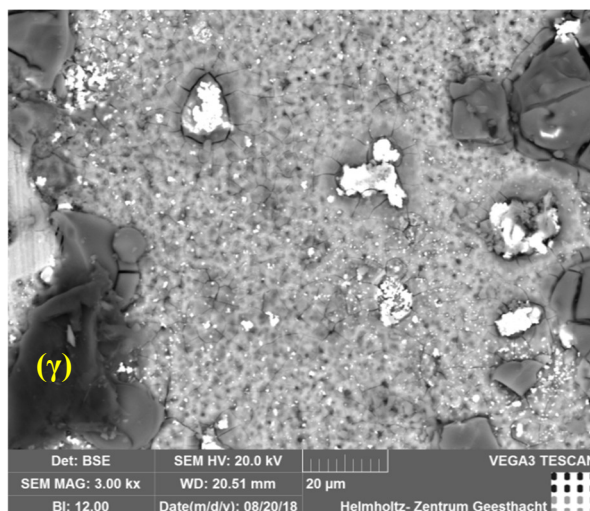
Διάγραμμα 29 : Καμπύλες των στοιχείων W1 (αντίσταση διάχυσης) για 0-48 ώρες έκθεσης σε διάλυμα.

Η μορφολογία της διάβρωσης και οι τιμές των αντιστάσεων μας δείχνουν ότι η αντοχή του κράματος έναντι της διάβρωσης εξαρτάται από το φιλμ και την μικροδομή της μήτρας του υλικού.

6.5 Επιφάνειες διαβρωμένων δοκιμίων.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται μικροφωτογραφίες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης των επιφανειών των δοκιμίων που εκτέθηκαν σε διάλυμα 3,5 % NaCl για 48h.





Εικόνα 51 : Μικροφωτογραφίες δοκιμίων AA2198-T8 σε διάλυμα 3,5 NaCl για 48h.

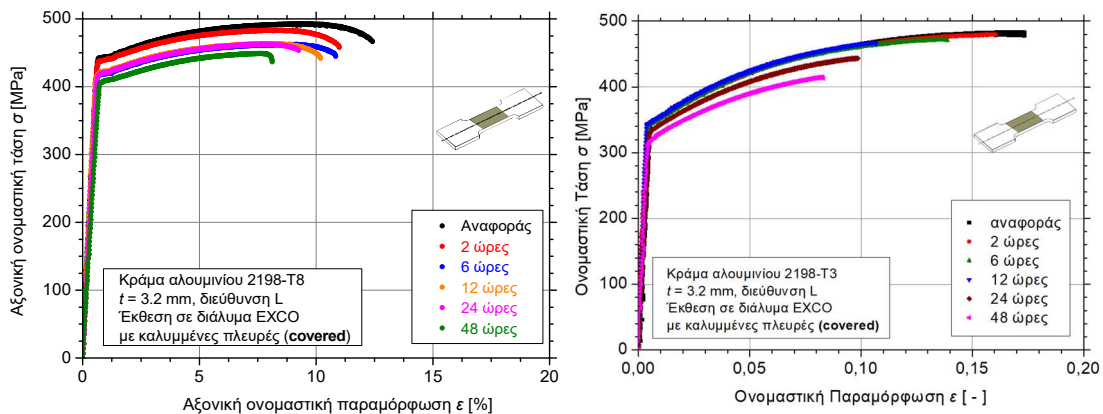
- Ένα στρώμα διάβρωσης με την παρουσία μικρο-ρωγμών είναι εμφανές τόσο στη μήτρα του υλικού όσο και κοντά στις ενδομεταλλικές φάσεις IMCs (πλούσια σε Cu).
- Εντοπισμένη διάβρωση κοντά στις ενδομεταλλικές φάσεις IMCs, στην εικόνα (α).
- Η αποφλοίωση του προϊόντος διάβρωσης είναι εμφανής στην εικόνα (β) που πιθανώς οφείλεται στην διάσπαση του στρώματος διάβρωσης. Παρατηρείται μια περιοχή της μήτρας σκοτεινή και επίπεδη.
- Η δημιουργία κενών (εγκοπών) περιμετρικά των ενδομεταλλικών φάσεων IMCs παρατηρείται στην εικόνα (γ) λόγω του εμπλουτισμού τους με Cu και της επακόλουθης διάβρωσης της μήτρας του αλουμινίου.

6.6 Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών.

Στην παρούσα ενότητα τα κράματα αλουμινίου AA2198-T8 και AA2198-T3 δοκιμάστηκαν σε μηχανική καταπόνηση (εφελκυσμό), αφού είχαν υποστεί διάβρωση σε επιταχυνόμενο μέσο (διάλυμα) EXCO. Το συγκεκριμένο διάλυμα διάβρωσης επιλέχθηκε για εξοικονόμηση χρόνου. Στη συνέχεια η πειραματική διαδικασία επαναλήφθηκε για τα κράματα αλουμινίου AA2198-T8 και AA2024-T3 αφού είχαν κι αυτά διαβρωθεί σε διάλυμα 3,5% NaCl. Η επιλογή του κράματος αλουμινίου AA2024-T3 έγινε διότι είναι το πλέον διαδεδομένο υλικό κατασκευής των αεροπλάνων και το οποίο τείνει να αντικατασταθεί από το κράμα αλουμινίου AA2198-T8.

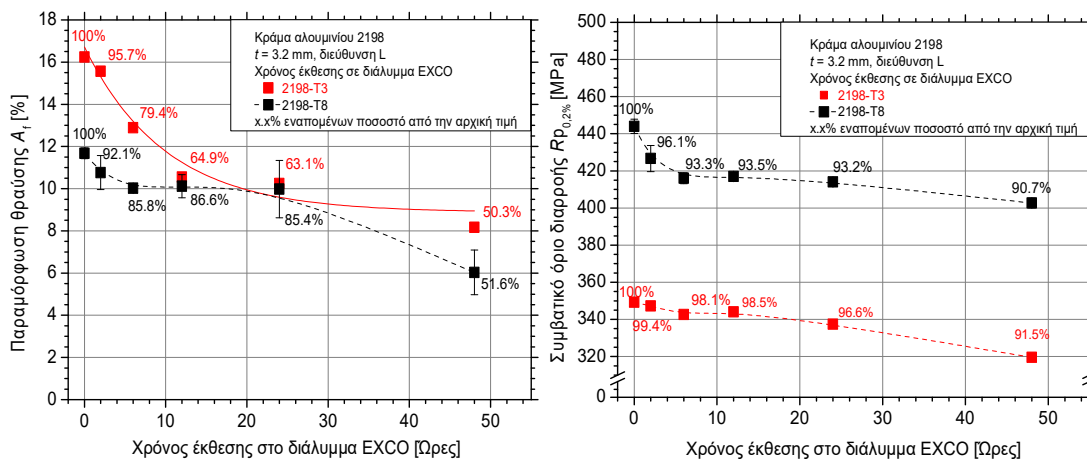
6.6.1 Σύγκριση της υποβάθμισης λόγω διάβρωσης AA2198-T8 με AA2198-T3.

Αφού διαβρώθηκαν τα υλικά σε διάλυμα EXCO (χρησιμοποιήθηκε EXCO σε απλή εμφύσηση για να επιταχυνθεί η διαδικασία λόγω έλλειψης χρόνου) στις αντίστοιχες ώρες υπεβλήθησαν σε μηχανική καταπόνηση εφελκυσμού και με τα δεδομένα που ελήφθησαν δημιουργήθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα :



Διάγραμμα 30 : Τυπικές πειραματικές καμπύλες εφελκυσμού των προδιαβρωμένων δοκιμών (α) AA2198-T8 και (β) AA2198-T3 για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης σε διάλυμα EXCO.

Παρατηρώντας το Διάγραμμα 30, το κράμα αλουμινίου AA2198-T8 παρουσιάζει μία μείωση της τάσης από τους πρώτους χρόνους διάβρωσης, ενώ αντίθετα για το AA2198-T3 η μείωση της τάσης εμφανίζεται μετά τις 6 ώρες έκθεσης στο διάλυμα. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο για την παραμόρφωση στο όριο θραύσης όπου το κράμα AA2198-T8 διατηρεί τις ιδιότητες του σε σημαντικό βαθμό, όχι όμως το κράμα AA2198-T3 όπου παρατηρείτε σταδιακή μείωση με σημαντικότερη αυτή στο χρονικό διάστημα μεταξύ 6 και 12 ωρών όπου πιθανόν η διάβρωση εισέρχεται στο εσωτερικό του κράματος.



Διάγραμμα 31 : Υποβάθμιση (α) του συμβατικού ορίου διαρροής των προδιαβρωμένων δειγμάτων του κράματος αλουμινίου 2198-T8 σε σύγκριση με το 2198-T3 που εκτέθηκαν για διαφορετικούς χρόνους σε διάλυμα EXCO.

Από το Διάγραμμα 32 (α) παρατηρείτε ότι στους μικρούς χρόνους, έως και 24 ώρες, το ποσοστό παραμόρφωσης του AA2198-T8 είναι υψηλότερο από το ποσοστό του AA2198-T3, διατηρώντας σε υψηλό ποσοστό την ολκιμότητά του στο 85%. Στους μεγάλους χρόνους συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο με το AA2198-T3 να διατηρεί στα ίδια περίπου επίπεδα το ποσοστό ολκιμότητάς του και το AA2198-T8 να μειώνεται σημαντικά παραμένοντας τελικά σε υψηλότερο ποσοστό

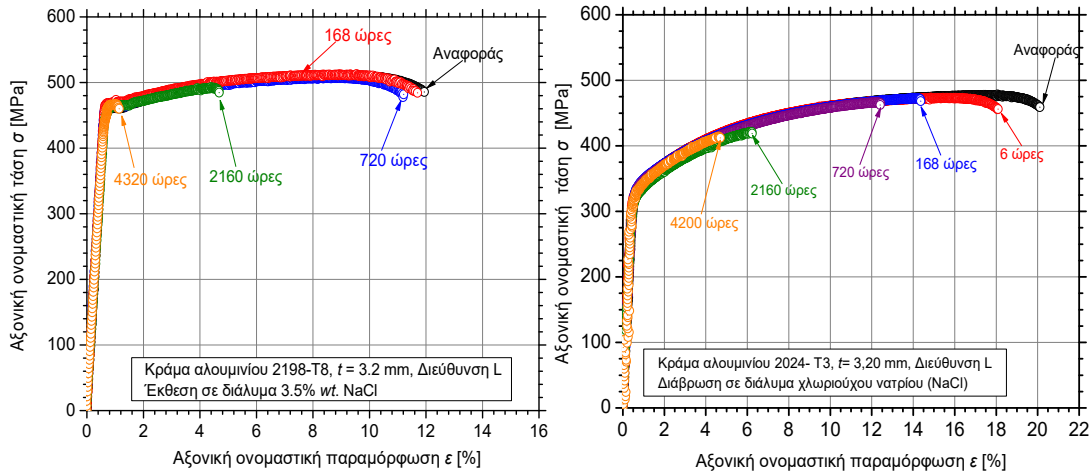
Στο ποσοστό του συμβατικού ορίου διαρροής στο Διάγραμμα 32 (β) το AA2198-T8 παρουσίασε στην αρχή μεγαλύτερη υποβάθμιση από το AA2198-T3 για τους μικρούς χρόνους έως και τις 12 ώρες με τα ποσοστά στη συνέχεια να μειώνονται σχεδόν με τον ίδιο ρυθμό και για τα δύο κράματα στους μεγάλους χρόνους.

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η εφελκυστική αντοχή του AA2198-T8 είναι υψηλότερη από του AA2198-T3 διότι διατηρεί μεγαλύτερο ποσοστό της παραμόρφωσης θραύσης (υφίσταται μικρότερη υποβάθμιση της παραμόρφωσης θραύσης) με τον αύξηση του χρόνου έκθεσης στο διάλυμα.

6.6.2 Σύγκριση της υποβάθμισης λόγω διάβρωσης AA2198-T8 με AA2024-T3.

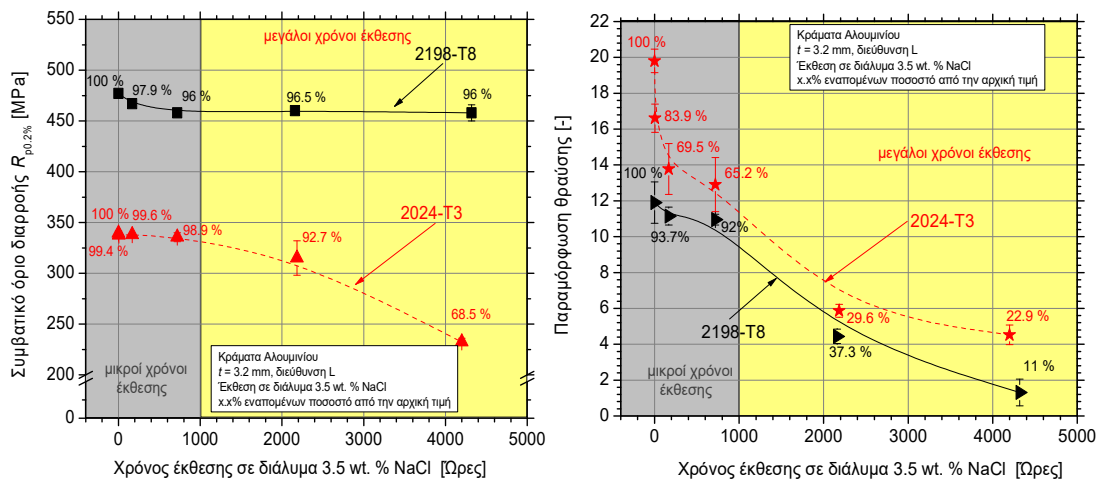
Πραγματοποιήθηκε ακριβώς η ίδια πειραματική διαδικασία με την προηγούμενη ενότητα αλλά διαβρώθηκαν τα υλικά σε NaCl 3,5 % wt και συγκρίνοντας δύο διαφορετικά κράματα της σειράς 2xxx, το AA2198-T8 και το AA2024-T3 λόγω της αντικατάστασης του AA2024-T3 από το AA2198-T8.[30]

Είναι γνωστό ότι για τους μεγαλύτερους χρόνους έκθεσης σε διάβρωση, η επιφάνεια του κράματος αλουμινίου παρουσιάζει ρωγμές και κοιλώματα (οπές) με την διάβρωση αφού έχει σπάσει το προστατευτικό φιλμ να έχει εισχωρήσει στην μήτρα του υλικού κι αυτό δρα αρνητικά στην υποβάθμιση της ολκιμότητας του δοκιμίου.



Διάγραμμα 32 : Τυπικές πειραματικές καμπύλες εφελκυσμού των προδιαβρωμένων δοκιμίων (α) AA2198-T8 και (β) AA2024-T3 για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης σε διάλυμα 3,5 wt % NaCl.

Παρατηρώντας το Διάγραμμα 32, καμία ουσιαστική μείωση της τάσης λόγω της έκθεσης στο διάλυμα ακόμα και στους μεγάλους χρόνους (4200 ώρες) για το AA2024. Αντίθετα η παραμόρφωση στο όριο θραύσης παρουσίασε σημαντική υποβάθμιση ακόμη και για τους πολύ σύντομους χρόνους έκθεσης (6 ώρες). Η υψηλότερη υποβάθμιση παρατηρήθηκε στο χρονικό διάστημα μεταξύ 6 και 168 ωρών όπου λαμβάνει χώρα η τριμματική διάβρωση καθώς και στο χρονικό εύρος από 720 έως 2160 ώρες όπου πιθανώς αλλάζει ο μηχανισμός διάβρωσης του υλικού. Η ίδια συμπεριφορά διάβρωσης παρατηρήθηκε και για το κράμα AA2198-T8 όπου δεν εμφανίζεται σημαντική μείωση της τάσης με την αύξηση του χρόνου έκθεσης, ενώ μία σημαντική υποβάθμιση της παραμόρφωση θραύσης ήταν εμφανής και στους σύντομους χρόνους έκθεσης.



Διάγραμμα 33 : Υποβάθμιση (α) του συμβατικού ορίου διαρροής των προδιαβρωμένων δειγμάτων του κράματος αλουμινίου 2198-T8 σε σύγκριση με το 2024-T3 που εκτέθηκαν για διαφορετικούς χρόνους σε διάλυμα 3,5% NaCl.

Στο Διάγραμμα 33 (α) παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των AA2024-T3 και AA2198-T8 με το AA2024-T3 να μην επηρεάζεται σημαντικά από την διάβρωση στους μικρούς χρόνους έκθεσης έως 720 ώρες όπου το ποσοστό του συμβατικού ορίου διαρροής να είναι περίπου 99%. Ωστόσο παρατηρείτε σημαντική

μείωση στους μεγάλους χρόνους (>1000 ώρες) όπου το ποσοστό πέφτει στο 69%. Το AA2198-T8 στην αρχή παρουσίασε ελαφρώς μεγαλύτερη υποβάθμιση από το AA2024-T3 για τους μικρούς χρόνους αλλά στη συνέχεια δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την διάβρωση και να διατηρεί το ποσοστό σχεδόν σταθερό.

Οι τιμές παραμόρφωσης θραύσης του AA2198-T8, όπως φαίνονται στο Διάγραμμα 33 (β) στους μικρούς χρόνους έως και 70 ώρες, είναι υψηλότερες λόγω της ανθεκτικότητάς του στην διάβρωση ακόμα και στην κατάσταση T8 (τεχνητής γήρανσης) που οδηγεί σε σημαντική απώλεια ολκιμότητας. Αντίθετα παρουσιάζεται σχεδόν η ίδια υποβάθμιση για τα δύο κράματα στους μεγάλους χρόνους έκθεσης λόγω της διάβρωσης οπών (pitts).

Ως εκ τούτου, τα δοκίμια AA2024-T3 χάνουν την ολκιμότητά τους γρηγορότερα από το AA2198-T8, γεγονός που αποδεικνύει ότι το κράμα Al-Cu-Li είναι πιο ανθεκτικό στην διάβρωση από τον προκάτοχό του, όσον αφορά την διατήρηση της ολκιμότητάς του σε σύγκριση με το Al-Cu κράμα στους ίδιους χρόνους έκθεσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο : Συμπεράσματα.

- Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκαν οι αντιστάσεις διάβρωσης των κραμάτων AA2198-T8 και AA2198-T3 και πραγματοποιήθηκε σύγκριση.
- Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η μικροδομή και οι μηχανισμοί διάβρωσης επηρεάζονται έντονα από τις θερμομηχανικές επεξεργασίες στο κράμα αλουμινίου AA2198.
- Το κράμα σε κατάσταση T3 βρέθηκε να είναι πιο ανθεκτικό στην διάβρωση, ειδικά στα πρώτα στάδια της έκθεσης στο διάλυμα όπου ο κύριος μηχανισμός διάβρωσης ήταν η καταστροφή του προστατευτικού φιλμ (R2).
- Η υψηλότερη κινητικότητα της επιφανειακής διάβρωσης στην περίπτωση της κατάστασης T8, οι οποίες σχετίζονται με την παρουσία ιζημάτων-σωματιδίων Tl, καθιστούν αυτό το κράμα πιο ευαίσθητο στην διάβρωση. Ωστόσο παρατηρήθηκε χαμηλότερος ρυθμός μείωσης της αντίστασης του προστατευτικού φιλμ στην T8 απ' ότι στην T3,
- Στην αντίσταση μεταφοράς φορτίου (R3) η κατάσταση T8 παρουσίασε υψηλότερες τιμές από την T3 μετά από 24 ώρες εμβάπτισης καθώς και χαμηλότερο ποσοστό μείωσης της τιμής.
- Επομένως μπορεί να ειπωθεί το συμπέρασμα ότι η κατάσταση T8 είναι πιο ευαίσθητη σε επιθέσεις διάβρωσης λόγω της παρουσίας των Tl σωματιδίων αλλά ανώτερη από την T3 όσον αφορά τον ρυθμό υποβάθμισης της αντοχής διάβρωσης.
- Τα ισοδύναμα κυκλώματα που βασίστηκαν στα καθιερωμένα μοντέλα διάβρωσης αποκαλύπτουν καλά τα χαρακτηριστικά του επιφανειακού φιλμ και της αντίδρασης στην διεπιφάνεια μεταξύ του διαλύματος και της μήτρας του κράματος.
- Όλες οι τιμές σφάλματος υπολογίστηκαν κι είναι κάτω από 10%, αποδεικνύοντας ότι οι συγκεκριμένες τιμές είναι αποδεκτές.
- Μελετήθηκαν πειραματικά η εφελκυστική συμπεριφορά των κραμάτων AA2198-T8 με το AA2198-T3 και του AA2198-T8 με το AA2024-T3 αφού είχαν εκτεθεί σε διαβρωτικά διαλύματα. Η διάβρωση παίζει σημαντικό ρόλο στην υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων αλουμινίου.
- Η παραμόρφωση θραύσης του AA2024-T3 βρέθηκε να υποβαθμίζεται με υψηλότερους ρυθμούς ακόμη και σε μικρούς χρόνους έκθεσης, όπως το ίδιο συνέβη και για το AA2198-T3 μετά τις 6 ώρες έκθεσης στο διάλυμα σε αντίθεση με το AA2198-T8 όπου ναι μεν υποβαθμίζεται κι αυτό αλλά διατηρεί σε σημαντικό ποσοστό τις μηχανικές ιδιότητές του.
- Συμπεραίνεται ότι το κράμα αλουμινίου AA2198-T8 είναι ανώτερο καθώς διατηρεί σε υψηλότερα ποσοστά των αρχικών (μη διαβρωμένων) τιμών των εφελκυστικών ιδιοτήτων του έναντι των AA2024-T3 και AA2198-T3.

Θέματα προς περαιτέρω διερεύνηση.

- Διεξαγωγή πειραμάτων ποτενσιοδυναμικής πόλωσης στα κράματα αλουμινίου AA2198-T8 και AA2198-T3, σε κατάσταση σταθερής διάβρωσης σε συνάρτηση με το μεταβαλλόμενο δυναμικό.
- Διεξαγωγή πειραμάτων διάβρωσης και ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης σε κράματα αλουμινίου AA2198-T8 και AA2198-T3, για τη μελέτη του μηχανισμού διάβρωσης στις διαφορετικές καταστάσεις τεχνητής γήρανσης.
- Διεξαγωγή πειραμάτων διάβρωσης και τεχνητής γήρανσης σε κράματα αλουμινίου και υπολογισμού της μείωσης του ενεργού πάχους του υλικού.

Βιβλιογραφία

- [1] Seymour G. Epstein, J. G. Kaufman, Peter Pollak, Aluminum and its alloys, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., Washington, (1998).
- [2] Davis JR. Alloying: understanding the basics. Materials Park, Oh: Asm International (2001).
- [3] Dashwood RJ, Grimes R. Structural Materials: Aluminum and Its Alloys, Properties. Encyclopedia of Aerospace Engineering, John Wiley & Sons, Ltd (2010).
- [4] Βασιλίνα Αυγέρη, Διπλωματική εργασία, Επίδραση της Θερμικής Κατεργασίας και της Διάβρωσης στον Κρίσιμο Συντελεστή Έντασης Τάσεων του Κράματος Al-Li 2198, ΕΜΠ (2021).
- [5] Kaufman JG. Introduction to aluminum alloys and tempers. Materials Park, Oh: Asm International; (2000).
- [6] J. Benedyk. International Temper Designation Systems for Wrought Aluminum Alloys : Part II- Thermally Treated (T-Temper) Aluminum Alloys, Materials Science (2010).
- [7] Nam N., Phung V., Thuy P.T.P., Dao V., Kim S., Yi J., Corrosion behaviors of hot-extruded Al-xMg alloys, Journal of Materials Research and Technology (2019).
- [8] Jianqiang Chen, Yazid Madi, Thilo F. Morgeneyer, Jacques Besson, Plastic flow and ductile rupture of a 2198 Al-Cu-Li aluminum alloy, Computational Materials Science 50 (2011) 1365–1371.
- [9] NAP-The National Academies of Sciences Engineering Medicine (2011). [Online]. Available from : <https://www.nap.edu/read/13032>.
- [10] ASTM G15, Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion.
- [11] Μπαξεβάνη Αικ., Μπέτα Ελ., Διπλωματική εργασία, Αξιολόγηση της τριμματικής διάβρωσης με βάση το πρότυπο ASTM G46-94, ΑΠΘ (2011).
- [12] Queiroz F.M., Magnani M., Costa I., de Melo H.G., Investigation of the corrosion behavior of AA2024-T3 in low concentrated chloride media, Corrosion Science 50 (2008) 646-657.
- [13] Li J., Zhang B., Wei Q., Wang N., Hou B., Electrochemical behavior of Mg-Al-Zn-In alloy as anode materials in 3.5 wt NaCl solution, Electrochimica Acta 238 (2017) 156-167.
- [14] Moreto J., Rossino L., Filho W., Marino C., Ferreira M., Taryba M., Fernandes J., On the Global and Localised Corrosion Behaviour of the AA2524-T3 Aluminum Alloy Used as Aircraft Fuselage Skin, Materials Research 22 (2), 2019, available from : <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0280>.
- [15] Zhou H., Song S., Hu B., Hong X., Local Corrosion Behavior of 2024 Alloy in NaCl Solution by EIS and SECM, 4th Annual International Conference on Material Science and Engineering (ICSME 2016).

- [16] Jinlong L., Tongxiang L., Chen W., Ting G., The passive film characteristics of several plastic deformation 2099 Al-Li alloy, *Journal of Alloys and Compounds* 662 (2016) 143-149.
- [17] Zou Y., Chen X., Chen B., Corrosion behavior of 2198 Al-Cu-Li alloy in different aging stages in 3,5 wt% NaCl aqueous solution, *J. Mater. Res.* 33 (2018) 1011-1022.
- [18] Brown R.H., Mears R.B., *The Electrochemistry of Corrosion*, Transactions of the Electrochemistry Society, Volume 74, Nr. 1, 495-517.
- [19] Breitkopf Cornelia, *Impedance Spectroscopy, Old technique-New applications*, Technische Universität Dresden, (2012).
- [20] Van Den Driessche P., Harrington D.A., Mechanism and equivalent circuits in electrochemical impedance spectroscopy, 56 (2011) 8005-2013.
- [21] Gamry Instruments, Available from www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/
- [22] Αλεξόπουλος Ν.Δ., Σημειώσεις Αντοχής Υλικών, Πανεπιστήμιο Αιγαίου (2009).
- [23] Παντελής Δ., Χρυσουλάκης Γ., *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου (1996).
- [24] Βελονάκη Ζανέτα, *Διπλωματική Εργασία, Υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων τεχνητά γηρασμένων δοκιμίων από αεροναυπηγικό κράμα αλουμινίου 2024 λόγω διάβρωσης*, Πανεπιστήμιο Αιγαίου (2014).
- [25] Wang X., Wang J., Yue X., Gao Y., Effect of aging treatment on the exfoliation corrosion cracking behaviors of 2195 Al-Li alloy, *Materials and Design* 67, 596 (2015).
- [26] Moreto J., Marino C., Filho W., Rocha L., Fernandes J., SVET, SKP and EIS study of the corrosion behavior of high strength Al and Al-Li alloys used in aircraft fabrication, *Corrosion Science* 84, 30 (2014).
- [27] Campestrini P., VanWesting E., DeWit J., Influence of surface preparation on performance of chromate conversion coatings on Alclad 2024 aluminum alloy- Part II : EIS investigation, *Electrochimica Acta* 46 (2001), 2631-2647.
- [28] Araujo J., Milagre M., Ferreira R., Machado C., Bugarin A., Machado I., Costa I., Exfoliation and intergranular corrosion resistance of the 2198 Al-Cu-Li alloy with different thermomechanical treatments, *Materials and Corrosion*, (2020) 1-14
- [29] Georgoulis D., Charalampidou C., Alexopoulos N., Corrosion resistance of aluminum alloy 2198 for different ageing tempers. ICSI 2021 The 4th International Conference on Structural Integrity, *Structural Integrity Procedia* (2021).
- [30] Georgoulis D., Charalampidou C., Siskou N., Kourkoulis S., Alexopoulos N., Corrosion behavior of AA2198-T8 and AA2024-T3 alloy in 3.5% aqueous solution, 1st Virtual European Conference on Fracture, *Structural Integrity Procedia* (2019).

Παράρτημα πινάκων μετρήσεων.

Fixed at 66 freqs 2198-T8 [0h]

neg.								neg.							
freq / Hz	Phase / °	ldc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F	freq / Hz	Phase / °	ldc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F		
100000	3,89956	-0,23842	77,3938	77,2146	5,26337	3307070	27,9353	69,6723	0,015497	5600,9	1945,69	5252,09	921861		
78038,3	4,22868	-0,07153	77,8447	77,6328	5,74007	2814520	21,8003	68,1308	0,019312	6871,82	2559,67	6377,3	873531		
60899,7	5,52433	0,023842	78,164	77,8009	7,52472	2879290	17,0125	66,2496	0,01502	8363,36	3368,37	7655,06	818272		
47525,1	6,9199	-0,07153	78,8472	78,2728	9,49964	2836680	13,2763	63,8834	0,01502	10167,5	4475,73	9129,39	761550		
37087,8	8,48735	-0,02384	79,5792	78,7077	11,7452	2736970	10,3606	61,0644	0,016451	12259,9	5931,65	10729,4	698458		
28942,7	10,3753	-0,07153	80,6932	79,3738	14,5324	2642750	8,08523	57,6222	0,023723	14625,4	7831,91	12351,7	627477		
22586,4	12,5616	-0,11921	82,0504	80,0863	17,8451	2532480	6,30957	53,89	0,018907	17254	10168,4	13939,3	552612		
17626	15,2117	-0,02384	84,0119	81,0684	22,0436	2441270	4,92388	49,9093	0,017428	20042,2	12907,2	15332,8	474362		
13755	18,2978	-0,02384	86,6209	82,2411	27,1952	2350360	3,84251	45,605	0,020623	22912,4	16029,5	16371,7	395265		
10734,2	21,8519	-0,02384	90,1311	83,6551	33,5476	2262620	2,99863	41,4162	0,020433	25673,5	19253,2	16983,7	319989		
8376,78	26,0022	-0,07153	95,0161	85,3984	41,6556	2192450	2,34008	37,4192	0,01924	28352,1	22517,6	17229,9	253305		
6537,09	30,4444	-0,07153	101,791	87,7559	51,5775	2118480	1,82616	33,7548	0,025964	30718	25540,7	17068,5	195846		
5101,43	35,2423	-0,02384	110,829	90,5159	63,9521	2049870	1,4251	31,2167	0,033069	33124,9	28328,8	17167,8	153724		
3981,07	40,3352	0,054836	121,742	92,8007	78,7988	1971060	1,11213	28,6256	0,029779	35435,3	31104	16976,5	118626		
3106,76	45,1441	0,011921	137,968	97,3126	97,8034	1909160	0,867884	26,5652	0,026012	37668,6	33691,8	16846	91862,5		
2424,46	49,6682	0,007153	158,989	102,899	121,198	1846260	0,677281	25,1417	0,022149	40179,8	36373,1	17070,7	72644,3		
1892,01	53,8064	0,021458	185,766	109,698	149,918	1782200	0,528539	23,3134	0,023294	42645,9	39164,1	16877,5	56048,8		
1476,49	57,5427	0,002384	219,97	118,051	185,609	1721900	0,412463	21,8486	0,028396	45792,3	42503	17041,9	44165,3		
1152,23	60,7553	0,016689	263,73	128,843	230,115	1665960	0,321879	20,2501	0,029206	47736	44785,5	16522,3	33415,1		
899,179	63,4978	0,021458	317,85	141,835	284,449	1607060	0,251189	19,2512	0,027204	50017,2	47220,4	16491,2	26027,5		
701,704	65,8374	0,011921	385,14	157,649	351,397	1549290	0,196023	17,8178	0,022912	52032	49536,3	15921,3	19609,5		
547,598	67,7617	0,007153	469,476	177,678	434,555	1495160	0,152973	16,6529	0,026488	54120,3	51850,4	15509,4	14907		
427,336	69,2991	0,059605	574,063	202,925	537	1441860	0,119378	15,9592	0,025773	55927,8	53772,2	15377,5	11534,3		
333,485	70,5337	0,064373	703,977	234,602	663,736	1390760	0,09316	14,7956	0,026584	58164,1	56235,6	14853,4	8694,35		
260,246	71,5051	-0,00238	864,692	274,297	820,033	1340900	0,072701	14,1512	0,031829	59484,8	57679,7	14543	6643,11		
203,092	72,1996	0,011921	1063,41	325,087	1012,51	1292020	0,056734	13,0154	0,041747	58926,4	57412,5	13271	4730,75		
158,489	72,6477	0,026226	1308,53	390,264	1248,98	1243760	0,044275	14,498	0,048852	61282,8	59331,4	15341,9	4267,89		
123,682	72,8543	0,00453	1611,86	475,18	1540,23	1196940	0,034551	15,5069	0,072599	60964,4	58745,2	16299,1	3538,39		
96,5196	72,8803	0,011206	1987,89	585,172	1899,81	1152140	0,026963	18,5158	0,082326	64109,9	60791,3	20359,2	3449,12		
75,3222	72,7611	0,012636	2446,48	725,03	2336,58	1105820	0,021042	18,2384	0,091768	67084,7	63714,6	20995,6	2775,78		
58,7802	72,33	0,011683	3017	915,764	2874,66	1061960	0,01642	19,9986	0,107313	70412,8	66167	24081	2484,5		
45,871	71,7515	0,011206	3713,5	1162,84	3526,74	1016460	0,012814	19,4606	0,134731	73831,5	69613,5	24597,6	1980,45		
35,797	70,8726	0,012159	4560,18	1494,23	4308,42	969046	0,01	20,6233	0,154615	78386,3	73363	27609,4	1734,75		

Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T8 στις 0 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

Fixed at freqs 2198-T8 [1h]

neg.							neg.						
freq / Hz	Phase / °	ldc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F	freq / Hz	Phase / °	ldc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F
100000	3,96852	-0,23842	77,2082	77,0231	5,34346	3357390	27,9353	71,8523	-0,00453	4837,54	1506,74	4596,9	806861
78038,3	4,23089	-0,07153	77,6232	77,4117	5,72672	2807980	21,8003	70,7869	-0,0031	5965,33	1963,08	5633,07	771590
60899,7	5,49068	-0,02384	78,0084	77,6505	7,46414	2856110	17,0125	69,4421	-0,00453	7309,69	2566,83	6844,19	731596
47525,1	6,82516	-0,07153	78,656	78,0986	9,34747	2791240	13,2763	67,7455	-0,00596	8956,16	3391,89	8289,02	691449
37087,8	8,38688	-0,07153	79,5208	78,6703	11,5986	2702820	10,3606	65,7046	-0,00453	10907,9	4487,95	9941,87	647191
28942,7	10,1311	-0,11921	80,6072	79,3504	14,1788	2578450	8,08523	63,3256	-0,00787	13194,2	5923,15	11790	598944
22586,4	12,2256	-0,11921	82,1468	80,2838	17,3956	2468680	6,30957	60,3493	-0,00646	15854,2	7843,23	13778,2	546226
17626	14,6894	-0,07153	84,092	81,3434	21,324	2361580	4,92388	57,113	-0,00861	18897,5	10261	15869	490951
13755	17,5739	-0,07153	86,8784	82,8237	26,2317	2267090	3,84251	53,4698	-0,01028	22288,8	13267,3	17910	432405
10734,2	20,8215	-0,07153	90,5637	84,6492	32,1915	2171150	2,99863	49,4906	-0,00861	25873,5	16806,7	19671,6	370632
8376,78	24,4112	-0,07153	95,4148	86,885	39,4333	2075490	2,34008	45,2848	-0,01094	29614,8	20836,5	21044,7	309423
6537,09	28,3372	-0,07153	101,796	89,5974	48,3182	1984610	1,82616	40,9751	-0,01485	33352,7	25181,1	21870,4	250943
5101,43	32,4403	-0,07153	110,225	93,0244	59,127	1895210	1,4251	36,857	-0,01328	37069,4	29660,5	22235	199096
3981,07	36,6583	-0,02384	121,072	97,1256	72,2852	1808130	1,11213	32,6302	-0,01228	40325,2	33960,6	21744	151940
3106,76	41,0139	0,002384	133,981	101,095	87,924	1716310	0,867884	29,011	-0,01371	43433,5	37983,8	21064,3	114865
2424,46	45,0687	0,011921	151,734	107,164	107,421	1636380	0,677281	25,6795	-0,01414	46225,2	41659,6	20031	85241,8
1892,01	48,9622	0,026226	174,266	114,416	131,445	1562600	0,528539	22,971	-0,01671	48428,2	44588	18899,8	62764,6
1476,49	52,5892	0,007153	202,232	122,861	160,633	1490200	0,412463	20,7192	-0,01624	50530,6	47262,6	17877,2	46330,1
1152,23	55,9435	0,050068	237,482	132,992	196,75	1424400	0,321879	18,8814	-0,01533	52698,8	49863,1	17053,8	34490,1
899,179	59,1955	0,011921	280,74	143,77	241,133	1362330	0,251189	17,7679	-0,01714	54758,3	52146,4	16710,1	26373
701,704	61,8712	0,002384	336,335	158,567	296,611	1307740	0,196023	16,9698	-0,01872	57245,6	54753,1	16708,1	20578,5
547,598	64,3469	-0,00238	404,328	175,042	364,475	1254030	0,152973	15,8884	-0,01605	59369,3	57101,2	16253,2	15621,9
427,336	66,5542	0,054836	490,857	195,302	450,33	1209150	0,119378	16,0321	-0,01967	61464	59073,5	16974,8	12732,3
333,485	68,422	0,059605	598,198	219,998	556,275	1165590	0,09316	15,4561	-0,02134	64526,6	62193,2	17196,5	10065,8
260,246	69,9249	-0,00715	731,784	251,186	687,323	1123890	0,072701	14,736	-0,02344	67129,6	64921,6	17075,5	7799,94
203,092	71,1631	0,007153	898,703	290,168	850,57	1085380	0,056734	14,3994	-0,02859	69484,9	67302,1	17279,5	6159,68
158,489	72,1166	0,016689	1106,06	339,649	1052,62	1048210	0,044275	14,6205	-0,03755	72346,5	70003,8	18261,4	5080,05
123,682	72,7803	-0,00596	1363,41	403,619	1302,3	1012400	0,034551	14,4159	-0,04523	74678,1	72326,8	18591,8	4036,1
96,5196	73,2014	-0,00119	1684,61	486,865	1612,72	978033	0,026963	14,1688	-0,04599	78240,5	75860,4	19151,7	3244,56
75,3222	73,3904	0,000715	2079,63	594,461	1992,86	943146	0,021042	14,6392	-0,04904	82036,2	79373	20733,2	2741,09
58,7802	73,4195	-0,00119	2573,34	734,334	2466,34	910884	0,01642	14,2378	-0,05524	86145	83498,9	21187	2185,92
45,871	73,1267	-0,00167	3180,31	923,104	3043,4	877157	0,012814	13,8748	-0,06626	88571	85986,7	21239,4	1710,08
35,797	72,623	-0,00405	3922,47	1171,48	3743,45	841972	0,01	13,7723	-0,0747	93124,3	90446,9	22169,6	1392,95

Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T8 στις 1 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

Πανεπιστήμιο Αιγαίου - Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης
Διπλωματική εργασία ΜΕΔΜΟΔΕ του ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΟΥΛΗ

Fixed at 66 freqs 2198-T8 [3h]

neg.								neg.							
freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F	freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F		
100000	3,04527	-0,23842	75,9887	75,8814	4,03689	2536450	27,9353	72,3702	0,009775	3950,55	1196,48	3765	660844		
78038,3	3,04864	-0,07153	76,2878	76,1799	4,05726	1989390	21,8003	71,1728	0,011683	4885,02	1576,47	4623,65	633325		
60899,7	3,96895	-0,02384	76,6492	76,4654	5,30533	2030060	17,0125	69,6492	0,012636	5999,67	2086,49	5625,17	601291		
47525,1	4,99646	-0,07153	77,0032	76,7106	6,70654	2002630	13,2763	67,6324	0,012159	7357,29	2799,79	6803,74	567551		
37087,8	6,14244	-0,02384	77,496	77,0511	8,29212	1932310	10,3606	65,3362	0,013113	8957,71	3737,98	8140,52	529928		
28942,7	7,42288	-0,07153	78,2049	77,5495	10,1034	1837330	8,08523	62,5546	0,012636	10821,2	4987,54	9603,29	487856		
22586,4	8,9963	-0,11921	79,0651	78,0925	12,3635	1754550	6,30957	59,462	0,012159	12948,4	6579,22	11152,4	442127		
17626	10,8873	-0,07153	80,2835	78,8384	15,1637	1679340	4,92388	55,8619	0,01452	15391,6	8637,62	12739,4	394129		
13755	13,132	-0,07153	81,8479	79,7076	18,5955	1607120	3,84251	52,0489	0,015044	18064,8	11109,6	14244,8	343914		
10734,2	15,7848	-0,07153	83,99	80,8228	22,8473	1540930	2,99863	47,9361	0,014854	20852,5	13970,3	15480,8	291674		
8376,78	18,9502	-0,07153	86,9062	82,196	28,2224	1485430	2,34008	43,572	0,013566	23728,2	17191,3	16355	240471		
6537,09	22,5308	-0,07153	90,6533	83,7341	34,7365	1426760	1,82616	39,2383	0,010896	26575,9	20583,6	16810,5	192885		
5101,43	26,4811	-0,07153	95,7632	85,7158	42,7011	1368710	1,4251	34,8208	0,01142	29260,1	24020,8	16707,8	149605		
3981,07	30,9332	-0,02384	102,7	88,0928	52,7919	1320530	1,11213	30,7649	0,010943	31702,7	27241,3	16216,4	113315		
3106,76	35,5951	-0,07153	111,909	90,9988	65,137	1271500	0,867884	27,0699	0,011277	33847,1	30139,2	15403	83993,8		
2424,46	40,5117	0,030994	123,502	93,8952	80,2273	1222130	0,677281	23,7989	0,009894	35773,2	32731,3	14435,5	61430,1		
1892,01	45,2138	0,026226	139,627	98,3617	99,0987	1178700	0,528539	21,1781	0,010037	37442,5	34913,7	13526,8	44921,2		
1476,49	49,685	0,0453	160,765	104,013	122,583	1137210	0,412463	19,0288	0,012088	38955,4	36826,7	12701,2	32916,1		
1152,23	53,9909	-0,00715	188,051	110,558	152,119	1101290	0,321879	17,3775	0,011849	40345,7	38504,3	12049,9	24370,1		
899,179	57,7798	0,016689	222,622	118,696	188,339	1064060	0,251189	15,8818	0,011706	41816,4	40220,2	11443,2	18060,4		
701,704	61,1472	0,011921	266,22	128,467	233,172	1028040	0,196023	14,7581	0,014329	43159,1	41735,2	10994,3	13541,1		
547,598	63,8976	0,021458	321,175	141,31	288,418	992349	0,152973	13,9108	0,015283	44490,5	43185,6	10696	10280,5		
427,336	66,4357	0,059605	390,089	155,949	357,561	960061	0,119378	13,5381	0,017571	45625,5	44357,7	10680,5	8011,17		
333,485	68,5074	0,059605	476,861	174,713	443,703	929713	0,09316	12,9473	0,017715	47136,1	45937,7	10561	6181,83		
260,246	70,1837	-0,00715	584,751	198,234	550,124	899550	0,072701	12,7207	0,020051	48114,2	46933,2	10594,7	4839,58		
203,092	71,5091	0,011921	719,343	228,143	682,206	870538	0,056734	12,2823	0,016046	49194,9	48068,9	10465,2	3730,54		
158,489	72,5563	0,026226	887,25	265,97	846,447	842907	0,044275	12,7639	0,012803	50368,3	49123,7	11128,1	3095,67		
123,682	73,3452	-0,00238	1096,74	314,331	1050,73	816543	0,034551	14,0368	0,011659	51815,6	50268,4	12567,6	2728,32		
96,5196	73,8393	-0,00238	1357,09	377,722	1303,47	790488	0,026963	15,009	0,016141	53624,9	51795,5	13887,3	2352,7		
75,3222	74,0338	0,008345	1678,08	461,59	1613,35	763538	0,021042	15,828	0,02501	56189,3	54058,8	15325,7	2026,17		
58,7802	74,0388	0,007868	2082,97	572,788	2002,67	739639	0,01642	15,6629	0,030303	58598	56422,1	15820,2	1632,21		
45,871	73,7893	0,008345	2580,07	720,279	2477,5	714054	0,012814	16,297	0,034022	60930	58481,8	17097,9	1376,62		
35,797	73,2251	0,009775	3192,15	921,295	3056,31	687421	0,01	17,0277	0,047326	63904	61102,6	18713,3	1175,79		

Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T8 στις 3 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

Fixed at 66 freqs 2198-T8 [6h]

neg.								neg.							
freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F	freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F		
100000	2,2795	-0,23842	75,1013	75,0418	2,9871	1876850	27,9353	64,907	-0,00024	2317,1	982,655	2098,41	368319		
78038,3	1,99597	-0,07153	75,433	75,3873	2,62728	1288230	21,8003	63,5783	-0,00072	2797,62	1244,87	2505,39	343176		
60899,7	2,74831	-0,02384	75,5619	75,475	3,6231	1386360	17,0125	62,0662	-0,00215	3365,06	1576,36	2973	317792		
47525,1	3,38276	-0,11921	75,8284	75,6963	4,47433	1336080	13,2763	60,1501	-0,0031	4045,81	2013,72	3509,06	292717		
37087,8	4,10268	-0,07153	76,1533	75,9581	5,44832	1269620	10,3606	57,8037	-0,00358	4834,15	2575,74	4090,79	266300		
28942,7	5,00465	-0,07153	76,5137	76,222	6,6748	1213830	8,08523	54,985	-0,00501	5739,01	3292,99	4700,26	238778		
22586,4	6,04324	-0,11921	76,9794	76,5516	8,10431	1151020	6,30957	51,6609	-0,00596	6752,48	4188,66	5296,33	209969		
17626	7,27008	-0,07153	77,5934	76,9696	9,81918	1087450	4,92388	47,6637	-0,00691	7866,48	5297,92	5814,94	179901		
13755	8,91124	-0,07153	78,4565	77,5095	12,1532	1050350	3,84251	43,2638	-0,00834	9026,13	6572,88	6186,13	149353		
10734,2	10,806	-0,11921	79,5292	78,119	14,9105	1005630	2,99863	38,5766	-0,0093	10167,1	7948,39	6339,81	119448		
8376,78	13,1604	-0,11921	80,9592	78,8329	18,4326	970159	2,34008	33,7238	-0,01025	11215,6	9328,28	6226,8	91553,7		
6537,09	15,9481	-0,11921	83,0575	79,8607	22,8215	937364	1,82616	28,9764	-0,01233	12147,3	10626,6	5884,73	67521,9		
5101,43	19,1849	-0,11921	85,8613	81,0928	28,2156	904402	1,4251	24,6399	-0,01252	12926,1	11749,2	5389,09	48254,9		
3981,07	22,9651	-0,07153	89,7437	82,6309	35,0154	875867	1,11213	20,7412	-0,01466	13546,7	12668,8	4797,53	33523,7		
3106,76	27,0953	-0,11921	95,1606	84,7167	43,3429	846069	0,867884	17,4982	-0,01657	14022,1	13373,3	4216,11	22990,8		
2424,46	31,6504	-0,07153	102,255	87,0462	53,6567	817371	0,677281	14,5545	-0,01791	14427	13964,1	3625,53	15428,4		
1892,01	36,4249	-0,07153	112,035	90,1477	66,523	790815	0,528539	12,376	-0,01972	14739,9	14397,3	3159,15	10491,2		
1476,49	41,2682	0,030994	124,578	93,6367	82,1697	762294	0,412463	10,657	-0,02077	14995,7	14737,1	2773,16	7186,87		
1152,23	45,8935	0,021458	141,596	98,5502	101,673	736077	0,321879	9,29127	-0,02348	15223,5	15023,8	2457,89	4970,89		
899,179	50,1867	0,007153	163,485	104,678	125,579	709484	0,251189	8,26661	-0,02363	15415,1	15255	2216,38	3498,04		
701,704	54,0403	0,002384	191,54	112,476	155,039	683555	0,196023	7,48052	-0,02429	15582,6	15449,9	2028,68	2498,63		
547,598	57,4759	0,011921	227,454	122,291	191,781	659852	0,152973	7,00783	-0,02434	15724,7	15607,3	1918,5	1843,98		
427,336	60,31	0,0453	272,35	134,897	236,595	635264	0,119378	6,85296	-0,02406	15852,6	15739,4	1891,56	1418,81		
333,485	62,7076	0,050668	328,606	150,676	292,025	611894	0,09316	6,93921	-0,02291	15991,1	15873,9	1931,98	1130,87		
260,246	64,558	-0,01192	398,302	171,109	359,675	588131	0,072701	7,03735	-0,02215	16142,7	16021,1	1977,75	903,42		
203,092	65,9288	0,002384	484,676	197,686	442,528	564694	0,056734	7,80277	-0,02983	16282,3	16131,5	2210,54	787,996		
158,489	66,8822	0,016689	590,325	231,775	542,922	540651	0,044275	9,35326	-0,04013	16500,6	16281,2	2681,7	746,009		
123,682	67,4699	-0,01192	720,46	276,058	665,473	517152	0,034551	11,2891	-0,04313	16992,8	16664	3326,51	722,154		
96,5196	67,6825	-0,01192	879,085	333,823	813,236	493187	0,026963	12,7671	-0,04017	17774,6	17335,2	3928	665,458		
75,3222	67,1159	-0,01192	1069,8	407,394	989,192	468148	0,021042	13,4476	-0,03464	18688,3	18175,9	4346,06	574,582		
58,7802	67,2691	-0,01669	1303,69	503,751	1202,43	444091	0,01642	13,7739	-0,03002	19601,3	19037,6	4666,89	481,495		
45,871	66,6282	-0,00024	1581,8	627,493	1452,01	418494	0,012814	13,6727	-0,02282	20583	19999,7	4865,3	391,725		
35,797	65,8549	0,000715	1914,68	783,199	1747,17	392972	0,01	13,1884	-0,02391	21463,7	20897,6	4897,01	307,688		

Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T8 στις 6 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

Πανεπιστήμιο Αιγαίου - Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης
Διπλωματική εργασία ΜΕΔΜΟΔΕ του ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΟΥΛΗ

Fixed at 66 freqs 2198-T8 [12h]

neg.							neg.						
freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F	freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F
100000	2,83348	-0,23842	77,804	77,7089	3,84611	2416580	27,9353	62,0351	0,009775	1675,05	785,482	1479,46	259680
78038,3	2,51211	-0,02384	78,2611	78,1859	3,43022	1681940	21,8003	61,7111	0,009775	2010,13	952,638	1770,06	242454
60899,7	3,21564	0,023842	78,7023	78,5784	4,41474	1689270	17,0125	61,032	0,009775	2406,52	1165,52	2105,44	225057
47525,1	3,80456	-0,07153	79,1693	78,9949	5,25315	1568640	13,2763	60,0376	0,009298	2887,77	1442,24	2501,83	208696
37087,8	4,43738	-0,02384	79,6883	79,4494	6,16545	1436730	10,3606	58,582	0,008821	3456,97	1802,04	2950,13	192046
28942,7	5,08876	-0,07153	80,2132	79,897	7,11481	1293840	8,08523	56,6245	0,006914	4124,34	2268,9	3444,16	174967
22586,4	5,98463	-0,11921	80,9846	80,5432	8,44359	1198270	6,30957	54,1155	0,006437	4892,66	2867,85	3964,04	157151
17626	6,98017	-0,02384	81,6859	81,0805	9,92695	1099380	4,92388	50,982	0,006437	5769,56	3632,3	4482,65	138683
13755	8,19843	-0,02384	82,6162	81,7718	11,7812	1018200	3,84251	47,221	0,00596	6722,44	4565,7	4934,12	119126
10734,2	9,77756	-0,07153	83,7789	82,5619	14,2276	959581	2,99863	42,9183	0,005484	7729,4	5660,44	5263,37	99166,9
8376,78	11,667	-0,07153	85,2276	83,4667	17,2349	907123	2,34008	38,2059	0,00453	8708,41	6843	5386,06	79192,1
6537,09	13,8858	-0,07153	87,1556	84,6085	20,9162	859109	1,82616	33,3358	-0,00215	9642,28	8055,78	5298,87	60799,7
5101,43	16,584	-0,07153	89,6184	85,8905	25,579	819889	1,4251	28,4711	-0,00167	10454,9	9190,47	4984,02	44627,8
3981,07	19,7365	-0,02384	92,899	87,4417	31,3716	784723	1,11213	23,8746	-0,00405	11110,1	10159,4	4496,64	31421,1
3106,76	23,2517	-0,07153	97,3907	89,4806	38,447	750499	0,867884	19,7885	-0,00644	11614,4	10928,5	3932,04	21441,7
2424,46	27,1676	-0,02384	103,502	92,0828	47,2584	719903	0,677281	15,9316	-0,00827	12017,7	11556,1	3298,73	14037,7
1892,01	31,3951	-0,02384	111,465	95,1458	58,066	690279	0,528539	13,0494	-0,01109	12289,2	11971,9	2774,8	9214,85
1476,49	35,7721	0,016689	121,902	98,9052	71,2595	661079	0,412463	10,6661	-0,01209	12477,7	12262,1	2309,43	5985,07
1152,23	40,161	0,026226	135,89	103,852	87,6407	634489	0,321879	8,83979	-0,01314	12608,9	12459,2	1937,64	3918,74
899,179	44,2669	0,035763	154,26	110,465	107,674	608325	0,251189	7,39205	-0,01276	12702,6	12597	1634,29	2579,34
701,704	47,9925	0,021458	177,87	119,035	132,167	582718	0,196023	6,38815	-0,01338	12753,1	12673,9	1418,95	1747,65
547,598	51,2718	0,030994	207,173	129,613	161,621	556081	0,152973	5,76099	-0,01304	12796,7	12732	1284,52	1234,63
427,336	53,9967	0,059605	243,383	143,068	196,892	528662	0,119378	5,51781	-0,01171	12820,8	12761,4	1232,79	924,678
333,485	56,2146	0,059605	288,488	160,424	239,77	502406	0,09316	5,67019	-0,01047	12843,1	12780,3	1268,93	742,757
260,246	57,9311	-0,00238	342,807	182,01	290,498	475016	0,072701	5,85078	-0,00966	12897,5	12830,3	1314,74	600,563
203,092	59,205	0,016689	408,582	209,181	350,974	447865	0,056734	6,8204	-0,01729	12946,8	12855,2	1537,53	548,089
158,489	60,1389	0,030994	486,881	242,417	422,24	420474	0,044275	8,64779	-0,02849	13063,4	12914,9	1964,21	546,413
123,682	60,8033	0,02384	580,944	283,39	507,135	394105	0,034551	11,0213	-0,02973	13451	13202,9	2571,48	558,244
96,5196	61,2947	-0,00238	691,905	332,325	606,871	368037	0,026963	12,9107	-0,02172	14095,8	13739,4	3149,47	533,563
75,3222	61,6564	-0,00238	824,22	391,305	725,41	343310	0,021042	14,0439	-0,00861	14864,4	14420,1	3607,08	476,883
58,7802	61,9285	-0,00238	982,996	462,571	867,358	320338	0,01642	14,3755	0,004077	15703	15211,4	3898,69	402,238
45,871	62,1089	-0,00238	1173,13	548,781	1036,86	298839	0,012814	14,3546	0,012708	16567	16049,8	4107,32	330,697
35,797	62,1245	0,009775	1399,73	654,445	1237,31	278294	0,01	13,9309	0,02234	17473,9	16960	4206,86	264,325

Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T8 στις 12 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

Fixed at 66 freqs 2198-T8 [24h]

neg.							neg.						
freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F	freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F
100000	2,35345	-0,23842	81,1121	81,0437	3,33078	2092790	27,9353	59,8603	-0,00072	1393,52	699,701	1205,12	211527
78038,3	2,00961	0,023842	81,4851	81,435	2,85745	1401090	21,8003	60,1684	-0,00119	1645,51	818,564	1427,47	195528
60899,7	2,56455	0,023842	81,7841	81,7021	3,65941	1400250	17,0125	60,4696	-0,00167	1944,7	958,513	1692,07	180871
47525,1	3,02119	-0,02384	82,1969	82,0826	4,33221	1293640	13,2763	60,7719	-0,00215	2311,35	1128,6	2017,07	168259
37087,8	3,5368	0,023842	82,5148	82,3576	5,0903	1186190	10,3606	60,9208	-0,00262	2758,54	1340,7	2410,82	156939
28942,7	4,12529	-0,07153	83,0241	82,809	5,97256	1086120	8,08523	60,8209	-0,00453	3298,52	1608,16	2879,94	146304
22586,4	4,79901	-0,07153	83,5233	83,2305	6,98761	991642	6,30957	60,2909	-0,00453	3956,43	1960,79	3436,37	136232
17626	5,61846	-0,02384	84,003	83,5994	8,22418	910807	4,92388	59,2763	-0,00548	4757,83	2430,76	4090,03	126536
13755	6,63666	0,023842	84,7682	84,2001	9,79688	846700	3,84251	57,6055	-0,00548	5720,15	3064,55	4829,98	116611
10734,2	7,93287	-0,07153	85,7133	84,8931	11,8295	797841	2,99863	55,2017	-0,00644	6839,65	3903,32	5616,48	105820
8376,78	9,51479	-0,07153	86,8095	85,6153	14,3498	755271	2,34008	51,9649	-0,00739	8138,17	5014,28	6409,9	94245,8
6537,09	11,4719	-0,07153	88,2767	86,5131	17,5571	721135	1,82616	48,0037	-0,00978	9522,24	6371,17	7076,82	81200,1
5101,43	13,7061	-0,02384	90,166	87,5984	21,3641	684790	1,4251	43,3055	-0,01025	10988,1	7996,09	7536,57	67483,9
3981,07	16,5084	-0,02384	92,6763	88,856	26,3345	658727	1,11213	38,2061	-0,01311	12418,6	9758,47	7680,82	53671,2
3106,76	19,6241	-0,02384	96,1026	90,5206	32,2758	630034	0,867884	32,8421	-0,01614	13715,6	11523,4	7438,31	40561,7
2424,46	23,2512	-0,02384	100,72	92,54	39,7606	605687	0,677281	27,4309	-0,01853	14812,4	13147	6823,75	29038,4
1892,01	27,2807	-0,02384	106,939	95,0443	49,0155	582689	0,528539	22,745	-0,02177	15656,4	14438,9	6053,24	20102,3
1476,49	31,5469	-0,02384	115,382	98,3301	60,3675	560034	0,412463	18,6495	-0,02439	16253,9	15400,5	5197,64	13470,1
1152,23	36,0535	0,035763	126,158	101,995	74,2492	537539	0,321879	15,2447	-0,02644	16686,3	16099,2	4387,55	8873,48
899,179	40,3689	0,016689	140,942	107,382	91,289	515756	0,251189	12,4796	-0,02825	16939,7	16539,4	3660,51	5777,26
701,704	44,4611	0,021458	160,172	114,319	112,189	494632	0,196023	10,3886	-0,0303	17089,2	16809,1	3081,59	3795,44
547,598	48,3153	0,007153	184,8	122,898	138,012	474851	0,152973	8,99103	-0,03231	17161,5	16950,6	2681,99	2577,82
427,336	51,5188	0,050068	215,785	134,274	168,919	453553	0,119378	8,19698	-0,03369	17202,6	17026,9	2452,69	1839,69
333,485	54,1529	0,054836	254,428	148,999	206,235	432135	0,09316	7,96369	-0,03612	17228,9	17062,8	2386,99	1397,21
260,246	56,2414	-0,01192	301,725	167,667	250,85	410183	0,072701	8,00513	-0,03912	17279,8	17111,4	2406,11	1099,23
203,092	57,711	0,007153	359,556	192,071	303,956	387867	0,056734	8,93194	-0,05095	17320,9	17110,9	2689,26	958,649
158,489	58,7604	0,021458	428,511	222,233	366,38	364847	0,044275	11,0171	-0,0643	17477	17154,9	3339,89	929,108
123,682	59,3438	-0,00715	510,899	260,5	439,497	341542	0,034551	13,8379	-0,07064	18015,5	17492,6	4308,87	935,415
96,5196	59,6383	-0,00715	608,156	307,396	524,749	318234	0,026963	16,1844	-0,06912	19011,6	18258,2	5299,11	897,743
75,3222	59,6828	-0,01192	720,507	363,702	621,973	294357	0,021042	17,6748	-0,0644	20252,1	19296,1	6148,83	812,923
58,7802	59,6825	-0,01192	852,448	430,308	735,869	271776	0,01642	18,3989	-0,05906	21614,4	20509,5	6822,16	703,86
45,871	59,6556	-0,01192	1005,59	508,02	867,826	250121	0,012814	18,4806	-0,05639	23067,8	21878,3	7312,11	588,728
35,797	59,7215	-0,01192	1182,88	596,413	1021,52	229759	0,01	18,0271	-0,055	24632,8	23423,6	7623,06	478,971

Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T8 στις 24 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

Πανεπιστήμιο Αιγαίου - Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης
Διπλωματική εργασία ΜΕΔΜΟΔΕ του ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΟΥΛΗ

Fixed at 66 freqs 2198-T8 [48h]

neg.							neg.						
freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F	freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F
100000	3,48064	-0,23842	80,804	80,6549	4,90572	3082350	<u>27,9353</u>	59,7878	-0,01669	1242,32	625,138	1073,57	188436
78038,3	3,18262	-0,02384	81,4977	81,372	4,52463	2218560	<u>21,8003</u>	60,3608	-0,00548	1474,02	728,954	1281,15	175486
60899,7	3,71161	-0,02384	82,0931	81,921	5,31426	2033470	<u>17,0125</u>	60,804	-0,00644	1751,95	854,602	1529,38	163480
47525,1	4,21067	-0,07153	82,8618	82,6382	6,08405	1816750	<u>13,2763</u>	61,0048	-0,00787	2098,44	1017,19	1835,42	153106
37087,8	4,69722	0,023842	83,5701	83,2894	6,84358	1594750	<u>10,3606</u>	60,9362	-0,00834	2515,75	1222,11	2198,96	143147
28942,7	5,23448	-0,07153	84,4041	84,0521	7,70034	1400320	<u>8,08523</u>	60,3306	-0,01121	3022,68	1496,21	2626,39	133423
22586,4	5,86265	-0,11921	85,2176	84,7719	8,70447	1235290	<u>6,30957</u>	59,3294	-0,01168	3627,92	1850,61	3120,42	123707
17626	6,58668	-0,07153	86,1989	85,63	9,88756	1095020	<u>4,92388</u>	57,7199	-0,01264	4351,13	2323,76	3678,65	113809
13755	7,5058	-0,02384	87,2456	86,498	11,3966	984954	<u>3,84251</u>	55,3894	-0,01311	5200,57	2953,9	4280,24	103339
10734,2	8,64943	-0,07153	88,5401	87,5331	13,3154	898055	<u>2,99863</u>	52,3841	-0,01407	6173,17	3767,89	4889,89	92130,2
8376,78	10,0251	-0,07153	89,9691	88,5955	15,6618	824323	<u>2,34008</u>	48,7602	-0,01502	7235,99	4770,06	5441,16	80002,2
6537,09	11,6712	-0,07153	91,7759	89,8785	18,5657	762565	<u>1,82616</u>	44,5015	-0,02027	8356,65	5960,23	5857,41	67208,4
5101,43	13,6622	-0,07153	93,9171	91,2598	22,1829	711035	<u>1,4251</u>	39,7443	-0,02122	9490,4	7297,22	6067,8	54332,2
3981,07	15,954	-0,02384	96,6315	92,9095	26,5606	664382	<u>1,11213</u>	34,7412	-0,0236	10556	8674,24	6015,57	42034,9
3106,76	18,6648	-0,07153	100,142	94,8748	32,0484	625596	<u>0,867884</u>	29,7569	-0,02646	11481,5	9967,54	5698,5	31074,3
2424,46	21,6886	-0,07153	104,68	97,269	38,6855	589310	<u>0,677281</u>	24,8926	-0,0298	12254,6	11116,2	5158,22	21950,7
1892,01	25,2901	-0,07153	110,52	99,9275	47,2143	561277	<u>0,528539</u>	20,6072	-0,02911	12851,2	12028,9	4523,12	15020,8
1476,49	29,1931	0,007153	117,912	102,935	57,5121	533544	<u>0,412463</u>	17,0889	-0,03364	13275,7	12689,5	3901,13	10110,1
1152,23	33,1938	0,021458	128,174	107,259	70,1718	508020	<u>0,321879</u>	14,2011	-0,03498	13578,3	13163,3	3331,11	6736,92
899,179	37,2308	0,021458	141,518	112,677	85,6222	483741	<u>0,251189</u>	11,9385	-0,03626	13787,4	13489,2	2852,08	4501,33
701,704	41,1414	0,026226	159,115	119,828	104,685	461550	<u>0,196023</u>	10,3194	-0,03703	13930,8	13705,5	2495,5	3073,59
547,598	44,8206	0,016689	180,928	128,335	127,534	438801	<u>0,152973</u>	9,25635	-0,03741	14035,3	13852,6	2257,61	2169,92
427,336	47,9921	0,050068	209	139,87	155,298	416980	<u>0,119378</u>	8,77891	-0,03755	14124,4	13959	2155,7	1616,93
333,485	50,6527	0,054836	243,578	154,433	188,363	394686	<u>0,09316</u>	8,85542	-0,03769	14229,2	14059,6	2190,47	1282,18
260,246	52,7552	-0,00715	285,723	172,926	227,452	371924	<u>0,072701</u>	9,05636	-0,03874	14379,2	14200	2263,37	1033,89
203,092	54,3626	0,007153	336,207	195,892	273,243	348675	<u>0,056734</u>	10,0616	-0,04838	14579,9	14355,6	2547,2	908,008
158,489	55,5568	0,016689	396,059	224,007	326,625	325259	<u>0,044275</u>	11,8871	-0,05739	14904,2	14584,6	3070,02	854,033
123,682	56,4419	-0,00715	466,815	258,047	389,009	302306	<u>0,034551</u>	14,0568	-0,05858	15566,6	15100,5	3780,88	820,794
96,5196	57,0738	-0,00715	549,954	298,932	461,616	279947	<u>0,026963</u>	15,5561	-0,05443	16558	15951,5	4440,57	752,294
75,3222	57,6144	-0,01192	646,259	346,146	545,742	258280	<u>0,021042</u>	16,1451	-0,04866	17696,5	16998,5	4920,88	650,579
58,7802	58,115	-0,01192	760,32	401,613	645,596	238436	<u>0,01642</u>	15,9159	-0,0438	18886,7	18162,7	5179,23	534,355
45,871	58,6302	-0,01669	893,7	465,224	763,064	219927	<u>0,012814</u>	15,159	-0,04199	20083,7	19384,8	5251,83	422,847
35,797	59,2085	-0,01669	1052,21	538,643	903,887	203301	<u>0,01</u>	14,016	-0,03779	21346,6	20711,1	5170	324,841

Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T8 στις 48 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

Fixed at 66 freqs 2198-T3 [0h]

neg.							neg.						
freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F	freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F
100000	5,30314	-0,23842	87,8698	87,4937	8,12138	5102810	<u>27,9353</u>	72,6064	-0,03219	13072,2	3907,74	12474,5	2189560
78038,3	6,10254	-0,11921	88,2529	87,7528	9,382	4600270	<u>21,8003</u>	71,11256	-0,03097	16126,7	5216,92	15259,6	2090180
60899,7	7,91777	-0,07153	88,8368	87,9899	12,2374	4682580	<u>17,0125</u>	69,3683	-0,0315	19756,5	6961,4	18489,4	1976390
47525,1	9,98239	-0,16689	89,6964	88,3385	15,5485	4642910	<u>13,2763</u>	67,1967	-0,03154	24169	9367,16	22280	1858540
37087,8	12,5304	-0,07153	90,9251	88,7593	19,7269	4596950	<u>10,3606</u>	64,6623	-0,03197	29345,8	12558,6	26522,8	1726570
28942,7	15,4438	-0,11921	92,7403	89,3917	24,6961	4491030	<u>8,08523</u>	61,6435	-0,03216	35378,6	16803,3	31133,5	1581610
22586,4	19,0286	-0,16689	95,2602	90,0548	31,0586	4407660	<u>6,30957</u>	58,2232	-0,03264	42351,7	22302,9	36003,5	1427330
17626	23,2102	-0,11921	99,1399	91,1161	39,0716	4327080	<u>4,92388</u>	54,3486	-0,03226	50006,3	29146,3	40634	1257120
13755	28,0437	-0,07153	104,603	92,3218	49,1787	4250280	<u>3,84251</u>	49,998	-0,03278	58341,9	37503	44691,2	1078990
10734,2	33,446	-0,11921	112,559	93,9197	62,0368	4184070	<u>2,99863</u>	45,3395	-0,03321	66704,5	46886,9	47445,9	893926
8376,78	39,164	-0,01192	121,28	94,0334	76,5935	4031330	<u>2,34008</u>	40,6141	-0,03369	75086	56998,7	48878	718661
6537,09	45,1296	-0,02623	137,266	96,8417	97,2807	3995680	<u>1,82616</u>	36,0353	-0,0334	82831,9	66982,4	48728,7	559118
5101,43	50,7215	-0,01669	158,849	100,566	122,962	3941330	<u>1,4251</u>	31,5189	-0,03335	89745,2	76504,9	46917	420103
3981,07	55,8127	0,011921	187,216	105,197	154,866	3873790	<u>1,11213</u>	27,6876	-0,03369	95712,3	84752,7	44472,8	310762
3106,76	60,3238	-0,02146	224,752	111,274	195,273	3811800	<u>0,867884</u>	24,4421	-0,03407	100687	91662,2	41661,5	227183
2424,46	64,1385	-0,01192	272,912	119,043	245,58	3741000	<u>0,677281</u>	21,6426	-0,03397	104977	97576,4	38717,2	164760
1892,01	67,3067	-0,00238	334,127	128,906	308,26	3664540	<u>0,528539</u>	19,7069	-0,03426	108830	102455	36698,3	121872
1476,49	69,96	-0,02146	411,755	141,099	386,825	3588600	<u>0,412463</u>	18,3884	-0,03464	112337	106601	35437,6	91839,3
1152,23	71,9295	-0,02623	510,339	158,3	485,167	3512450	<u>0,321879</u>	17,5575	-0,03493	116110	110701	35025,9	70837,3
899,179	73,5223	-0,01669	632,065	179,281	606,106	3424320	<u>0,251189</u>	17,1699	-0,0355	120163	114807	35472,8	55985,5
701,704	74,7847	-0,03099	784,513	205,893	757,013	3337620	<u>0,196023</u>	17,1645	-0,03599	124791	119233	36828,1	45359,3
547,598	75,7577	-0,01669	977,818	240,566	947,764	3260930	<u>0,152973</u>	17,3397	-0,0361	129647	123755	38639,4	37138,6
427,336	76,3928	0,030994	1217,22	286,368	1183,05	3176520	<u>0,119378</u>	17,7053	-0,03616	135641	129216	41251,3	30941,4
333,485	76,7198	-0,036	1513,85	347,751	1473,37	3087220	<u>0,09316</u>	18,1843	-0,03487	142105	135008	44347,3	25958,4
260,246	76,9918	-0,03314	1884,06	424,084	1835,71	3001710	<u>0,072701</u>	18,2021	-0,03598	149836	142338	46804,2	21379,8
203,092	77,1194	-0,02646	2346,79	523,144	2287,73	2919290	<u>0,056734</u>	18,248	-0,03653	158009	150063	49477,6	17637,4
158,489	77,088	-0,0155	2916,99	651,812	2843,23	2831340	<u>0,044275</u>	18,5526	-0,03787	165553	156949	52674,8	14653,3
123,682	76,9087	-0,03457	3629,03	821,988	3534,71	2746890	<u>0,034551</u>	19,051	-0,03793	175555	165940	57302,9	12439,9
96,5196	76,6167	-0,03076	4506,15	1043,02	4383,78	2658540	<u>0,026963</u>	19,2386	-0,03748	186326	175921	61395	10401,2
75,3222	76,1663	-0,03028	5588,15	1336,15	5426,06	2567960	<u>0,021042</u>	19,3571	-0,03749	195744	184679	64880,3	8577,68
58,7802	75,575	-0,03076	6935,18	1727,64	6716,54	2480600	<u>0,01642</u>	19,1839	-0,0359	206540	195071	67862,9	7002,25
45,871	74,7699	-0,03123	8581,94	2254,43	8280,53	2386580	<u>0,012814</u>	19,7085	-0,03448	216094	203436	72874,4	5867,42
35,797	73,8086	-0,03219	10603,8	2956,84	10183,2	2290400	<u>0,01</u>	22,2904	-0,03093	216545	200364	82136	5160,76

Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T3 στις 0 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

Πανεπιστήμιο Αιγαίου - Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης
Διπλωματική εργασία ΜΕΔΜΟΔΕ του ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΟΥΛΗ

Fixed at 66 freqs 2198-T3 [1h]

neg.							neg.						
freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F	freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F
100000	5,56815	-0,23842	88,2164	87,8001	8,5596	5378160	27,9353	73,8691	-0,01311	8445,18	2346,34	8112,69	1423960
78038,3	6,24705	-0,11921	88,833	88,3055	9,66642	4739720	21,8003	73,0286	-0,01359	10458,8	3052,87	10003,4	1370210
60899,7	7,94049	-0,07153	89,762	88,9014	12,4001	4744830	17,0125	71,9554	-0,01311	12895,1	3994,37	12260,9	1310600
47525,1	9,8182	-0,11921	90,8862	89,5551	15,4981	4627880	13,2763	70,5091	-0,01237	15937,9	5317,82	15024,6	1253310
37087,8	11,9396	-0,07153	92,5261	90,5244	19,1418	4460610	10,3606	68,6928	-0,01295	19596	7120,57	18256,5	1188450
28942,7	14,4057	-0,16689	94,7174	91,7393	23,5643	4285220	8,08523	66,3869	-0,01352	24008,2	9616,69	21998	1117520
22586,4	17,2537	-0,16689	97,6316	93,2382	28,9578	4109520	6,30957	63,6901	-0,0139	29241,6	12960,7	26212,5	1039170
17626	20,5086	-0,11921	101,619	95,178	35,6019	3942820	4,92388	60,3415	-0,01428	35364,1	17499,2	30731	950746
13755	24,1176	-0,07153	106,919	97,5856	43,6881	3775760	3,84251	56,29	-0,01481	42393,6	23528	35265,4	851421
10734,2	28,0331	-0,11921	113,914	100,549	53,5375	3610830	2,99863	51,7249	-0,01571	50011	30978,7	39260,9	739713
8376,78	32,1274	-0,00715	121,131	102,582	64,4179	3390500	2,34008	46,581	-0,01638	57944,4	39826,9	42087,7	618822
6537,09	36,635	-0,00715	133,359	107,014	79,5772	3268530	1,82616	41,2544	-0,01647	65568,9	49294	43236,4	496098
5101,43	40,9369	-0,01192	149,018	112,573	97,6409	3129710	1,4251	35,6196	-0,01662	72620,5	59033,3	42294,3	378711
3981,07	45,1609	0,030994	168,978	119,15	119,821	2997170	1,11213	30,3972	-0,01733	78592,8	67789,3	39767,3	277882
3106,76	49,2446	0,002384	194,408	126,916	147,265	2874660	0,867884	25,765	-0,01771	83250,1	74973,7	36187,3	197332
2424,46	52,9725	0,011921	226,021	136,109	180,443	2748750	0,677281	21,7225	-0,01915	86938,6	80764,8	32177	136929
1892,01	56,4249	0,007153	265,776	146,982	221,434	2623280	0,528539	18,6955	-0,01986	89691,6	84959	28749,7	95475,1
1476,49	59,5214	-0,00238	315,996	160,279	272,331	2526440	0,412463	16,4081	-0,02124	92077,6	88327,7	26009,9	67406,6
1152,23	62,2921	0,002384	378,388	175,937	334,998	2425270	0,321879	14,7244	-0,02263	94290,3	91193,7	23965,8	48469
899,179	64,8322	-0,01192	456,165	193,994	412,859	2332530	0,251189	13,5371	-0,0241	96462,1	93782,3	22579,4	35636,3
701,704	66,9033	-0,01192	553,084	216,966	508,751	2243050	0,196023	12,7316	-0,02573	98594,7	96170,6	21728,7	26762,1
547,598	68,8365	-0,01669	673,897	243,298	628,446	2162270	0,152973	12,2475	-0,02782	100968	98670,3	21418,9	20587
427,336	70,3116	0,054836	825,275	278,04	777,028	2086340	0,119378	12,041	-0,03026	103124	100856	21512,9	16136,2
333,485	71,5965	0,054836	1012,33	319,599	960,555	2012700	0,09316	12,2009	-0,03307	105795	103405	22358,6	13087,5
260,246	72,6802	-0,02146	1244,19	370,403	1187,78	1942230	0,072701	12,5282	-0,03622	108754	106165	23591	10776,2
203,092	73,4382	-0,00834	1534,24	437,334	1470,59	1876560	0,056734	12,9319	-0,04127	110786	107976	24793	8838,03
158,489	74,1393	0,004053	1894,03	517,637	1821,92	1814300	0,044275	13,9458	-0,04804	115573	112167	27853,6	7748,45
123,682	74,6097	-0,01645	2343,08	621,837	2259,06	1755560	0,034551	15,5226	-0,05472	120741	116337	32312,7	7014,8
96,5196	74,9496	-0,01216	2901,68	753,474	2802,14	1699360	0,026963	16,6149	-0,06068	126604	121318	36200,7	6132,9
75,3222	75,0854	-0,01216	3589,74	923,922	3468,8	1641660	0,021042	17,255	-0,06895	133818	127796	39693,8	5247,83
58,7802	75,062	-0,01216	4450,71	1147,27	4300,3	1588210	0,01642	17,0319	-0,07505	141893	135670	41560,8	4287,94
45,871	74,8721	-0,01264	5512,35	1438,58	5321,32	1533690	0,012814	16,1439	-0,08551	149114	143234	41461,4	3338,23
35,797	74,4764	-0,01311	6818,53	1824,88	6569,79	1477670	0,01	16,1935	-0,09602	157187	150950	43836,6	2754,33

Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T3 στις 1 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

Fixed at 66 freqs 2198-T3 [3h]

neg.							neg.						
freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F	freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F
100000	6,30616	-0,23842	86,6739	86,1494	9,52036	5981820	27,9353	68,7636	0,014544	7741,23	2804	7215,55	1266490
78038,3	7,09449	-0,11921	87,3632	86,6943	10,7899	5290590	21,8003	67,4425	0,024557	9468,18	3632,09	8743,82	1197680
60899,7	8,87449	-0,11921	88,3642	87,3064	13,632	5216200	17,0125	65,8546	0,025988	11516,5	4710,85	10508,9	1123330
47525,1	10,9006	-0,16689	89,7302	88,1111	16,9685	5066950	13,2763	63,7989	0,029635	14000,2	6181,42	12561,7	1047860
37087,8	13,2019	-0,07153	91,5555	89,1358	20,9098	4872600	10,3606	61,3041	0,032687	16915,4	8122,13	14837,9	965990
28942,7	15,891	-0,16689	94,063	90,4683	25,7552	4683640	8,08523	58,2181	0,030065	20267,1	10674,5	17228,3	875213
22586,4	18,9988	-0,16689	97,3607	92,057	31,6957	4498070	6,30957	54,7299	0,028014	24090,9	13910,9	19668,7	779752
17626	22,4718	-0,11921	101,992	94,2479	38,9843	4317420	4,92388	50,7025	0,023723	28332,1	17944,1	21925,3	678318
13755	26,3498	-0,07153	108,076	96,8472	47,9696	4145790	3,84251	46,1607	0,02358	32770,3	22698	23636,8	570668
10734,2	30,4382	-0,11921	116,285	100,258	58,9107	3973220	2,99863	41,0385	0,024962	37240,7	28089,5	24451	460680
8376,78	34,6648	0,007153	124,915	102,742	71,0486	3739490	2,34008	35,696	0,029016	41322,1	33558,7	24110,8	354505
6537,09	38,9629	-0,00238	139,262	108,284	87,5705	3598580	1,82616	30,8226	0,024819	45222,9	38835,6	23171,4	265870
5101,43	43,0257	0,011921	157,522	115,156	107,481	3445120	1,4251	26,1893	0,025487	48130,1	43189,1	21241,7	192022
3981,07	46,7596	0,035763	180,197	123,446	131,271	3283580	1,11213	22,0556	0,025296	50705	46994,4	19040,1	133046
3106,76	50,148	0,007153	208,391	133,539	159,982	3122910	0,867884	17,884	0,027394	52397,6	49865,8	16090,8	87744,3
2424,46	53,19	0,011921	243,385	145,828	194,861	2968380	0,677281	15,477	0,027299	53679,5	51733	14324,5	60957,7
1892,01	55,9486	0,030994	286,293	160,306	237,204	2819840	0,528539	13,252	0,015998	55422,9	53947	12704,8	42191,5
1476,49	58,4554	0,007153	338,707	177,199	288,657	2677890	0,412463	12,0493	0,020289	56276,9	55037	11748	30445,9
1152,23	60,7251	-0,00238	402,803	196,971	351,359	2543720	0,321879	10,4723	0,021768	56373,5	55434,4	10246,4	20722,6
899,179	62,6027	0,011921	482,572	222,059	428,445	2420590	0,251189	9,86369	0,007176	57309,5	56462,4	9817,39	15494,4
701,704	64,4643	0,016689	579,199	249,677	522,621	2304200	0,196023	9,47659	0,016522	58525,2	57726,5	9635,86	11688
547,598	65,9563	0,011921	699,576	285,03	638,877	2198160	0,152973	7,98448	0,024867	58340,9	57775,4	8103,84	7789,08
427,336	67,2289	0,069141	846,5	327,639	780,522	2095730	0,119378	8,50962	0,028539	57581,3	56947,4	8520,62	6391,08
333,485	68,3642	0,07391	1028,5	379,214	956,04	2003240	0,09316	8,35004	0,033784	60931,4	60285,4	8848,47	5179,39
260,246	69,2905	-0,00238	1252,49	442,916	1171,56	1915700	0,072701	8,04182	0,048184	59787,8	59199,8	8364,06	3820,63
203,092	69,945	0,01359	1527,85	523,933	1435,21	1831410	0,056734	8,57425	0,053096	59978,1	59307,8	8942,19	3187,65
158,489	70,5005	0,025034	1868,24	623,615	1761,09	1753720	0,044275	7,10693	0,085807	58142,2	57695,5	7193,43	2001,1
123,682	70,8839	0,006437	2287,78	749,211	2161,62	1679840	0,034551	3,51312	0,069738	69152,5	69022,5	4237,46	919,913
96,5196	71,0829	0,014067	2805,08	909,408	2653,57	1609260	0,026963	2,39976	0,032401	73565,3	73500,8	3080,28	521,843
75,3222	71,0407	0,017881	3435,52	1116,19	3249,14	1537700	0,021042	12,7578	0,000739	77990,9	76065,5	17222,8	2276,98
58,7802	70,8146	0,020742	4218,18	1386,2	3983,91	1471360	0,01642	13,5863	0,006557	82863,9	80545,1	19465,6	2008,31
45,871	70,3738	0,022173	5169,87	1736,47	4869,52	1403470	0,012814	12,6075	0,005889	87988,8	85867,2	19205,5	1546,31
35,797	69,7041	0,015974	6325,92	2194,26	5933,16	1334480	0,01	11,7974	0,002408	87294,9	85451	17847,6	1121,4

Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T3 στις 3 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

Πανεπιστήμιο Αιγαίου - Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης
Διπλωματική εργασία ΜΕΔΜΟΔΕ του ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΟΥΛΗ

Fixed at 66 freqs 2198-T3 [6h]

neg.								neg.							
freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F	freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F		
100000	5,52008	-0,71526	84,374	83,9827	8,11632	5099630	27,9353	61,275	0,007868	4541,29	2182,57	3982,42	699006		
78038.3	6,04031	-0,11921	85,0552	84,583	8,9502	4388540	21,8003	60,2022	0,008345	5400,22	2683,59	4686,23	641896		
60899.7	7,54587	-0,07153	85,9885	85,2438	11,292	4320810	17,0125	59,0673	0,008345	6388,92	3284,1	5480,24	585799		
47525.1	9,13069	-0,11921	87,1887	86,0839	13,8357	4131470	13,2763	57,7583	0,008821	7557,78	4032,02	6392,41	533238		
37087.8	10,9277	-0,07153	88,7629	87,1534	16,8269	3921150	10,3606	56,3613	0,009298	8905,59	4933,29	7414,32	482654		
28942.7	12,9676	-0,16689	90,8292	88,5127	20,3821	3706530	8,08523	54,7296	0,007868	10469,9	6045,69	8547,98	434246		
22586.4	15,2604	-0,16689	93,4153	90,1214	24,5874	3489310	6,30957	52,8643	0,008821	12298,3	7424,51	9804,27	388683		
17626	17,9536	-0,11921	96,8185	92,104	29,844	3305150	4,92388	50,4351	0,009847	14406,4	9176,16	11105,9	343591		
13755	20,8801	-0,07153	101,105	94,465	36,035	3113440	3,84251	47,5592	0,009847	16769,8	11316,7	12375,7	298789		
10734.2	24,1664	-0,11921	106,748	97,3925	43,7013	2947430	2,99863	44,1513	0,008035	19290,6	13841,1	13437	253165		
8376.78	27,6681	-0,11921	113,932	100,904	52,9042	2784500	2,34008	40,0648	0,008893	21959,2	16805,7	14134,1	207816		
6537.09	31,3775	-0,00715	121,511	103,741	63,2678	2598640	1,82616	35,974	0,007558	24482,4	19813,2	14381,4	165013		
5101.43	35,2505	0,011921	133,329	108,881	76,9508	2466520	1,4251	31,5588	0,007701	26825,5	22858,1	14039,7	125714		
3981.07	39,0891	0,040531	148,378	115,166	93,5568	2340210	1,11213	27,3644	0,007033	28853,3	25624,7	13262,4	92673,4		
3106.76	42,8118	0,016689	167,258	122,699	113,667	2218820	0,867884	23,6513	0,00689	30527	27962,8	12246,5	66780,9		
2424.46	46,3348	0,016689	190,866	131,782	138,07	2103270	0,677281	20,293	0,005603	31917,9	29936,8	11069,8	47107,4		
1892.01	49,5319	0,016689	220,19	142,909	167,514	1991370	0,528539	17,727	0,004983	33058,8	31489,1	10065,8	33427,5		
1476.49	52,473	0,026226	256,64	156,329	203,532	1888180	0,412463	15,6946	0,004697	34055,5	32785,8	9212,34	23874,5		
1152.23	55,0529	0,007153	301,548	172,733	247,173	1789450	0,321879	14,0757	0,004363	34948,2	33898,9	8499,55	17189,7		
899.179	57,2706	0,026226	355,44	192,177	299,008	1689310	0,251189	12,835	0,004554	35761,1	34867,5	7944,11	12537,9		
701.704	59,168	-0,00238	421,695	216,128	362,099	1596470	0,196023	12,0089	0,004745	36505,6	35706,6	7595,48	9354,98		
547.598	60,7381	0,007153	503,22	245,975	439,006	1510470	0,152973	11,538	0,004983	37177,9	36426,6	7436,23	7147,4		
427.336	62,1361	0,064373	602,067	281,389	532,264	1429140	0,119378	11,4037	0,005269	37837,5	37090,6	7481,25	5611,47		
333.485	63,2333	0,069141	722,558	325,41	645,134	1351780	0,09316	11,7259	0,00484	38492	37688,7	7822,72	4578,98		
260.246	64,0543	-0,00715	868,964	380,188	781,381	1277700	0,072701	12,0363	0,004649	39284,3	38420,7	8192,02	3742,05		
203.092	64,6762	0,011921	1048,1	448,31	947,387	1208930	0,056734	13,1459	0,001216	39975,3	38927,7	9091,67	3240,93		
158.489	64,9787	0,021458	1263,97	534,604	1145,35	1140560	0,044275	15,2787	-0,0046	40812,6	39370,1	10754,7	2991,8		
123.682	65,0175	0,000238	1527,41	645,086	1384,5	1075920	0,034551	18,1242	-0,00741	42557,1	40445,6	13238,6	2873,97		
96.5196	64,8151	0,005484	1842,62	784,11	1667,46	1011230	0,026963	20,6121	-0,00484	45373,5	42468,9	15973,2	2706,09		
75.3222	64,4498	0,00596	2216,94	956,17	2000,14	946594	0,021042	22,4861	-0,00031	48662,8	44963,1	18611,5	2460,58		
58.7802	63,8504	0,006437	2667,25	1175,5	2394,25	884259	0,01642	23,3016	0,009465	52566,5	48278,9	20793,8	2151,35		
45.871	63,0944	0,006914	3192,23	1444,55	2846,68	820460	0,012814	24,0499	0,01657	56651,3	51733,4	23087,2	1858,85		
35.797	62,2412	0,007391	3812,73	1775,78	3373,95	758865	0,01	24,4543	0,0242	61220,6	55728,6	25343,3	1592,37		

Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T3 στις 6 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

Fixed at 66 freqs 2198-T3 [12h]

neg.								neg.							
freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F	freq / Hz	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F		
100000	5,47258	-0,23842	86,7376	86,3423	8,27212	5197530	27,9353	56,5566	0,003099	2881,43	1588	2404,36	422019		
78038.3	5,72965	-0,07153	87,5549	87,1175	8,74101	4285970	21,8003	56,6157	0,003099	3399,22	1870,43	2838,35	388783		
60899.7	6,95331	-0,07153	88,5683	87,9169	10,7221	4102760	17,0125	56,4117	0,002146	4011,82	2219,43	3341,98	357234		
47525.1	8,16857	-0,11921	89,8475	88,9359	12,7661	3812060	13,2763	55,8744	0,000715	4758,29	2669,45	3938,96	328578		
37087.8	9,56183	-0,02384	91,3332	90,0643	15,1715	3535410	10,3606	54,8622	0,000238	5637,55	3244,66	4610,22	300114		
28942.7	11,1266	-0,11921	93,1492	91,3983	17,9757	3268930	8,08523	53,2645	-0,00072	6665,17	3986,58	5341,5	271354		
22586.4	12,9741	-0,11921	95,2545	92,8228	21,3856	3084930	6,30957	51,0345	-0,00072	7838,72	4929,4	6094,8	241624		
17626	15,1432	-0,07153	98,0369	94,6327	25,6104	2836290	4,92388	48,1836	-0,00119	9168,41	6112,99	6833,08	211400		
13755	17,6522	-0,07153	101,485	96,7064	30,7741	2659660	3,84251	44,8028	-0,00119	10628,2	7541,06	7489,33	180817		
10734.2	20,4753	-0,07153	105,961	99,2664	37,0654	2499870	2,99863	40,7538	-0,00167	12112,8	9175,69	7907,34	148982		
8376.78	23,5947	-0,07153	111,721	102,381	44,7177	2353620	2,34008	36,3225	-0,00079	13590,5	10949,8	8050,03	118361		
6537.09	26,9037	0,007153	117,582	104,856	53,2048	2185320	1,82616	31,8	-0,00398	14956,2	12711,2	7881,27	90430,4		
5101.43	30,5466	-0,00238	127,219	109,563	64,6578	2072490	1,4251	27,306	-0,00455	16160,3	14359,6	7413,42	66381,2		
3981.07	34,244	0,059605	139,314	115,164	78,3946	1960950	1,11213	23,0246	-0,00651	17141,7	15776,1	6704,56	46849,4		
3106.76	37,8289	0,011921	154,678	122,171	94,8647	1851790	0,867884	19,2147	-0,00832	17916,1	16918,1	5896,36	32153,3		
2424.46	41,2438	0,002384	173,559	130,501	114,421	1743020	0,677281	15,7637	-0,01023	18512,6	17816,3	5029,31	21402,2		
1892.01	44,4688	0,026226	197,399	140,87	138,282	1643870	0,528539	13,0946	-0,01166	18936,8	18444,4	4290,31	14247,7		
1476.49	47,3944	0,016689	226,656	153,434	166,826	1547650	0,412463	10,9527	-0,01323	19250,2	18899,6	3657,5	9478,71		
1152.23	50,0168	0,011921	262,441	168,635	201,091	1455830	0,321879	9,25498	-0,01466	19475,8	19222,3	3132,26	6334,76		
899.179	52,1755	0,011921	306,612	188,029	242,191	1368310	0,251189	8,01502	-0,01547	19658,2	19466,2	2741	4326,02		
701.704	53,9269	0,016689	359,981	211,963	290,961	1282830	0,196023	7,19265	-0,01585	19787	19631,2	2477,45	3051,35		
547.598	55,2325	-0,00238	424,154	241,873	348,431	1198880	0,152973	6,72979	-0,01676	19887,1	19750,1	2330,52	2240		
427.336	56,248	0,059605	501,235	278,486	416,752	1118990	0,119378	6,67065	-0,01667	19982,8	19847,5	2321,24	1741,1		
333.485	56,8857	0,059605	592,781	323,842	496,503	1040350	0,09316	7,00092	-0,01643	20098,4	19948,6	2449,7	1433,92		
260.246	57,1281	-0,00715	700,697	380,312	588,506	962311	0,072701	7,43597	-0,01714	20244,7	20074,4	2620,03	1196,81		
203.092	57,1004	0,007153	827,116	449,263	694,466	886183	0,056734	8,57601	-0,02491	20419,1	20190,8	3044,93	1085,43		
158.489	56,9173	0,016689	973,252	531,248	815,472	812062	0,044275	10,6085	-0,03316	20718,1	20364	3814,16	1061,04		
123.682	56,5994	-0,00238	1140,65	627,913	952,26	740020	0,034551	13,0993	-0,03603	21459,8	20901,4	4863,65	1055,85		
96.5196	56,1942	0,004053	1332,42	741,331	1107,15	671430	0,026963	15,0535	-0,03269	22666,6	21888,8	5887	997,339		
75.3222	56,0119	0,004053	1551,31	867,212	1286,27	608745	0,021042	16,0967	-0,0272	24085,9	23141,6	6678,05	882,889		
58.7802	55,9837	0,004053	1807,61	1011,23	1498,29	553359	0,01642	16,4623	-0,02167	25594,2	24545	7252,99	748,31		
45.871	56,1408	0,003576	2103,89	1172,19	1747,09	503539	0,012814	16,2245	-0,01814	27142,1	26061,1	7583,53	610,582		
35.797	56,365	0,003099	2456,8	1360,82	2045,49	460069	0,01	15,5722	-0,01609	28751,4	27696,1	7718,38	484,96		

Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T3 στις 12 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

Πανεπιστήμιο Αιγαίου - Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης
Διπλωματική εργασία ΜΕΔΜΟΔΕ του ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΟΥΛΗ

Fixed at 66 freqs 2198-T3 [24h]

freq / Hz	neg.						freq / Hz	neg.					
	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F		Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F
100000	5,33833	-0,23842	87,0123	86,6349	8,09534	5086450	27,9353	55,4601	-0,00072	2194,58	1244,28	1807,75	317301
78038.3	5,49171	-0,07153	87,9003	87,4968	8,41222	4124750	21,8003	55,6254	-0,00167	2587,51	1460,91	2135,63	292528
60899.7	6,55746	-0,07153	88,8724	88,2909	10,1492	3883530	17,0125	55,3748	-0,00262	3046,63	1731,11	2507,03	267984
47525.1	7,69979	-0,07153	90,016	89,2044	12,0606	3601400	13,2763	54,814	-0,0031	3594,48	2071,26	2937,72	245057
37087.8	8,97277	-0,07153	91,3137	90,1962	14,2417	3318740	10,3606	53,9132	-0,00358	4231,1	2492,16	3419,26	222585
28942.7	10,3909	-0,11921	92,9494	91,425	16,7647	3048690	8,08523	52,6062	-0,00548	4968,08	3017,06	3947,04	200514
22586.4	12,1365	-0,11921	94,9835	92,8606	19,9695	2833950	6,30957	50,9048	-0,00596	5813,87	3666,29	4512,14	178880
17626	14,1022	-0,07153	97,5028	94,5643	23,7568	2631000	4,92388	48,7367	-0,00644	6776,84	4469,46	5094,06	157598
13755	16,475	-0,07153	100,609	96,4788	28,5325	2465930	3,84251	46,1238	-0,00739	7844,69	5437,17	5654,76	136524
10734.2	19,1285	-0,07153	104,654	98,8754	34,2938	2312940	2,99863	42,9643	-0,00787	9003,44	6588,52	6136,23	115612
8376.78	22,1157	-0,07153	109,956	101,866	41,3961	2178790	2,34008	39,3918	-0,00834	10223,7	7901,1	6488,14	95396,1
6537.09	25,2703	-0,07153	116,725	105,555	49,8288	2046660	1,82616	35,4376	-0,01121	11417,3	9302,21	6619,94	75957,8
5101.43	28,6407	0,002384	124,396	109,175	59,6247	1911170	1,4251	31,1767	-0,01109	12576,9	10760,5	6510,81	58299
3981.07	32,08	0,026226	135,67	114,954	72,0546	1802360	1,11213	26,9598	-0,01361	13594,1	12116,8	6163,1	43065,9
3106.76	35,3901	0,007153	149,85	122,162	86,7841	1694060	0,867884	22,9187	-0,01633	14441,5	13301,5	5623,86	30667,3
2424.46	38,5501	0,007153	167,254	130,803	104,232	1587810	0,677281	18,9806	-0,019	15133,1	14310,3	4922,01	20945,5
1892.01	41,305	0,021458	189,029	142	124,772	1483270	0,528539	15,8089	-0,02129	15630,7	15039,5	4258,28	14141,3
1476.49	43,8507	0,011921	215,394	155,331	149,221	1384330	0,412463	13,1858	-0,02301	15992,3	15570,7	3648,01	9454,12
1152.23	45,8406	0,007153	247,323	172,299	177,43	1284540	0,321879	11,1231	-0,02425	16244,1	15938,9	3133,77	6337,81
899.179	47,3635	0,016689	285,1	193,111	209,738	1184960	0,251189	9,58429	-0,02539	16416,9	16187,7	2733,38	4314
701.704	48,6071	0,002384	330,04	218,228	247,593	1091260	0,196023	8,55878	-0,02635	16525,9	16341,9	2459,45	3029,18
547.598	49,2655	0,021458	382,509	249,608	289,842	997249	0,152973	8,06789	-0,02687	16634,6	16470	2334,61	2243,93
427.336	49,9313	0,059605	442,193	284,642	338,399	908611	0,119378	8,06254	-0,02744	16737	16571,5	2347,43	1760,74
333.485	50,2466	0,059605	510,52	326,47	392,49	822404	0,09316	8,47502	-0,0282	16858,9	16674,8	2484,63	1454,36
260.246	50,4199	-0,01192	587,781	374,508	453,023	740772	0,072701	9,08039	-0,02902	17043,1	16829,5	2689,75	1228,66
203.092	50,6563	0,007153	674,964	427,908	521,988	666090	0,056734	10,3619	-0,03564	17303,4	17021,2	3112,29	1109,45
158.489	50,9922	0,016689	774,252	487,334	601,641	599125	0,044275	12,4679	-0,04299	17704,6	17287,1	3822,29	1063,3
123.682	51,4877	-0,007153	889,261	553,728	695,824	540738	0,034551	14,8951	-0,04504	18512	17890	4758,52	1033,03
96.5196	52,1834	-0,01192	1023,38	627,47	808,444	490281	0,026963	16,6169	-0,04113	19704,6	18881,7	5634,93	954,636
75.3222	52,9553	-0,01192	1180,85	711,391	942,517	446059	0,021042	17,2727	-0,03664	21098	20146,5	6264,41	828,204
58.7802	53,7035	-0,00119	1370,23	811,125	1104,35	407868	0,01642	17,1216	-0,03412	22537,1	21538,3	6634,94	684,545
45.871	54,4672	-0,00119	1596,38	927,767	1299,11	374424	0,012814	16,4069	-0,03364	23951,8	22976,5	6765,34	544,705
35.797	55,1162	-0,00167	1867,21	1067,89	1531,7	344509	0,01	15,1233	-0,03407	25325,9	24448,8	6607,44	415,158

Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T3 στις 24 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

Fixed at 66 freqs 2198-T3 [48h]

freq / Hz	neg.						freq / Hz	neg.					
	Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F		Phase / °	Idc / uA	Z / Ohm	Z' / Ohm	Z'' / Ohm	Cs / F
100000	5,7473	-0,23842	89,8991	89,4472	9,0026	5656500	27,9353	55,8376	0,003099	1894,59	1063,89	1567,68	275164
78038.3	5,94175	-0,07153	90,8953	90,407	9,40923	4613620	21,8003	56,6424	0,003099	2238,39	1230,81	1869,63	256092
60899.7	6,94475	-0,02384	92,103	91,4273	11,1364	4261270	17,0125	57,0981	0,002146	2646,8	1437,75	2222,25	237543
47525.1	8,0535	-0,07153	93,4259	92,5045	13,0888	3908420	13,2763	57,1812	0,001669	3136,66	1700,02	2636,02	219890
37087.8	9,28611	-0,02384	95,0322	93,7868	15,3348	3573470	10,3606	56,9572	0,001669	3710,38	2023,14	3110,27	202471
28942.7	10,6529	-0,11921	96,8212	95,1525	17,8982	3254820	8,08523	56,4543	-0,00024	4380,59	2420,73	3650,99	185474
22586.4	12,234	-0,11921	99,0158	96,7672	20,9818	2977620	6,30957	55,7352	-0,00072	5158,48	2904,32	4263,2	169011
17626	14,0853	-0,02384	101,812	98,7506	24,7774	2744030	4,92388	54,8264	-0,00119	6077,01	3500,69	4967,41	153680
13755	16,3521	-0,02384	105,141	100,888	29,6015	2558320	3,84251	53,5874	-0,00167	7158,52	4249,27	5760,92	139087
10734.2	18,7592	-0,07153	109,546	103,727	35,2291	2376020	2,99863	51,997	-0,00262	8402,72	5173,57	6621,16	124749
8376.78	21,5419	-0,02384	114,949	106,919	42,207	2211470	2,34008	49,8008	-0,00262	9852,16	6359,05	7525,12	110643
6537.09	24,4494	-0,01192	120,719	109,894	49,9645	2052230	1,82616	47,0905	-0,00596	11446,2	7793,09	8383,57	96193,9
5101.43	27,5886	-0,002384	129,832	115,069	60,1276	1927290	1,4251	43,686	-0,00536	13206,9	9550,39	9122,08	81680,8
3981.07	30,7722	0,040531	141,203	121,322	72,243	1807070	1,11213	39,7572	-0,00713	15017,3	11544,7	9604,08	67110,4
3106.76	33,8196	0,016689	155,297	129,019	86,4349	1687240	0,867884	35,5333	-0,00923	16746,5	13627,9	9732,65	53072,9
2424.46	36,6022	0,016689	172,823	138,741	103,047	1569750	0,677281	30,964	-0,0118	18349,3	15734,3	9440,69	40174,7
1892.01	39,0898	0,026226	193,954	150,539	122,296	1453830	0,528539	26,8838	-0,01385	19689,6	17561,7	8903,31	29567,1
1476.49	41,1582	0,011921	219,598	165,335	144,526	1340780	0,412463	23,2271	-0,01533	20803,1	19117	8204,27	21262
1152.23	42,9187	0,026226	250,24	183,256	170,403	1233660	0,321879	20,1595	-0,01662	21679,6	20351,5	7471,56	15110,7
899.179	44,2009	0,007153	286,031	205,056	199,414	1126630	0,251189	17,1717	-0,01776	22381,4	21319,8	6811,25	10750
701.704	45,114	0,002384	326,878	230,677	231,597	1021100	0,196023	15,9455	-0,01814	22956,1	22072,9	6306,57	7767,49
547.598	45,853	0,002384	373,759	260,323	268,193	922759	0,152973	14,7433	-0,019	23474,8	22701,9	5974,09	5742,05
427.336	46,0555	0,059605	426,728	296,132	307,249	824973	0,119378	14,1692	-0,01996	23943,4	23215	5860,99	4396,17
333.485	46,294	0,064373	486,642	336,249	351,791	737126	0,09316	14,1476	-0,02038	24433,3	23692,2	5971,99	3495,67
260.246	46,4838	-0,007153	552,334	380,315	400,541	654955	0,072701	14,4249	-0,02234	24976,6	24189,2	6221,95	2842,14
203.092	46,7748	0,011921	626,244	428,897	456,327	582302	0,056734	15,4232	-0,03006	25604,9	24682,8	6809,56	2427,42
158.489	47,2609	0,021458	708,558	480,868	520,399	518222	0,044275	17,5179	-0,03989	26392,3	25168,3	7944,21	2209,96
123.682	48,022	-0,002384	802,146	536,512	596,317	463409	0,034551	20,2158	-0,04499	27826,4	26112,2	9615,6	2087,46
96.5196	49,0922	-0,007153	911,177	596,678	688,636	417623	0,026963	22,3519	-0,04652	30039,1	27782,2	11423,7	1935,33
75.3222	50,3565	-0,007153	1038,77	662,746	799,884	378556	0,021042	23,4863	-0,04799	32767,1	30052,5	13058,6	1726,45
58.7802	51,8344	-0,007153	1194,44	738,091	939,105	346836	0,01642	23,6299	-0,05038	35720,7	32725,6	14317,8	1477,21
45.871	53,2887	0,003099	1382,6	826,493	1108,37	319450	0,012814	23,0603	-0,05481	38830	35727,3	15209,7	1224,59
35.797	54,6726	0,002623	1612,31	932,317	1315,42	295864	0,01	21,8322	-0,06239	41947,6	38939	15599,9	980,169

Πίνακας μετρήσεων για το κράμα AA2198-T3 στις 48 ώρες έκθεσης στο διάλυμα.

