

Πολητεχνείο Κρητής Τμημα Μηχανικών Οργκτών Πορών

<u>Μεταπτυχιακή Διατριβή</u>

Διερεύνηση Διηλεκτρικής Συμπεριφοράς Μαρμαρου Διονύσου Σε Σύνθηκες Κυκλικής Αξονικής Φορτισής Και Καμψής Τρίων Σημείων

Μητριτσακής Νικός Μηχανικός Οργκτών Πορών

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής	Ζ. Αγιουταντής (Επιβλεπων)
Καθηγητής	Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ
Καθηγητής	Δ. Τριαντής (ΤΕΙ Αθηνών)

ΧΑΝΙΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των διηλεκτρικών χαρακτηριστικών δοκιμίων Διονυσιακού μαρμάρου, κάτω από την επίδραση μονοαξονικής φόρτισης και κάμψης τριών σημείων, μέχρι το στάδιο της αστοχίας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας και οι παράμετροι που μελετήθηκαν είναι η αγωγιμότητα (ac), το πραγματικό και φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς καθώς και η εφαπτομένη της γωνίας απωλειών (tanδ). Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια με φυσική υγρασία και μετά από ξήρανση, σε αφόρτιστη κατάσταση αλλά και έπειτα από κάθε φόρτισή τους.

Τα αποτελέσματα των διηλεκτρικών μετρήσεων επικεντρώθηκαν κυρίως σε δυο χαρακτηριστικές συχνότητες των 10 kHz και 100kHz, στις οποίες εντοπίστηκε μεγαλύτερη ευαισθησία. Υπολογίστηκε η μέση τιμή της ποσοστιαίας μεταβολής τους ως προς τις τιμές που αντιστοιχούν σε μηδενική φόρτιση και δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματά τους σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη τάση. Ειδικότερα για τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε κάμψη, μετρήθηκαν και αξιολογήθηκαν οι παραπάνω παράμετροι για τις τρεις χαρακτηριστικές περιοχές της κάμψης (περιοχή θλίψης, ουδέτερη ζώνη και περιοχή εφελκυσμού).

Στόχος της εργασίας είναι να εξαχθούν συμπεράσματα για το αν η μέθοδος της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά σαν ένα εργαλείο μη καταστροφικού ελέγχου για την ανάλυση και ποσοτικοποίηση των ασυνεχειών που υφίστανται στο εσωτερικό των γεωυλικών, όταν αυτά έχουν υποστεί μηχανική καταπόνηση.

ABSTRACT

The main purpose of this study is to determine the change of the basic dielectric characteristics on Dionyssos marble specimens. The technique of Dielectric Spectroscopy (DS) or Impedance Spectroscopy (IS) was applied on these specimens in order to investigate the influence of previously applied uniaxial compressive loads and three point bending loads up to fracture. Parameters that were measured included the ac conductivity, the real and the imaginary parts of the complex relative permittivity and tanð. The dielectric measurements was conducted on dry and saturated samples which were successively subjected to higher levels of mechanical stress.

The experimental procedure was focused on the frequencies of 10kHz and 100kHz, due to the higher susceptibility of dielectric characteristics at these frequencies. The mean value of their percentage change was calculated with respect to the values that correspond to null charge and the corresponding diagrams in connection with the applied stress were created. More specifically for the specimens that were loaded in bending, the dielectric parameters for the three characteristic regions of bending (compression zone, neutral area and drawing zone), were measured and evaluated.

The results of this study can be used to determine whether the method of dielectric spectroscopy can be used as non destructive control method for the analysis and quantification of discontinuities that are present inside geomaterials, when they are subjected to mechanical stress.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Μετά το πέρας της μεταπτυχιακής διατριβής με τίτλο «Διερεύνηση διηλεκτρικής συμπεριφοράς μαρμάρου Διονύσου σε συνθήκες κυκλικής αξονικής φόρτισης και κάμψης τριών σημείων», αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην διεκπεραίωσή της. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης Δρ. Αγιουτάντη Ζαχαρία για την άψογη συνεργασία που είχαμε σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Ένα επίσης ευχαριστώ στον Καθηγητή Δρ. Τριάντη Δήμο του Τμήματος Ηλεκτρονικής του ΤΕΙ Αθηνών, για την δυνατότητα που μου έδωσε για την εκπόνηση των διηλεκτρικών μετρήσεων στο Εργαστήριο Μελέτης Ηλεκτρικών Ιδιοτήτων Υλικών του τμήματος Ηλεκτρονικής του ΤΕΙ Αθήνας. Σημαντική ήταν και η βοήθειά του στην επεξεργασία και ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής.

Σημαντική ήταν και η συμβολή του Δρ. Σταύρακα Ηλία επιστημονικού συνεργάτη του Τμήματος Ηλεκτρονικής του ΤΕΙ Αθηνών και του επιστημονικού συνεργάτη του Εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης Μαυριγιαννάκη Στυλιανού για την βοήθεια τους στην εκπόνηση και επεξεργασία όλων των πειραματικών μετρήσεων της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Καθηγητή Δρ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο, για την συμμετοχή του στην τριμελή συμβουλευτική και εξεταστική επιτροπή.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου παρείχαν, όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1⁰: $ΕΙΣΑΓΩΓΗ$						
КЕФ	ΑΛΑ	4IO 2 ⁰	Θ: ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	4		
-	2.1	Το Δι	ονυσιακό μάρμαρο	4		
		2.1.1	Φυσικές ιδιότητες	4		
		2.1.2	Μηχανικές ιδιότητες	4		
4	2.2	2 Αντοχή του πετρώματος σε θλίψη		6		
		2.1.2	Το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης	8		
4	2.3 Θεωρία κάμψης			12		
		2.3.1	Διαμήκεις παραμορφώσεις σε δοκούς	13		
		2.3.2	Διατμητικές τάσεις σε δοκούς ορθογωνικής διατομής	16		
		2.3.3	Μέγιστη αντοχή σε κάμψη τριών σημείων	19		
КЕФ	ΑΛΑ	4IO 3 ⁰	Ο: ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ			
-	3.1	Γενικά	ά, πλεονεκτήματα - εφαρμογές	20		
-	3.2	Γενικοί ορισμοί				
-	3.3	Η διηλ	Δεκτρική απόκριση σε πεδίο συχνοτήτων	24		
-	3.4	Εξάρτ	ηση της διηλεκτρικής σταθεράς από θερμοκρασία, πίεση και			
		υγρασ	ία	27		
КЕФ	ΑΛΑ	4IO 4 ⁰	Ο: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	32		
2	4.1	Εισαγ	ωγικά	32		
2	4.2	Παρασ	σκευή δοκιμίων	32		
2	4.3	Εργαστηριακός εξοπλισμός				
		4.3.1	Σύστημα φόρτισης MTS-815	35		
		4.3.2	Σύστημα φόρτισης Tri-Scan	39		
		4.3.3	Γέφυρα διηλεκτρικών μετρήσεων Agilent 4284A			
2	4.4	Πειρα	ματική διαδικασία	45		
		4.4.1	Όρια θραύσης δοκιμίων	51		
		4.4.2	Μονοαξονική φόρτιση δοκιμίων	53		
		4.4.3	Κάμψη τριών σημείων	54		
		4.4.4	Διηλεκτρικές μετρήσεις	13		

КЕФАЛ	ΑΙΟ 5⁰: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	59
5.1	Διηλεκτρική φασματοσκοπία σε μάρμαρο	59
5.2	Αποτελέσματα δοκιμίων μονοαξονικής φόρτισης	62
5.3	Αποτελέσματα δοκιμίων κάμψης τριών σημείων	67
КЕФА Л 6.1	ΔΑΙΟ 6⁰: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ Συμπεράσματα	
6.2	Προτάσεις	
ΒΙΒΛΙΟ	ΟΓΡΑΦΙΑ	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1⁰ ειςαγωγή

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της διηλεκτρικής συμπεριφοράς δοκιμίων Διονυσιακού μαρμάρου, κάτω από την επίδραση της σταδιακά αυξανόμενου φορτίου μονοαξονικής φόρτισης και κάμψης τριών σημείων.

Η ανάγκη εκπόνησης αυτής της διατριβής προήλθε από προηγούμενες αντίστοιχες έρευνες σε άλλα γεωυλικά. Σε μία προγενέστερη έρευνα μελετήθηκε η εξάρτηση των διηλεκτρικών παραμέτρων κατά την φάση της μεταμόρφωσης του ασβεστίτη εντός κυλινδρικού θαλάμου με ελεγγόμενη μεταβολή της θερμοκρασίας 600 - 1200°C και της πίεσης 0.5 - 2.5 GPa. Μελετήθηκε η συμπεριφορά της αγωγιμότητας στα διαστήματα θερμοκρασιών και πιέσεων που προαναφέρθηκαν (Bagdassarov, 2003). Σε άλλη προγενέστερη έρευνα μελετήθηκε η συμπεριφορά των διηλεκτρικών χαρακτηριστικών σαν συνάρτηση της συχνότητας, σε δοκίμια διαφορετικής πυκνότητας ασβεστιτικού κονιάματος (Dervos, 2005). Δοκίμια διαφορετικού ποσοστού υγρασίας από μάρμαρο και γρανίτη μελετήθηκαν με την μέθοδο της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας $(10^{-2} - 10^6 \text{ Hz})$ σε θερμοκρασία δωματίου, για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν την σχέση των διηλεκτρικών παραμέτρων με την συχνότητα και του ποσοστού εφίδρωσης των δοκιμίων (Vassilikou – Dova, 2000). Πρόσφατες μετρήσεις έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι όταν σε δείγματα μαρμάρου εφαρμοστεί μονοαξονική θλίψη σε επίπεδα που το υλικό οδηγείται στην crack propagation zone (cpz), παρατηρείται μείωση της (ac) αγωγιμότητας (Anastasiadis C. et al, 2005). Αντίστοιχα συμπεράσματα διαπιστώνονται όταν εφαρμοστή η τεχνική των ισόθερμων ρευμάτων αποπόλωσης (Stavrakas I. Et al, 2005).

Έπειτα από μελέτη των προηγούμενων αναφορών, θεωρήθηκε αναγκαία η διερεύνηση υπόστασης της υπόθεσης, ότι μέσα από τα αποτελέσματα της επεξεργασίας διηλεκτρικών μετρήσεων σε δείγματα Διονυσιακού μαρμάρου, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το αν η μέθοδος της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά για την ανάλυση και ποσοτικοποίηση των ασυνεχειών που υφίστανται στο εσωτερικό των γεωυλικών. Για αυτό το σκοπό ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία:

1

- Αρχικά παρασκευάστηκαν δύο διαφορετικών διαστάσεων δοκίμια από Διονυσιακό μάρμαρο. Τα δοκίμια με διαστάσεις 38mm x 20mm x 9mm προορίζονταν για μονοαξονική θλίψη, ενώ αυτά με διαστάσεις 100mm x 26mm x 10mm για κάμψη τριών σημείων. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για μονοαξονική φόρτιση ήταν δυο ειδών. Αυτά που οι στρώσεις τους είναι κάθετες προς την διεύθυνση της μονοαξονικής φόρτισης και αυτά που οι στρώσεις τους είναι παράλληλες.
- Έξι δοκίμια από το κάθε είδος χρησιμοποιήθηκαν για να μετρηθεί η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη τριών σημείων. Από την ελάχιστη τιμή για κάθε είδος δοκιμίου καθορίστηκαν τα επίπεδα διαδοχικών φορτίσεων τους.
- Σε όλα τα δοκίμια πραγματοποιήθηκαν διηλεκτρικές μετρήσεις, πριν από την οποιαδήποτε καταπόνησή τους, με σκοπό οι τιμές των διηλεκτρικών παραμέτρων που υπολογίστηκαν να χρησιμοποιηθούν σαν σημείο αναφοράς για την περαιτέρω επεξεργασία. Σε κάθε δοκίμιο έγιναν δυο μετρήσεις, μία με την παρουσία της φυσικής του υγρασίας και μία έπειτα από ξήρανσή τους σε φούρνο.
- Στη συνέχεια κάθε είδος δοκιμίου φορτίστηκε μέχρι το φορτίο να ανέλθει σε κάποιο επίπεδο, το οποίο έχει προκαθοριστεί από την μέτρηση της αντοχής τους.
- Σε όλα τα δοκίμια πραγματοποιήθηκαν ξανά διηλεκτρικές μετρήσεις με και χωρίς την παρουσία της φυσικής τους υγρασίας.
- Τα δύο προηγούμενα στάδια επαναλήφθηκαν με σταδιακή αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου μέχρι την αστοχία τους.
- Συγκεντρώθηκαν οι τιμές των διηλεκτρικών παραμέτρων (αγωγιμότητας, πραγματικού και φανταστικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς, καθώς και της γωνίας απωλειών) για τις συχνότητες των 10 kHz και 100 kHz. Οι τιμές αυτές κανονικοποιήθηκαν ως προς τις αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων των ασυμπίεστων δοκιμίων.
- Τέλος δημιουργήθηκαν διαγράμματα των διηλεκτρικών παραμέτρων σαν συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης, από τα οποία μπορούν να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα.

Σε προγενέστερες εργαστηριακές δοκιμές έχει διερευνηθεί η μηχανική συμπεριφορά του Διονυσιακού μαρμάρου κάτω από θλιπτικά εντατικά πεδία και κάτω από καμπτικά φορτία. Έχει αποδειχτεί ότι τα φορτία αυτά δημιουργούν διατμητικές και εφελκυστικές τάσεις στο εσωτερικό του μαρμάρου. Όταν κατά την επιβολή θλιπτικής ή καμπτικής καταπόνησης, η τιμή της τάσης εισέλθει στην περιοχή των μόνιμων παραμορφώσεων, αρχίζουν να δημιουργούνται μικρορωγμές στο εσωτερικό του μαρμάρου. Καθώς αυξάνεται η τιμή της τάσης οι ασυνέχειες αυτές αυξάνονται σε αριθμό και σε μέγεθος μέχρι την τελική αστοχία του μαρμάρου.

Η έρευνα αυτή παρουσιάζει μία πρώτη ένδειξη ότι η μέθοδος της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ποσοτικοποίηση των ασυνεχειών που υφίστανται στο εσωτερικό των γεωυλικών. Τα στοιχεία που προκύπτουν από αυτή την μελέτη, δείχνουν ότι η διηλεκτρική φασματοσκοπία μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο μη καταστροφικού ελέγχου της εντατικής κατάστασης του εσωτερικού διαφόρων υλικών.

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι ένα σκέλος της παρούσας εργασίας και ιδιαίτερα όσο αφορά την μέθοδο καταπόνησης με κάμψη τριών σημείων, ανακοινώθηκε στο 9th European Conference Nondestructive Testing (ECNDT) – (Berlin, 2006).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2⁰

ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1 Το Διονυσιακό μάρμαρο

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του Διονυσιακού μαρμάρου, που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και κάμψης τριών σημείων. Το μάρμαρο αυτό χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά στις εργασίες συντήρησης του Παρθενώνα, εξαιτίας της ομοιότητας των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του με το Πεντελικό μάρμαρο. Ως γνωστόν το Πεντελικό μάρμαρο χρησιμοποιήθηκε από τους αρχαίους Έλληνες για την κατασκευή του Παρθενώνα.

2.1.1 Φυσικές ιδιότητες

Το χρώμα του Διονυσιακού μαρμάρου είναι λευκό με λίγες στακτόχρωμες φλέβες κατά τη διεύθυνση της σχιστότητας του υλικού. Λόγω της παρουσίας μικρών ποσοτήτων μοσχοβίτη και χλωρίτη εντοπίζονται τοπικά ασημόχρωμες περιοχές. Το Διονυσιακό μάρμαρο αποτελείται από 98% ασβεστίτη, 0,5% μοσχοβίτη, 0,3% σερικίτη, 0,2% χαλαζία και 0,1% χλωρίτη. Έχει πυκνότητα 2717 kg/m³ και συντελεστή απορρόφησης κατά βάρος περίπου 0,11%. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι περίπου 9x10^{-6/o}C μεταξύ 15°C και 100°C. Το πορώδες είναι ιδιαίτερα χαμηλό και κυμαίνεται μεταξύ 0,3% στην παρθενική του κατάσταση και 0,7% μετά την επίδραση διαφόρων φυσικών ή και τεχνητών διαβρωτικών παραγόντων. Το μέγεθος των κόκκων είναι της τάξεως των 0,43x10⁻³ m, οι κρύσταλλοι του έχουν πολυγωνικό σχήμα με διαστάσεις μεταξύ 900 μm x 650 μm και 950 μm x 874 μm και είναι σχεδόν ομοιόμορφοι όσον αφορά τις διαστάσεις τους (Βαρδουλάκης, 2002).

2.1.2 Μηχανικές ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες του Διονυσιακού μαρμάρου ποικίλουν εντός ευρέων ορίων. Το μέτρο ελαστικότητας του κυμαίνεται από 23 GPa έως 90 GPa, ενώ οι τιμές

της αντοχής σε εφελκυσμό μεταξύ 2,4 MPa και 19,4 MPa. Αντίστοιχα ποικίλουν τα όρια αντοχής σε θλίψη και κάμψη, όπως μετρήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Η διασπορά αυτή οφείλεται κυρίως στην ανισοτροπία του Διονυσιακού μαρμάρου και κατά δεύτερο λόγο στις διαφορετικές συνθήκες με τις οποίες διεξάγονται τα πειράματα. Όπως παρατηρήθηκε το Διονυσιακό μάρμαρο έχει τρεις διευθύνσεις ανισοτροπίας, μία κάθετη στις στρώσεις (rift plane ή verso ή Π-plane) και δύο εντός του επιπέδου των στρώσεων (grain plane ή secondo ή M-plane και head-grain plane ή contro ή k-plane), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 (Βαρδουλάκης, 2002).



Σχήμα 2.1: Η ανισοτροπία του Διονυσιακού μαρμάρου και η διεθνής σχετική ορολογία για τα δοκίμια (Βαρδουλάκης, 2002).

Όμως, από μία σειρά πειραμάτων άμεσου εφελκυσμού, προέκυψε ότι οι μηχανικές ιδιότητες κατά τις δύο διευθύνσεις ανισοτροπίας (αυτές κατά τα επίπεδα grain και head grain στο σχήμα 2.1) είναι παραπλήσιες, όπως φαίνεται και στον πίνακα (2.1), όπου καταγράφονται οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας Ε, του λόγου Poisson v και της εφελκυστικής αντοχής σ_f. Η παρατήρηση αυτή δικαιολογεί την άποψη ότι το Διονυσιακό μάρμαρο μπορεί να θεωρείται ως εγκαρσίως ισότροπο υλικό με έναν άξονα (τον κάθετο στις στρώσεις) και επομένως η μηχανική του συμπεριφορά περιγράφεται με τη χρήση πέντε σταθερών. Των δύο μέτρων ελαστικότητας, Ε και Ε΄, στο επίπεδο εγκάρσιας ισοτροπίας και κάθετα σε αυτό, των δύο λόγων Poisson, v και v΄, οι οποίοι περιγράφουν την εγκάρσια ανταπόκριση των παραμορφώσεων εντός του επιπέδου ισοτροπίας σε εφελκυστικές φορτίσεις παραλλήλως και καθέτως σε αυτό και του μέτρου διατμήσεως, G, σε επίπεδα κάθετα στο επίπεδο ισοτροπίας (Βαρδουλάκης, 2002).

	E (GPa)	ν	σ_{f} (MPa)
Ισχυρή διεύθυνση (1)	84,5	0,26	10,8
Ενδιάμεση διεύθυνση (2)	79,5	0,26	9,5
Ασθενής διεύθυνση (3)	50,0	0,11	5,3

Πίνακας 2.1: Οι μηχανικές ιδιότητες του Διονυσιακού μαρμάρου (Βαρδουλάκης, 2002)

2.2 Αντοχή του πετρώματος σε θλίψη

Η μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος κάτω από θλιπτικά εντατικά πεδία και η αντοχή του, προκύπτει από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών θλιπτικών δοκιμών σε ακέραιο πέτρωμα. Από τη μελέτη του δισδιάστατου εντατικού πεδίου ένα θλιπτικό σύστημα δυνάμεων είναι δυνατόν να δημιουργήσει διατμητικές ή/και εφελκυστικές τάσεις σε διάφορα επίπεδα κεκλιμένα ως προς τους άξονες επιβολής των φορτίων. Επομένως οι μηχανισμοί αστοχίας ενός υλικού σε θλιπτική καταπόνηση είναι δυνατόν να αντιστοιχηθούν με άλλους κινηματικούς μηχανισμούς αστοχίας.

Μονοαξονική θλιπτική καταπόνηση είναι η επιβολή μιας μόνο ορθής τάσης σε μία μόνο πλευρά ενός όγκου πετρώματος. Μία από τις βασικές παραμέτρους εκτίμησης της αντοχής ενός πετρώματος στο εργαστήριο, είναι η μέτρηση της αντοχής του σε μονοαξονική θλίψη σε κατάλληλα δοκίμια. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται μια τυπική φόρτιση δοκιμίου σε μονοαξονική καταπόνηση.

Για τη μέτρηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του ακέραιου πετρώματος στο εργαστήριο, κατασκευάζονται δοκίμια σύμφωνα με διεθνείς προδιαγραφές. Τα δοκίμια αυτά είναι συνήθως κυλινδρικά ή ορθογωνικά πρισματικά με μήκος διπλάσιο έως τριπλάσιο της διαμέτρου ή του πλάτους τους αντίστοιχα και τοποθετούνται ανάμεσα σε δυο μεταλλικές πλάκες σε κατάλληλη μηχανή φόρτισης. Η φόρτισή τους πραγματοποιείται είτε με έλεγχο του φορτίου (load control), είτε με έλεγχο της μετατόπισης (displacement control) κατά τον διαμήκη άξονα τους και συγχρόνως καταγράφεται η αντίστοιχη ανοιγμένη παραμόρφωση που υφίστανται. Οι παραμορφώσεις αυτές προκύπτουν μετά από μετρήσεις της διαστολής ή/και συστολής των υλικών, οι οποίες επιτυγχάνονται είτε με μηχανικά (strain gages), είτε με ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα (electrical strain gages) κατά τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση του δοκιμίου, είτε μετρώντας τη σύγκλιση των πλακών από τις οποίες εφαρμόζεται η θλιπτική τάση στο δοκίμιο (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 2.2: Τυπικές συνθήκες φόρτισης σε μονοαζονική καταπόνηση (Αγιουτάντης, 2002).

Η θέση τοποθέτησης των δοκιμίων (σχήμα 2.3) στην συσκευή γίνεται με βάση τα εξής (Αγιουτάντης, 2002):

- Οι πλάκες φόρτισης πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους και χρησιμεύουν στο να μεταφέρουν το φορτίο στο δοκίμιο.
- Χαλύβδινοι δίσκοι τοποθετούνται ανάμεσα στις πλάκες φόρτισης και στο δοκίμιο και αποσκοπούν στην ελάττωση της πλευρικής παραμόρφωσης του δοκιμίου λόγω δυνάμεων τριβής στα σημεία επαφής. Η σκληρότητα των δίσκων είναι μεγαλύτερη από HRC58 (στην κλίμακα Rockwell) και η

διάμετρός τους πρέπει να είναι μεταξύ D και D+2 mm , όπου D η διάμετρος του δοκιμίου. Το πάχος των δίσκων πρέπει να είναι 15mm ή D/3 και οι παράλληλες επιφάνειές τους πρέπει να έχουν ανοχή μικρότερη από 0,005 mm.

Η σφαιρική κεφαλή έδρασης βρίσκεται στο πάνω μέρος του δοκιμίου και ο άξονάς της πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα του δοκιμίου και το κέντρο της πλάκας φόρτισης. Η κεφαλή λιπαίνεται με ελαφρό ορυκτέλαιο πριν την διεξαγωγή σειράς πειραμάτων.



Σχήμα 2.3: Ιδανική θέση τοποθέτησης δοκιμίων στη συσκευή φόρτισης MTS-815.

2.2.1 Το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης

Από τις τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης που καταγράφονται δημιουργείται σε σύστημα ορθογωνίων αξόνων η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης (stress – strain curve) για το συγκεκριμένο πέτρωμα. Η καμπύλη αυτή αποτελείται από δυο τμήματα. Το τμήμα μέχρι τη διαρροή ή τη θραύση και τον φθίνοντα κλάδο. Έτσι διακρίνονται καμπύλες που περιγράφουν είτε ελαστική συμπεριφορά (γραμμική ή μη γραμμική), είτε πλαστική συμπεριφορά (γραμμική ή μη γραμμική), είτε συνδυασμό των παραπάνω. Το σχήμα 2.4 παρουσιάζει καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για διάφορα πετρώματα.



Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστικά διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για πετρώματα (Roberts, 1977).

Ένα υλικό θεωρείται ελαστικό όταν δεν υφίσταται μόνιμες παραμορφώσεις κάτω από την επίδραση εξωτερικών τάσεων και είναι δυνατόν να επανέλθει στην

αρχική του κατάσταση όταν σταματήσει η επιβολή του εξωτερικού φορτίου. Η ελαστικότητα ενός υλικού μπορεί να διακριθεί στις εξής τρεις περιπτώσεις (σχήμα 2.5):

- Γραμμικά ελαστικό, όπου η σχέση τάσης παραμόρφωσης είναι της μορφής σ = Ε·ε.
- Τέλεια ελαστικό, όπου η σχέση τάσης παραμόρφωσης είναι της μορφής σ = E·f(ε).
- Τέλεια ελαστικό με υστέρηση, όταν κατά την αποφόρτιση του ακολουθείται διαφορετική τροχιά στο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων.



Σχήμα 2.5: Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για ελαστικά υλικά (Αγιουτάντης, 2002).

Ένα υλικό χαρακτηρίζεται πλαστικό όταν μπορεί να υποστεί μόνιμες παραμορφώσεις διατηρώντας την ικανότητα του να παραλαμβάνει φορτία. Τα περισσότερα πετρώματα επιδεικνύουν μια ελαστική συμπεριφορά σε χαμηλές περιοχές τάσεων. Η πλαστική περιοχή ακολουθεί την ελαστική περιοχή στο διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης και το εύρος της εξαρτάται από το υλικό.

Ένα υλικό χαρακτηρίζεται από ψαθυρή συμπεριφορά, όταν παρουσιάζει μικρές παραμορφώσεις με αύξηση της τάσης στην πλαστική περιοχή. Στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης η ψαθυρότητα φαίνεται από την κλίση του μετά την αστοχία τμήματος της καμπύλης. Η ψαθυρή περιοχή ακολουθεί την πλαστική και χαρακτηρίζεται από την έναρξη των φαινομένων αστοχίας του υλικού. Το μέγιστο της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης αποτελεί το όριο μεταξύ πλαστικής και ψαθυρής περιοχής. Το όριο αυτό ονομάζεται αντοχή σε θλίψη και στην περίπτωση που το υλικό υπόκειται μονοαξονική θλίψη, τότε ονομάζεται αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και συμβολίζεται με C_o.

Το μέτρο ελαστικότητας Ε του υλικού υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης και δεν παραμένει σταθερό κατά την διαδικασία φόρτισης του δοκιμίου. Έτσι για τον υπολογισμό ενός αντιπροσωπευτικού μέτρου ελαστικότητας έχουν προταθεί οι εξής τρόποι (σχήμα 2.6):

- Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας, που υπολογίζεται από την σχέση dσ/dε, αποτελεί την κλίση της καμπύλης σε κάποιο σημείο το οποίο δίνεται ως ποσοστό της μέγιστης τάσης που δέχθηκε το υλικό.
- Το μέσο μέτρο ελαστικότητας, που προκύπτει από τη μέση κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης και υπολογίζεται από τη σχέση Δσ/Δε.
- Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας, που ορίζεται από την ευθεία που ενώνει τη συμβολή των αξόνων με κάποιο σημείο της καμπύλης, το οποίο δίνεται ως ποσοστό της μέγιστης τάσης που δέχθηκε το υλικό. Το μέτρο αυτό υπολογίζεται από τη σχέση Δσ/Δε.



Σχήμα 2.6: Τρόποι υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας του Young από τα διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης (Αγιουτάντης, 2002).

Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται ένα πλήρες διάγραμμα τάσεων – ανοιγμένων παραμορφώσεων ενός δοκιμίου που υφίσταται μονοαξονική καταπόνηση, ενώ διακρίνονται και οι μεταβολές στη δομή του δοκιμίου, ανάλογα με την εντατική του κατάσταση.



Σχήμα 2.7: Πλήρες διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης (Τσουτρέλης. 1985).

2.3 Θεωρία κάμψης

Όταν σε μια δοκό δρουν φορτία, την αναγκάζουν σε κάμψη και με αυτό τον τρόπο ο άξονας της παραμορφώνεται σε καμπύλη. Αν για παράδειγμα θεωρηθεί μία μονόπακτη δοκός *AB* που υπόκειται σε φορτίο *P* στο ελεύθερο άκρο της, (Σχήμα 2.8.α) ο αρχικά ευθύγραμμος άξονας της δοκού καμπυλώνεται (Σχήμα 2.8.β). Η απόκλιση αυτή δίνεται από το βέλος κάμψης της δοκού.

Πάνω στην διάταξη του σχήματος (2.8) κατασκευάζεται ένα σύστημα αναφοράς με σημείο αναφοράς το σημείο στήριξης της δοκού πάνω στον διαμήκη άξονα της. Ο θετικός άξονας x έχει διεύθυνση προς τα δεξιά και ο θετικός άξονας y έχει διεύθυνση προς τα πάνω. Ο άξονας z ο οποίος δεν διακρίνεται στο σχήμα 2.8 είναι κάθετος προς τους δύο άλλους άξονες με διεύθυνση προς τον αναγνώστη.

Η δοκός θεωρείται συμμετρική ως προς το επίπεδο xy, πράγμα που σημαίνει ότι ο άξονας y είναι άξονας συμμετρίας της τομής. Επιπλέον, όλα τα φορτία πρέπει να δρουν στο επίπεδο xy. Έτσι συνεπάγεται ότι τυχόν καμπυλώσεις λόγω φορτίων λαμβάνουν χώρα στο επίπεδο xy, το οποίο ονομάζεται επίπεδο της κάμψης. Το βέλος κάμψης της δοκού σε κάθε σημείο κατά μήκος του άξονα της, είναι η μετατόπιση αυτού του σημείου από την αρχική του θέση, μετρούμενη κατά την διεύθυνση y και συμβολίζεται με το v (Παπαθεοδώρου, 2004).



Σχήμα 2.8: Το πρόβλημα της απλής κάμψης (Gere & Timoshenko, 1997).

2.3.1 Διαμήκεις παραμορφώσεις σε δοκούς

Οι διαμήκεις παραμορφώσεις σε μια δοκό μπορούν να προσδιοριστούν με την ανάλυση της καμπυλότητας της δοκού και τις σχετιζόμενες παραμορφώσεις. Για το σκοπό αυτό θεωρείται ένα τμήμα *ab* μιας δοκού σε απλή κάμψη, η οποία υπόκειται σε θετική καμπτική ροπή M (Σχήμα 2.9.α). Υποτίθεται ότι η δοκός έχει αρχικά έναν ευθύ διαμήκη άξονα (ο άξονας x στο σχήμα 2.9.α) και ότι η τομή της είναι συμμετρική ως προς τον άξονα y όπως φαίνεται στο σχήμα (2.9.β). Υπό την επίδραση των καμπτικών ροπών, η δοκός κάμπτεται στο επίπεδο xy και ο διαμήκης άξονας της κάμπτεται σχηματίζοντας την καμπύλη ss στο σχήμα (2.9.γ). Οι τομές mn και pq στο σχήμα (2.9.α) παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον διαμήκη άξονα. Το γεγονός αυτό είναι τόσο βασικό στην θεωρία της κάμψης που θεωρείται ως αξίωμα. Παρόλα αυτά μπορεί να καλείται και θεώρημα συμφωνά με την ακόλουθη θεώρηση: Το βασικό σημείο είναι η συμμετρία της δοκού και του φορτίου της, γεγονός που σημαίνει ότι όλα τα στοιχεία της δοκού (όπως το στοιχείο mpqn) πρέπει να παραμορφωθούν με έναν ίδιο τρόπο, το οποίο είναι δυνατό μόνο αν οι διατομές παραμένουν επίπεδες κατά την κάμψη (Σχήμα 2.9.γ). Αυτό το συμπέρασμα ισχύει για δοκούς οποιουδήποτε υλικού, ανεξάρτητα αν το υλικό είναι ελαστικό ή μη ελαστικό.



Σχήμα 2.9: Παραμορφώσεις της δοκού σε απλή κάμψη (Gere & Timoshenko, 1997).

Λόγω των παραμορφώσεων που προκαλούνται από την κάμψη, οι τομές mn και pq περιστρέφονται σε σχέση μεταξύ τους ως προς τους κάθετους άξονες, κάθετα στο επίπεδο xy. Οι διαμήκεις γραμμές στο κατώτερο μέρος της δοκού επιμηκύνονται, ενώ το ανώτερο μέρος της δοκού συστέλλεται. Για αυτό το λόγο το κατώτερο μέρος

της δοκού βρίσκεται σε εφελκυσμό και το ανώτερο μέρος σε θλίψη. Κάπου μεταξύ του ανώτερου και κατώτερου μέρους της δοκού υπάρχει μια διαμήκης επιφάνεια η οποία δεν διαφοροποιείται στο μήκος της. Η επιφάνεια αυτή υποδεικνύεται με την διακεκομμένη γραμμή ss στα σχήματα (2.9.α) και (2.9.γ) και ονομάζεται ουδέτερη επιφάνεια της δοκού.

Τα επίπεδα που περιέχουν τις τομές mn και pq στην παραμορφωμένη δοκό τέμνονται σε μια γραμμή στο κέντρο της καμπυλότητας O'. Η γωνία μεταξύ αυτών των επιπέδων συμβολίζεται με dθ και η απόσταση από το O' μέχρι την ουδέτερη επιφάνεια ss είναι η ακτίνα της καμπυλότητας ρ. Η αρχική απόσταση dx μεταξύ των δύο επιπέδων (Σχήμα 2.9.α) είναι απαράλλαχτη στην ουδέτερη επιφάνεια (Σχήμα 2.9.γ) και για αυτό το λόγο ισχύει ότι $\rho \cdot d\theta = dx$. Όμως, όλες οι υπόλοιπες διαμήκεις γραμμές μεταξύ των δύο επιπέδων δημιουργούν κάθετες παραμορφώσεις ε_x .

Για την εκτίμηση αυτών των κάθετων παραμορφώσεων, θεωρείται μια διαμήκης γραμμή *ef* η οποία βρίσκεται μέσα στη δοκό μεταξύ των επιπέδων *mn* και pq (Σχήμα 2.9.α). Η γραμμή *ef* προσδιορίζεται από την απόσταση της *y* από την ουδέτερη επιφάνεια στην αρχική μη παραμορφώσιμη δοκό. Έτσι, θεωρείται ότι ο άξονας *x* συμπίπτει με την ουδέτερη επιφάνεια της μη παραμορφωμένης δοκού. Βέβαια, όταν η δοκός κάμπτεται, η ουδέτερη επιφάνεια μετακινείται μαζί με την δοκό αλλά ο άξονας *x* παραμένει στην θέση του. Ωστόσο, η διαμήκης γραμμή *ef* στην παραμορφωμένη δοκό παραμένει στην ίδια απόσταση *y* από την ουδέτερη επιφάνεια. Για αυτό, το μήκος L_1 της γραμμής *ef* μετά την κάμψη είναι (Gere & Timoshenko, 1997):

$$L_1 = (\rho - y)d\theta = dx - \frac{y}{\rho}dx$$
(2.1)

Όταν το πραγματικό μήκος της γραμμής *ef* είναι dx, προκύπτει ότι η επιμήκυνση του είναι $L_1 - dx$ ή $-ydx/\rho$. Η αντίστοιχη διαμήκης παραμόρφωση είναι ίση με την επιμήκυνση διαιρούμενη με το αρχικό μήκος dx, οπότε (Gere & Timoshenko, 1997):

$$\varepsilon_x = -\frac{y}{\rho} = -\kappa y \tag{2.2}$$

όπου κ είναι η καμπυλότητα.

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι οι διαμήκεις παραμορφώσεις στη δοκό είναι ανάλογες με την καμπυλότητα και μεταβάλλονται γραμμικά με την απόσταση *y* από την ουδέτερη επιφάνεια. Όταν το υπό εξέταση σημείο είναι πάνω από την ουδέτερη

επιφάνεια, η απόσταση y είναι θετική. Αν η καμπυλότητα είναι επίσης θετική, τότε η παραμόρφωση ε_x θα είναι αρνητική, εκφράζοντας βράχυνση. Αν το υπό εξέταση σημείο είναι κάτω από την ουδέτερη επιφάνεια η απόσταση y θα είναι αρνητική και αν η καμπυλότητα είναι θετική, η παραμόρφωση ε_x θα είναι και αυτή θετική, εκφράζοντας επιμήκυνση.

Η εξίσωση (2.2) για τις διαμήκεις παραμορφώσεις σε μια δοκό προέκυψε μόνο από την γεωμετρία της παραμορφωμένης δοκού. Οι ιδιότητες του υλικού δεν λήφθηκαν υπόψη. Για αυτό, οι παραμορφώσεις σε μια δοκό σε απλή κάμψη μεταβάλλονται γραμμικά με την απόσταση από την ουδέτερη επιφάνεια ανεξάρτητα από τη μορφή της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης του υλικού (Παπαθεοδώρου, 2004).

2.3.2 Διατμητικές τάσεις σε δοκούς ορθογωνικής διατομής

Όταν μια δοκός υπόκειται σε απλή κάμψη, οι μόνες συνισταμένες τάσης είναι οι καμπτικές ροπές και οι μόνες τάσεις είναι οι ορθές τάσεις που δρουν στις διατομές. Όμως, οι περισσότερες δοκοί υπόκεινται σε φορτία που παράγουν και καμπτικές ροπές και διατμητικές δυνάμεις (μη ομοιόμορφη κάμψη). Σε αυτές τις περιπτώσεις αναπτύσσονται στη δοκό ορθές και διατμητικές τάσεις.

Για τον υπολογισμό των διατμητικών τάσεων θεωρείται δοκός ορθογωνικής διατομής (πάχους b και ύψους h) που υπόκειται σε μια θετική διατμητική δύναμη V (Σχήμα 2.10.α). Οι διατμητικές δυνάμεις τ που δρουν στην διατομή είναι παράλληλες με την διατμητική δύναμη, η οποία είναι παράλληλη με τις κάθετες πλευρές της διατομής. Θεωρείται επίσης, ότι οι διατμητικές δυνάμεις είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες κατά μήκος του πάχους της δοκού, παρόλο που μπορεί να μεταβάλλονται κατά το ύψος. Χρησιμοποιώντας τις δύο παραπάνω υποθέσεις, μπορεί να προσδιοριστεί η ένταση της διατμητικής τάσης σε κάθε σημείο της διατομής.

Για την περαιτέρω ανάλυση απομονώνεται ένα μικρό στοιχείο mn της δοκού (Σχήμα 2.10.β). Σύμφωνα με τις υποθέσεις που έχουν γίνει, οι διατμητικές δυνάμεις τ που δρουν στο μπροστινό μέρος αυτού του στοιχείου είναι κάθετες και ομοιόμορφα κατανεμημένες από την μια μεριά της δοκού προς την άλλη. Επίσης είναι γνωστό ότι οι διατμητικές δυνάμεις που δρουν στην μια μεριά ενός στοιχείου, συνοδεύονται από διατμητικές δυνάμεις ίσου μεγέθους που δρουν στις κάθετες πλευρές του στοιχείου. Έτσι υπάρχουν οριζόντιες διατμητικές δυνάμεις που δρουν τίων στις καθετες που δρουν μεταξύ οριζοντίων

στρωμάτων της δοκού όπως και κατακόρυφες διατμητικές δυνάμεις που δρουν στις διατομές.



Σχήμα 2.10: Διατμητικές τάσεις σε δοκό ορθογωνικής διατομής (Gere & Timoshenko, 1997).

Η ισότητα των οριζοντίων και κατακόρυφων διατμητικών δυνάμεων που δρουν σε ένα στοιχείο οδηγεί σε ένα σημαντικό συμπέρασμα σχετικά με τις διατμητικές δυνάμεις στην πάνω και κάτω ακμή της δοκού. Αν θεωρηθεί ότι το στοιχείο mn εντοπίζεται είτε στην πάνω ακμή είτε στην κάτω, φαίνεται ότι οι οριζόντιες διατμητικές δυνάμεις πρέπει να μηδενιστούν, καθώς δεν υπάρχουν τάσεις στις εξωτερικές επιφάνειες της δοκού. Συνεπάγεται ότι και οι κατακόρυφες διατμητικές δυνάμεις πρέπει να μηδενιστούν σε αυτές τις περιοχές, δηλαδή $\tau=0$ όπου $y=\pm h/2$. Η ύπαρξη οριζοντίων διατμητικών δυνάμεων σε μια δοκό μπορεί να διαπιστωθεί αν δύο ομοιόμορφες πρισματικές δοκοί τοποθετηθούν η μια πάνω στην άλλη, στηριχθούν στις δύο άκρες τους και φορτιστούν με ένα φορτίο *P* όπως φαίνεται στο σχήμα (2.11). Αν η τριβή μεταξύ των δοκών είναι μικρή, τότε θα υπάρξει κάμψη ανεξάρτητη μεταξύ τους. Κάθε δοκός θα είναι σε θλίψη πάνω από τον ουδέτερο άξονα της και σε εφελκυσμό κάτω από τον ουδέτερο άξονα της και επομένως η κάτω επιφάνεια της πάνω δοκού θα ολισθήσει σε σχέση με την πάνω επιφάνεια της κάτω



Σχήμα 2.11: Κάμψη δυο ζεχωριστών δοκών (Gere & Timoshenko, 1997).

Αν υποτεθεί ότι οι δύο δοκοί είναι κολλημένες κατά μήκος της κοινής τους επιφάνειας, ώστε να θεωρούνται σαν ένα σώμα και υποβληθούν σε φόρτιση, οι οριζόντιες διατμητικές δυνάμεις πρέπει να είναι μηδενικές κατά μήκος της κοινής επιφάνειας, ώστε να εμποδίζεται η ολίσθηση. Λόγω της παρουσίας αυτών των διατμητικών δυνάμεων, το σώμα αποτελούμενο από τις δύο δοκούς είναι πολύ πιο στιβαρό και ανθεκτικό από τις δύο ξεχωριστές δοκούς (Παπαθεοδώρου, 2004).

2.3.3 Μέγιστη αντοχή σε κάμψη τριών σημείων

Η μέγιστη αντοχή σε κάμψη αντιστοιχεί στην τιμή της τάσης η οποία οδηγεί σε αστοχία ενός υλικού, όταν σε αυτό εφαρμόζεται κάμψη τριών σημείων. Η μέγιστη τάση είναι ανάλογη του μέγιστου επιβαλλόμενου φορτίου και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου στο οποίο ασκείται. Η τάση *R* (MPa) έχει αποδειχτεί ότι δίνεται από την εξής σχέση (ASTM C293):

$$R = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \tag{2.3}$$

Στην εξίσωση (2.3) το P είναι το μέγιστο εφαρμοζόμενο φορτίο σε N, το Lαντιστοιχεί στην απόσταση των δύο κάτω εδράνων στήριξης σε mm, το b είναι το πάχος του δοκιμίου σε mm, ενώ με d συμβολίζεται το ύψος του σε mm. Στο σχήμα 2.12 διακρίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά σε ένα δοκίμιο που υπόκειται σε κάμψη τριών σημείων.



Σχήμα 2.12: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάμψης τριών σημείων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3⁰

ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ

3.1 Γενικά, πλεονεκτήματα - εφαρμογές

Οι διηλεκτρικές ιδιότητες αφορούν την ικανότητα ενός υλικού να πολώνεται κάτω από την επίδραση ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η πολωσιμότητα των υλικών εξαρτάται από τη δομή τους και από τις μοριακές τους ιδιότητες. Επομένως οι διηλεκτρικές μετρήσεις μπορούν να παρέχουν σχετικές πληροφορίες για τα ανωτέρω. Η τεχνική μέτρησης των διηλεκτρικών ιδιοτήτων είναι γνωστή ως διηλεκτρική φασματοσκοπία.

Η δυνατότητα μεταβολών στο περιβάλλον των μετρήσεων, πέρα από μια πολύ ευρεία ζώνη συχνότητας, με τις παραμέτρους (θερμοκρασία, πίεση και υγρασία) σημαίνει ότι μια σειρά ποικίλων διαδικασιών μπορεί να μελετηθεί. Η διηλεκτρική φασματοσκοπία αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο ως ένα βασικό εργαλείο για τον χαρακτηρισμό των υλικών. Έχει επίσης πλεονεκτήματα που μπορούν να είναι ιδιαίτερου οφέλους στο χαρακτηρισμό, την κατασκευή και τον ποιοτικό έλεγχο των φαρμακευτικών ειδών, καθώς επίσης και για το χαρακτηρισμό των βιολογικών

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας είναι:

- 1. Η σχετικά απλή προετοιμασία δειγμάτων,
- Η ποικιλία στο μέγεθος και τη μορφή των δειγμάτων που είναι δυνατό να μετρηθούν,
- Οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν κάτω από ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, πιέσεων και υγρασίας,
- 4. Η τεχνική επεκτείνεται σε ευρεία ζώνη συχνοτήτων, από την τάξη μεγέθους (mHz έως GHz), επιτρέποντας την διακρίβωση διαφορετικών διαδικασιών στο ευρύ φάσμα των συχνοτήτων.

3.2 Γενικοί ορισμοί

Η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου σε ένα υλικό προκαλεί αφ' ενός την αμετάκλητη μετακίνηση και αφ' ετέρου την αντιστρέψιμη μετατόπιση των ηλεκτρικών φορτίων. Η ειδική αγωγιμότητα σ χαρακτηρίζει την πρώτη διαδικασία σε σχέση με την διηλεκτρική σταθερά ε που χαρακτηρίζει την δεύτερη διαδικασία. Ας σημειωθεί ότι η διηλεκτρική σταθερά είναι μια μακροσκοπική ποσότητα που καθορίζει το πως επιδρά το ηλεκτρικό πεδίο στην πόλωση του υλικού. Το άνυσμα της πόλωσης P ενός υλικού, ορίζεται ως η προκαλούμενη ηλεκτρική ροπή των διπόλων ανά μονάδα όγκου. Το άνυσμα της διηλεκτρικής μετατόπισης D συσχετίζεται με το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο E και την πόλωση P από την σχέση (Jonscher, 1983):

$$D = \varepsilon_a \cdot E + P \tag{3.1}$$

όπου ε_o η διηλεκτρική σταθερά του κενού. Οι προαναφερθείσες ποσότητες *E*, *D*, σ και ε_o εκφράζονται σε μονάδες του SI V/m, C/m², S/m και F/m αντίστοιχα, ενώ τα μεγέθη *P* και *E* εκφράζονται με την ίδια μονάδα.

Η διηλεκτρική μετατόπιση *D* συνδέεται συνήθως γραμμικά με το εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο *E*. Επομένως τα ανύσματα *D* και *E* μπορούν να συσχετιστούν χρησιμοποιώντας μια σταθερά αναλογίας που ονομάζεται σχετική διηλεκτρική σταθερά και συμβολίζεται με ε_r (Jonscher, 1983).

$$D = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot E \tag{3.2}$$

Με το συνδυασμό των σχέσεων (3.1) και (3.2) τα ανύσματα P και E μπορούν να συσχετιστούν όπως δείχνει η παρακάτω σχέση (Jonscher, 1983):

$$P = \varepsilon_o (\varepsilon_r - 1) E = \chi \cdot \varepsilon_o \cdot E \tag{3.3}$$

όπου χ είναι η διηλεκτρική επιδεκτικότητα του υλικού, η οποία εκφράζει το ποσό της πόλωσης που παράγει επί του υλικού ένα συγκεκριμένο ηλεκτρικό πεδίο.

Η συνολική πυκνότητα J του ηλεκτρικού ρεύματος που οφείλεται στο εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο, παρέχεται από την ακόλουθη εξίσωση (Jonscher, 1983):

$$J = \sigma \cdot E + \varepsilon_o \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t}$$
(3.4)

Η εξίσωση (3.4) παρουσιάζει τη συμβολή της πόλωσης στο συνολικό ρεύμα μέσω του υλικού. Η πόλωση στα υλικά διακρίνεται ανάλογα με τον μηχανισμό που την παράγει σε:

- ηλεκτρονική
- ιοντική
- ατομική πόλωση
- πόλωση διπόλων
- διεπιφανειακή πόλωση και
- πόλωση μεταπήδησης (hopping).

Από αυτούς τους μηχανισμούς, οι τρεις πρώτοι είναι πολύ γρηγορότεροι από τους άλλους. Ο χρόνος που διαρκούν αυτοί οι μηχανισμοί είναι μικρότεροι από 10^{-13} s. Αντίθετα, οι διεπιφανειακές πολώσεις και οι πολώσεις αλμάτων μεταπήδησης (hopping) είναι αργές και διαρκούν 10^{-3} έως 10^4 s περίπου, ανάλογα με τη φύση του υλικού. Επομένως, όταν εφαρμόζεται ένα σταθερό ηλεκτρικό πεδίο, η συνολική πόλωση του υλικού ποικίλλει, όπως παραστατικά φαίνεται στο σχήμα 3.1. Στο σχήμα 3.1, η P_{∞} αντιπροσωπεύει την πόλωση που οφείλεται στους γρήγορους μηχανισμούς και η P_s είναι η ολική πόλωση κόρου του υλικού μετά από έναν άπειρο χρόνο. Επομένως, η πόλωση οποιαδήποτε στιγμή μετά από $t=t_0$ μπορεί να γραφτεί ως εξής (Jonscher, 1983):

$$P(t) = P_{\infty} + (P_{s} - P_{\infty}) \cdot g(t - t_{o}), \gamma \iota \alpha \ t \ge t_{o}$$

$$(3.5)$$

όπου *g(t)* είναι μια μονότονη αύξουσα συνάρτηση που ικανοποιεί την ακόλουθη συνθήκη:

$$\begin{split} g(t) &= 0 \quad , \alpha v \quad t \leq t_{o} \\ g(t) &= 1 \quad , \alpha v \quad t \rightarrow \infty \\ g(t) &\geq 0 \quad \frac{dg}{dt} \geq 0 \quad , \alpha v \quad t \geq t_{o} \end{split}$$



Σχήμα 3.1: Χρονική εξάρτηση της πόλωσης όταν εφαρμόζεται ένα σταθερό ηλεκτρικό πεδίο E₀ την χρονική στιγμή t=t_o (Jonscher, 1983).

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (3.3) σε κάθε όρο πόλωσης της εξίσωσης (3.5), η συνολική πόλωση που οφείλεται σε ένα σταθερό ηλεκτρικό πεδίο E_o μπορεί να εκφραστεί ως (Jonscher, 1983):

$$P(t) = \{\varepsilon_o(\varepsilon_\infty - 1) + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot g(t - t_o)\} \cdot E_o$$
(3.6)

όπου ε_s και ε_{∞} είναι αντίστοιχα η στατική και η υψηλή συχνότητα της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού. Η εξίσωση (3.6) μπορεί να επεκταθεί και να λάβει την ακόλουθη έκφραση (Jonscher, 1983):

$$P(t) = \varepsilon_o(\varepsilon_{\infty} - 1) \cdot E(t) + \varepsilon_o \int_{-\infty}^{t} f(t - \tau) \cdot E(\tau) d\tau$$
(3.7)

όπου f(t) είναι μια μονότονη φθίνουσα συνάρτηση γνωστή ως συνάρτηση διηλεκτρικής απόκρισης. Το πρώτο μέρος της σχέσης (3.7) αντιστοιχεί στις γρήγορες διαδικασίες πόλωσης στο υλικό. Με το συνδυασμό των εξισώσεων (3.4) και (3.7), η συνολική πυκνότητα ρεύματος J(t) λόγω ενός σταθερού ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να γραφτεί ως εξής (Jonscher, 1983):

$$J(t) = \sigma \cdot E(t) + \varepsilon_o [\varepsilon_\infty \cdot \delta(t) + f(t)] \cdot E(t)$$
(3.8)

Σύμφωνα με την σχέση (3.8), η συνολική πυκνότητα ρεύματος περιλαμβάνει τρία συστατικά:

- Τον όρο σ·E(t) που αντιστοιχεί στην πυκνότητα ρεύματος λόγω της αγωγιμότητας του υλικού.
- Τον όρο ε₀ · ε_∞ · δ(t) · E(t) που αντιστοιχεί στην πυκνότητα ρεύματος λόγω των γρήγορων διαδικασιών πόλωσης.
- 3. Τον όρο $\varepsilon_{o} \cdot f(t) \cdot E(t)$ που αντιστοιχεί στην πυκνότητα ρεύματος λόγω των αργών διαδικασιών πόλωσης.

Παρατηρείται ότι στο χρονικό πεδίο η συμπεριφορά του διηλεκτρικού υλικού χαρακτηρίζεται από την αγωγιμότητα σ , τη διηλεκτρική σταθερά που αντιστοιχεί στις υψηλές συχνότητες ε_{∞} και από τη συνάρτηση της διηλεκτρικής απόκρισης f(t).

3.3 Η διηλεκτρική απόκριση σε πεδίο συχνοτήτων

Το χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο *E(t)* μπορεί να γραφτεί ως ακολούθως (Jonscher, 1983):

$$E(t) = E_o \exp(j\omega t)$$
(3.9)

Το πραγματικό μέρος αυτής της συνάρτησης αντιπροσωπεύει το φυσικό ηλεκτρικό πεδίο. Με αντικατάσταση της σχέσης (3.9) στην (3.7), η διηλεκτρική μετατόπιση D(t) μπορεί να εκφραστεί με την ακόλουθη μορφή (Jonscher, 1983):

$$D(t) = \varepsilon_o \cdot \left\{ \varepsilon_{\infty} + \int_0^{\infty} f(t) \cdot \exp(-j\omega \cdot t) dt \right\} E_o \cdot \exp(j\omega \cdot t)$$
(3.10)

Ο όρος $\int_{0}^{\infty} f(t) \cdot \exp(-j\omega \cdot t) dt$ είναι ισοδύναμος με τον μετασχηματισμό κατά

Fourier της συνάρτησης f(t), ο οποίος ορίζεται ως η εξαρτώμενη από την συχνότητα μιγαδική διηλεκτρική επιδεκτικότητα $\chi(\omega)$. Πιο συγκεκριμένα (Jonscher, 1983):

$$\chi(\omega) = \chi'(\omega) - j\chi''(\omega) = \int_{0}^{\infty} f(t) \cdot \exp(-j\omega t) dt$$
(3.11)

όπου $\chi'(\omega)$ και $\chi''(\omega)$ αντίστοιχα είναι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της σύνθετης μιγαδικής επιδεκτικότητας. Με βάση αυτά η σχέση (3.10) γράφεται (Jonscher, 1983):

$$D(t) = \varepsilon_o \{\varepsilon_\infty + \chi(\omega)\} E_o \exp(j\omega \cdot t)$$
(3.12)

Επομένως στο πεδίο συχνοτήτων η πυκνότητα ρεύματος $J(\omega)$ σε ένα διηλεκτρικό υλικό που οφείλει την ύπαρξή του σε ένα εξωτερικό εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο $E(\omega)$, μπορεί να γραφτεί ως εξής (Jonscher, 1983):

$$J(\omega) = \sigma \cdot E(\omega) + j \cdot \omega \cdot [\varepsilon_o \cdot \varepsilon_\omega + \varepsilon_o \cdot \{\chi'(\omega) - j \cdot \chi''(\omega)\}] \cdot E(\omega) \qquad \Leftrightarrow$$
$$J(\omega) = j \cdot \omega \cdot \varepsilon_o \cdot \left[\varepsilon_\omega + \chi'(\omega) - j \left\{\frac{\sigma}{\varepsilon_o \cdot \omega} + \chi''(\omega)\right\}\right] \cdot E(\omega) \qquad \Leftrightarrow$$
$$J(\omega) = j \cdot \omega \cdot \varepsilon_o \cdot [\varepsilon'(\omega) - j \cdot \varepsilon''(\omega)] \cdot E(\omega) \qquad (3.13)$$

όπου

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \chi'(\omega) \tag{3.14}$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{\sigma}{\varepsilon_o \cdot \omega} + \chi''(\omega) \tag{3.15}$$

25

Η σχέση (3.14) αντιστοιχεί στο πραγματικό μέρος, ενώ η σχέση (3.15) αντιστοιχεί στο φανταστικό μέρος της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς, η οποία εκφράζεται από την εξής σχέση (Jonscher, 1983):

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \cdot \varepsilon''(\omega) \tag{3.16}$$

Η ε'(ω) και ε''(ω) αντιπροσωπεύουν τα συστατικά της χωρητικής και της ωμικής συμπεριφοράς αντίστοιχα στη συνολική πυκνότητα του ρεύματος. Το πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς ουσιαστικά μετράει την ποσότητα της ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου που αποθηκεύεται στο υλικό. Το φανταστικό μέρος δείχνει την απώλεια ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου στο υλικό. Το ρεύμα που οφείλεται σε ωμικές συμπεριφορές του ηλεκτρικού πεδίου, συνδέεται με τις απώλειες στο υλικό. Ο όρος $\frac{\sigma}{\varepsilon_o \cdot \omega}$ σχετίζεται με τις ωμικές απώλειες λόγω της ελεύθερης μετακίνησης φορτίων στο υλικό.

Ο λόγος του φανταστικού προς το πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής επιδεκτικότητας ονομάζεται γωνία απωλειών και ορίζεται ως (Jonscher, 1983):

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon^{\prime\prime}}{\varepsilon^{\prime}} \tag{3.17}$$

Ο λόγος αυτός δείχνει τον ρυθμό της απώλειας προς την αποθήκευση ενέργειας στο υλικό. Η γωνία δ διακρίνεται στο σχήμα 3.2.

Ο όρος $\chi''(\omega)$ του φανταστικού μέρους της μιγαδικής επιδεκτικότητας του ρεύματος αντιστοιχεί στις διηλεκτρικές απώλειες του μέσου, οι οποίες σχετίζονται με τα δέσμια φορτία λόγω της αδράνειας των, όταν επιταχύνονται από το χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Στο πεδίο συχνοτήτων η αγωγιμότητα σ, η υψηλής συχνότητας διηλεκτρική σταθερά ε_{∞} και η μιγαδική ηλεκτρική επιδεκτικότητα $\chi'(\omega)$ χαρακτηρίζουν τη διηλεκτρική συμπεριφορά του υλικού.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα του πραγματικού συναρτήσει του φανταστικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς (Jonscher, 1983).

3.4 Εξάρτηση της διηλεκτρικής σταθεράς από θερμοκρασία, πίεση και υγρασία

Η διηλεκτρική απόκριση είναι μια σύνθετη συνάρτηση με μεταβλητές την συχνότητα την θερμοκρασία και την πίεση. Η πλήρης απεικόνιση της εξίσωσης αποδίδεται σε δυο τρισδιάστατα διαγράμματα χ'(ω, Τ) και χ''(ω, Τ). Τέτοια διαγράμματα είναι δύσχρηστα και σπάνια χρησιμοποιούνται παρόλο που σύγχρονα υπολογιστικά προγράμματα μπορούν να απεικονίσουν τριαξονικά γραφήματα σε δυο διαστάσεις.

Η επικρατούσα μέθοδος παρουσίασης αποτελείται από διάγραμμα της συχνότητας σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Στην ειδική περίπτωση η ιδανική Debye απόκριση εξαρτάται εκθετικά από την θερμοκρασία σύμφωνα με την εξίσωση (Jonscher, 1983):

$$x(\omega) \propto \frac{1}{1 + i \cdot \omega \cdot \tau_{\infty} \cdot \exp(W/kT)}$$
(3.18)

όπου τ_{∞} είναι ένας συντελεστής και W είναι η ενέργεια ενεργοποίησης. Από αυτήν την άποψη είναι φανερό ότι η επιδεκτικότητα είναι η ίδια συνάρτηση της συχνότητας με τον όρο exp(W/kT), ή του $log_e\omega$ με τον όρο W/kT. Άρα δεν έχει σημασία εάν στο

γράφημα αναφέρεται η απόκριση της συχνότητας ή της θερμοκρασίας με τις αντίστοιχες κλίμακες. Στην μια παρατηρείται μετά την κορύφωση μείωση της καμπύλης της συχνότητας στις υψηλές θερμοκρασίες. Αντίστοιχα το ίδιο συμβαίνει και στις υψηλές συχνότητες με αύξηση της θερμοκρασίας (σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση της σχέσης ε΄΄(ω,1/Τ) για ιδανική Debye απόκριση (α)και για μη ιδανική Debye απόκριση εζαρτώμενη της θερμοκρασίας (b) (Jonscher, 1983).

Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο αν η απόκριση δεν είναι του τύπου Debye. Σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει τρόπος να συσχετισθεί η εξάρτηση της θερμοκρασίας με αυτήν της συχνότητας. Έτσι είναι προτιμότερη η απεικόνιση της εξάρτησης της συχνότητας με την θερμοκρασία σαν μια απλή παράμετρο.

Έχει αποδειχθεί ότι η συχνότητα δεν αλλάζει σημαντικά με την θερμοκρασία, τουλάχιστον μέσα στο εύρος θερμοκρασιών που δεν επιφέρει αλλαγή στην δομή του υλικού. Αυτό σημαίνει ότι είναι εφικτή η ομαδοποίηση των δεδομένων από διαφορετικό εύρος θερμοκρασιών αλλάζοντας την συχνότητα. Έτσι είναι δυνατόν να προκύψουν συμπεράσματα για την συμπεριφορά του υλικού από ένα μικρό φάσμα συχνοτήτων (Hill and Dissado 1982).

Μια άλλη παράμετρος που επηρεάζει τη διηλεκτρική σταθερά είναι η πίεση, της οποίας η επίδραση είναι παρόμοια με αυτή της θερμοκρασίας. Αύξηση της πίεσης αυξάνει τον ρυθμό διεργασιών αλλά δεν μεταβάλλει τη διηλεκτρική σταθερά. Σαν παράδειγμα παρατίθεται το σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Μεταβολή της ηλεκτρικής επιδεκτικότητας σε σχέση με τη πίεση για δυο διαφορετικές θερμοκρασίες (Jonscher, 1983).

To διάγραμμα του σχήματος 3.4 δείγνει πως μεταβάλλεται η κανονικοποιημένη ηλεκτρική επιδεκτικότητα για ένα πολυμερές ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο σε δυο διαφορετικές θερμοκρασίες για διάφορες τιμές της πίεσης. Για κάθε θερμοκρασία πραγματοποιήθηκαν 4 μετρήσεις με διαφορετική πίεση κάθε φορά. Όλες οι μετρήσεις κανονικοποιήθηκαν σε μια κύρια καμπύλη του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της ηλεκτρικής επιδεκτικότητας. Το διάγραμμα αυτό δείχνει ότι η πίεση και η θερμοκρασία έχουν αντίστοιχη επιρροή στην ηλεκτρική επιδεκτικότητα. Μια αύξηση της πίεσης αναιρείται από μία αύξηση στη θερμοκρασία.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την διηλεκτρική σταθερά είναι η υγρασία. Το πώς επιδρά διακρίνεται στο σχήμα 3.5. Το μικρό διάγραμμα του σχήματος 3.5 δείχνει το πώς μεταβάλλεται η καμπύλη ε΄΄(ω) για διάφορα ποσοστά υγρασίας της άμμου. Το κυρίως διάγραμμα του σχήματος 3.5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα σε κανονικοποιημένη μορφή με το ποσοστό της υγρασίας σαν

29

παράμετρο και με σημείο αναφοράς το Α. Στο ίδιο διάγραμμα εξαφανίζεται και η κανονικοποιημένη καμπύλη του πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς.



Σχήμα 3.5: Αποτελέσματα διηλεκτρικών μετρήσεων σε δείγματα χαλαρής άμμου με διαφορετικό περιεχόμενο υγρασίας (Jonscher, 1983).

Το σχήμα 3.6 παρουσιάζει τα ίδια αποτελέσματα με το διάγραμμα του σχήματος 3.5, όπου σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δυο δείγματα της ίδιας άμμου, με ποσοστό υγρασίας 95% το ένα και πλήρους εμβαπτισμένου σε νερό το άλλο. Στο σχήμα αυτό παρατηρείται ότι οι καμπύλες $\varepsilon'(\omega)$ και $\varepsilon''(\omega)$ είναι παράλληλες στις χαμηλές συχνότητες ενώ στις υψηλές συχνότητες αποκλίνει.


Σχήμα 3.6: Αποτελέσματα διηλεκτρικών μετρήσεων σε δείγματα χαλαρής άμμου με περιεχόμενο υγρασίας 95% και πλήρους εμβαπτισμένου σε νερό (Jonscher A.K., 1983).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4⁰

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ - ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

4.1 Εισαγωγικά

Σε αυτήν την εργασία δείγματα από Διονυσιακό μάρμαρο καταπονήθηκαν μηχανικά με δυο διαφορετικούς τρόπους με σκοπό την δημιουργία αστοχιών στο εσωτερικό τους. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν σε δυο διαστάσεις. Τα δοκίμια με διαστάσεις 38mm x 20mm x 9mm καταπονήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη, ενώ αυτά με διαστάσεις 100mm x 26mm x 10mm καταπονήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων. Η καταπόνηση τους ήταν σταδιακά αυξανόμενη μέχρι το σημείο θραύσης τους. Ενδιάμεσα των φορτίσεων πραγματοποιήθηκαν διηλεκτρικές μετρήσεις στο φάσμα συχνοτήτων από 1kHz έως 1MHz. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν με την παρουσία της φυσικής υγρασίας του δοκιμίου, αλλά και μετά από την απομάκρυνση της. Η απομάκρυνση της υγρασίας πραγματοποιήθηκε σε κλίβανο με θερμοκρασία 105°C για εικοσιτέσσερις ώρες. Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο καθορισμός της μεταβολής των βασικών διηλεκτρικής σταθεράς, καθώς και της αγωγιμότητας) που προκλήθηκαν εξαιτίας της σταδιακής τους καταπόνησης.

4.2 Παρασκευή δοκιμίων

Τα δοκίμια προήλθαν όλα από το ίδιο μπλοκ Διονυσιακού μαρμάρου. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δυο ειδών. Αυτά που οι στρώσεις τους είναι κάθετες προς την διεύθυνση της μονοαξονικής φόρτισης και αυτά που οι στρώσεις τους είναι παράλληλες, καθώς όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 οι μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου στις δυο αυτές διευθύνσεις είναι διαφορετικές. Για τον διαχωρισμό τους, τους δόθηκε αντίστοιχη ονομασία KN (φόρτιση κάθετη στις στρώσεις) και MN (φόρτιση παράλληλη στις στρώσεις).

Απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση διηλεκτρικών μετρήσεων είναι η κατασκευή δοκιμίων με το πάχος της πλευράς που θα χρησιμοποιηθεί για διηλεκτρικές μετρήσεις, να είναι μικρότερο των 10mm, ώστε αυτά να μπορούν να εισέλθουν ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια, αλλά και η διαδρομή που θα διατρέξουν τα ρεύματα διαφορετικών συχνοτήτων να είναι η μικρότερη δυνατή για την αποφυγή διαρροών. Επίσης οι επιφάνειες κάθε πλευράς του δοκιμίου θα πρέπει να είναι λείες και παράλληλες (ιδιαίτερα των πλευρών που θα χρησιμοποιηθούν για διηλεκτρικές μετρήσεις), ώστε τα ηλεκτρόδια να εφάπτονται των πλευρών. Έτσι αποτρέπονται οι διαρροές προς το περιβάλλον. Τέλος οι ακμές τους θα πρέπει να μην παρουσιάζουν ατέλειες, καθώς ως γνωστό σε αυτές συσσωρεύονται τάσεις που προκαλούν αστοχία του δοκιμίου.

Οι αρχικές διαστάσεις των δοκιμίων ήταν λίγο μεγαλύτερες από αυτές των προδιαγραφών και οι επιφάνειές τους τραχείες. Τα δοκίμια που προορίζονταν για μοναξονική θλίψη είχαν αρχικές διαστάσεις 39mm x 21mm x 14mm (μήκος x πλάτος x πάχος). Το πάχος είναι μεγαλύτερο των 10mm. Αντίστοιχα και οι διαστάσεις των δοκιμίων που προορίζονταν για κάμψη τριών σημείων είχαν πάχος μεγαλύτερο των 10mm. Πραγματοποιήθηκε λείανση των δοκιμίων σε λειαντή (σχήμα 4.1) του εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Οι τελικές διαστάσεις των δοκιμίων που καταπονήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη είναι 38mm x 20mm x 9mm, ενώ αυτών που καταπονήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων είναι 100mm x 26mm x 10mm.



Σχήμα 4.1: Εργαστηριακός λειαντής δοκιμίων.

4.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός

Όλη η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε με την συνεργασία του εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και του εργαστηρίου Μελέτης Ηλεκτρικών Ιδιοτήτων Υλικών του τμήματος Ηλεκτρονικής του ΤΕΙ Αθήνας. Η καταπόνηση σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με την άκαμπτη συσκευή φόρτισης MTS-815 (σχήμα 4.2), ενώ η κάμψη τριών σημείων με την συσκευή Tri-Scan 50kN (σχήμα 4.3). Οι διηλεκτρικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από την διάταξη της γέφυρας διηλεκτρικών μετρήσεων Agilent 4284A (20 Hz – 1 MHz) (σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.2: Άκαμπτη συσκευή φόρτισης MTS 815.



Σχήμα 4.3: Συσκευή φόρτισης Tri-Scan 50kN.



Σχήμα 4.4: Γέφυρα διηλεκτρικών μετρήσεων Agilent 4284A.

4.3.1 Σύστημα φόρτισης MTS-815

Ο εργαστηριακός εξοπλισμός αποτελείται από την συσκευή φόρτισης MTS, το σύστημα ελέγχου, το σύστημα μέτρησης και το σύστημα καταγραφής (σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Σχηματικό διάγραμμα λήψης δεδομένων συστήματος φόρτισης MTS.

Η συσκευή φόρτισης MTS-815 (σχήμα 4.2) αποτελείται από τα ακόλουθα τμήματα (Αγιουτάντης και Γαβαλάκη, 1998):

- 1. Πλαίσιο φόρτισης: Το πλαίσιο φόρτισης είναι τύπου MTS 315.01. Στο σχήμα 4.6 απεικονίζονται τα μέρη από τα οποία αποτελείται η συσκευή φόρτισης. Στη βάση του πλαισίου φόρτισης είναι ενσωματωμένο υδραυλικό έμβολο επιβολή δυνάμεων. Τα για την τεγνικά χαρακτηριστικά της συσκευής φόρτισης φαίνονται στον πίνακα 4.1. Το μέγιστο φορτίο, που μπορεί να επιβάλει το έμβολο, είναι ±1600kN (σε θλίψη ή σε εφελκυσμό). Η μέγιστη μετατόπιση του εμβόλου είναι 100 mm ή ± 50 mm από μια θέση ισορροπίας. Το έμβολο αυτό οδηγείται από υδραυλικό ενεργοποιητή μέσω σερβοβαλβίδων που τροφοδοτούνται από υδραυλική αντλία με τυπική πίεση εξόδου 20,7 MPa.
- Μορφοτροπείς μέτρησης φορτίου/μετατόπισης: Οι μορφοτροπείς αυτοί είναι ενσωματωμένοι στο έμβολο φόρτισης.
- Άνω και κάτω πλάκες φόρτισης: Οι πλάκες αυτές τοποθετούνται στο άνω μέρος του πλαισίου και επάνω στο έμβολο αντίστοιχα, και αποτελούν τις βάσεις για τοποθέτηση πρόσθετου εξοπλισμού.
- Ενδιάμεσες πλάκες φόρτισης: Οι πλάκες αυτές χρησιμεύουν για να μειώσουν το άνοιγμα ανάμεσα στις άνω και κάτω πλάκες για δοκιμές με δοκίμια μικρού ύψους.

 Σφαιρική κεφαλή έδρασης: Η κεφαλή στερεώνεται στην άνω πλάκα και έχει σκοπό τη μεταφορά φορτίων ακόμη και σε επιφάνειες που δεν είναι απολύτως κάθετες στον άξονα φόρτισης.



Σχήμα 4.6: Κυριότερα μέρη συσκευής φόρτισης (MTS, 2004).

Μέγιστη φόρτιση	1600kN
Μέγιστη δύναμη	1050kN
Μετατόπιση	100mm
Βάρος	2359kg

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευής MTS (MTS, 2004).

Ο έλεγχος γίνεται από κατάλληλη μικροκονσόλα και περιλαμβάνει τη Μικρογεννήτρια Παλμών (Μ.Π.) και τους ελεγκτές. Οι ελεγκτές (controllers) είναι μονάδες (ηλεκτρονικές, ηλεκτρομηχανικές κ.τ.λ.), οι οποίες παραλαμβάνουν ένα

σήμα καθοδήγησης ή ελέγχου μιας δοκιμής, όπως μια γραμμική (ramp) ή περιοδική (periodic) κυματομορφή, και το μετατρέπουν στην αντίστοιχη μεταβλητή ελέγχου (δύναμη, μετατόπιση κ.τ.λ.). Οι δύο ελεγκτές του συστήματος (ελεγκτής μετατόπισης και ελεγκτής δύναμης) οδηγούνται με τη σειρά τους από ένα χωριστό υποσύστημα παραγωγής κυματομορφών που ονομάζεται μικρογεννήτρια παλμών. Το υποσύστημα αυτό περιέχει μικροεπεξεργαστή και εξάγει αναλογικό σήμα με εύρος στην πλήρη κλίμακα ±10 mm (Παπαδάκη, 2007).

Τα συστήματα μέτρησης διακρίνονται σε εσωτερικά και εξωτερικά. Το εσωτερικό σύστημα μέτρησης περιλαμβάνει κυρίως τους μορφοτροπείς μέτρησης (δυνάμεων μετατοπίσεων). Πρόκειται για υποσυστήματα τα οποία ανιχνεύουν μεταβαλλόμενες φυσικές ποσότητες και τις μετατρέπουν σε ηλεκτρικά ή άλλου τύπου σήματα, τα οποία είναι αποδεκτά από το σύστημα μέτρησης δεδομένων. Στις περισσότερες εφαρμογές πρόκειται για συσκευές που μετατρέπουν ένα μονοδιάστατο μέγεθος (π.χ. τη θερμοκρασία, την πίεση, το μήκος, τη θέση κτλ.), σε διαφορά δυναμικού, συχνότητα ρεύματος, παλμούς ρεύματος κτλ. Η μέτρηση του αξονικού φορτίου και της αξονικής μετατόπισης στο σύστημα αυτό του ΕΜΠΠΚ γίνεται μέσω γραμμικών μεταβλητών διαφορικών μορφοτροπέων (Linear Variable Differential Transducer, LVDT), που είναι ενσωματωμένοι στη βάση του εμβόλου φόρτισης από την κατασκευάστρια εταιρεία. Τα εξωτερικά συστήματα που είναι εγκατεστημένα είναι ένα κελί φορτίου (load cell) των 500 kN και δυο LVDT, ένα με εύρος 0-10 mm και ένα με εύρος 0-25mm (Παπαδάκη, 2007).

Το σύστημα καταγραφής των μετρήσεων αποτελείται από την κάρτα PCL-816 της εταιρίας Advantech σε συνδυασμό με το λογισμικό DASYLab. Το σύστημα αυτό έχει την δυνατότητα καταγραφής αναλογικών σημάτων δύναμης μετατόπισης με εύρος 10 Volt. Η συχνότητα της δειγματοληψίας μπορεί να φτάσει και τα 100 Hz. Το αναλογικό σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακό με διακριτική ικανότητα 16-bits.

Το DasyLab προσφέρει ένα γραφικό περιβάλλον το οποίο απλοποιεί και τις πιο σύνθετες διαδικασίες απεικόνισης και καταγραφής δεδομένων. Το λογισμικό αυτό μπορεί να απεικονίσει στην οθόνη τα δεδομένα που λαμβάνει ταυτόχρονα από ένα ή περισσότερα κανάλια με μορφή καταλόγων χρησιμοποιώντας την μπάρα κύλισης μπορεί ο χρήστης να ανατρέξει σε ήδη καταγεγραμμένες τιμές καθώς συνεχίζονται οι μετρήσεις από το σύστημα καταγραφής. Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται το περιβάλλον του λογισμικού DasyLab. Η αποθήκευση των δεδομένων γίνεται σε αρχεία ASCII.

III List			
Edit Display	Help		
6 . R	A 2 6		
Time	Displacement	Load	
22,5	0,8362	0,4272	<u></u>
26,0	0.8417	0,4883	
28,0	0,8429	0,5341	
31,0	0,8469	0,4883	1
34,0	0,8548	0,6256	
35.0	0,8557	0,5341	
38,0	0,8578	0,6561	
40,5	0,8591	0,6409	
44,0	0,8606	0,7324	
49.0	0.8600	0,8240	
49,5	0,8594	0,8240	
52,5	0,8704	0,9308	
58,5	0,8719	1,0529	
59,0	0,8783	1,0529	
59,5	0.8813	0.9460	×
0.03			3

Σχήμα 4.7: Περιβάλλον απεικόνισης αποτελεσμάτων λογισμικού DasyLab.

4.3.2 Σύστημα φόρτισης Tri-Scan

Η συσκευή Tri-Scan 50kN (σχήμα 4.3) έχει σχεδιαστεί ειδικά για εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής φόρτισης εδάφους ή σκυροδέματος. Με την προσθήκη πρόσθετου εξαρτήματος είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί και κάμψη τριών σημείων (σχήμα 4.8). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής φόρτισης του Εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης δίνονται παρακάτω:

- Εύρος ταχύτητας φόρτισης 0-10.00000 mm/min
- Ρύθμιση της ταχύτητας της πλάκας φόρτισης έως 99.99 mm/min
- Ενσωματωμένος μικροεπεξεργαστής
- Οθόνη LCD 75x 125 mm
- Πληκτρολόγιο χειρισμού με 20 πλήκτρα
- Σφαιρική κεφαλή



Σχήμα 4.8: Ειδικός υποδοχέας για δοκιμές κάμψης τριών σημείων στην συσκευή Tri-Scan 50 kN.

Ο έλεγχος στην Tri-Scan γίνεται από την ενσωματωμένη κονσόλα ελέγχου. Η κονσόλα αυτή μπορεί να επιβάλλει μόνο έλεγχο μετατόπισης, δηλαδή να προσδιορίζει τον ρυθμό κίνησης του εμβόλου σε mm/sec. Το σύστημα ελέγχει το κατά πόσο η επιβαλλόμενη μετατόπιση διαφέρει από αυτή που εφαρμόζεται στο δοκίμιο.

Η μέτρηση του φορτίου γίνεται με εξωτερικό κελί φορτίου των 50 kN της εταιρίας Applied Measurements Limited τύπου DBBSE-5T (σχήμα 4.9). Η καταγραφή της μετατόπισης γίνεται έμμεσα ή/και άμεσα. Με τον έμμεσο τρόπο ανάγεται ο χρόνος εκτέλεσης του πειράματος σε γραμμική μεταβολή μετατόπισης ενώ άμεσα γίνεται με LVDT. Το σύστημα καταγραφής δεδομένων είναι το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιείται στη συσκευή φόρτισης MTS-815.



Σχήμα 4.9: Εξωτερικό κελί φορτίου 50kN και σφαιρική κεφαλή συσκευής Tri-Scan.

4.3.3 Γέφυρα διηλεκτρικών μετρήσεων Agilent 4284A

Για την λήψη των διηλεκτρικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η γέφυρα Agilent 4284A (20 Hz - 1 MHz). Η γέφυρα Agilent 4284A απεικονίζεται στο σχήμα 4.4. Η τοποθέτηση των προς μέτρηση δειγμάτων γίνεται μέσα σε ειδικά σχεδιασμένο κλωβό (σχήμα 4.10), ώστε να διατηρούνται σταθερές οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Μέσα στον κλωβό είναι προσαρμοσμένος και ο υποδοχέας (holder) δειγμάτων Agilent 16421B (σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.10: Κλωβός μέτρησης διηλεκτρικών παραμέτρων.



Σχήμα 4.11: Ο υποδοχέας (holder) δειγμάτων Agilent 16421B.

Οι δυο μεταλλικές πλάκες του υποδοχέα είναι τα ηλεκτρόδια μέσα από τα οποία διαδίδεται το ρεύμα διαφορετικών συχνοτήτων. Στο πάνω μέρος του υποδοχέα υπάρχει ένα μικρόμετρο για την μέτρηση του πάχους του δοκιμίου.

Επειδή το συγκεκριμένο σύστημα μετρήσεων είναι ευαίσθητο στις μεταβολές του περιβάλλοντος (πίεση, υγρασία, παραλληλία εδρών δειγμάτων, θερμοκρασία κ.α.), απαιτείται βαθμονόμηση της γέφυρας πριν από κάθε σειρά μετρήσεων. Η βαθμονόμηση αφορά κυρίως τη λειτουργία της γέφυρας LCR, αλλά και τη λειτουργία της σε συνδυασμό με τον υποδοχέα δειγμάτων. Η περιγραφή της διαδικασίας βαθμονόμησης που ακολουθεί γίνεται με τη βοήθεια του σχήματος 4.12. Το σχήμα 4.13 απεικονίζει την διαδικασία βαθμονόμησης.

 Στο κυρίως μενού της γέφυρας (display format) (4) με τα βελάκια επιλέγεται η λειτουργία που θα πραγματοποιηθεί. Για τη ρύθμιση της λειτουργία χρησιμοποιούνται οι 5 κάθετους διακόπτες στα δεξιά του Panel (3). Γίνεται πολύς καλός καθαρισμός του ηλεκτροδίου που θα τοποθετηθεί στον υποδοχέα. Απαγορεύεται οποιαδήποτε επαφή των χεριών με το ηλεκτρόδιο, καθώς έτσι εναποτίθεται υγρασία πάνω τους.



Σχήμα 4.12: Σχηματικό διάγραμμα της γέφυρας Agilent 4284A.



Σχήμα 4.13: Διαδικασία βαθμονόμησης του μετρητικού συστήματος.

 Η διαδικασία της βαθμονόμησης ξεκινάει επιλέγοντας Meas setup (4) και στην συνέχεια επιλέγοντας το δεύτερο από τα κάθετα (correction) (2,3).

- Επιλέγεται από οριζόντια βελάκια Open και Sort και από τα κάθετα το off (2,5).
- 5. Τοποθετείται το ηλεκτρόδιο στην πάνω μεριά, με το καπάκι να βλέπει προς τα κάτω. Το μικρόμετρο χαμηλώνει μέχρι να ακουμπήσει το ηλεκτρόδιο. Στην συνέχει σφραγίζεται ο κλωβός και από το open επιλέγεται το Meas open. Έπειτα από αναμονή 90 sec ηχεί ένας προειδοποιητικός ήχος. Όταν ακουστεί ο ήχος επιλέγεται από τα κάθετα κουμπιά το πρώτο (on).
- Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται η διαδικασία του 5, γυρίζοντας ανάποδα το ηλεκτρόδιο και αφαιρώντας το καπάκι.
- 7. Από τα οριζόντια κουμπιά επιλέγεται Display format.
- To Open και το Sort έχουν τελειώσει όταν στην οθόνη της γέφυρας αναγράφεται η ένδειξη measurement completed.
- 9. Στην συνέχεια απομακρύνεται ο δίσκος.
- Όταν το μικρόμετρο είναι στη θέση 0 ή 0,1 και στην οθόνη της γέφυρας αναγράφεται ότι οι τιμές του C_p είναι ανάμεσα στα 12 με 17 pF, τότε η διαδικασία της βαθμονόμησης έχει ολοκληρωθεί.

Η διαδικασία καταγραφής γίνεται σε Η/Υ με την βοήθεια του λογισμικού Cp-Rp.vee. Στο σχήμα 4.14 απεικονίζεται όλο το σύστημα μέτρησης διηλεκτρικών μετρήσεων, ενώ στο σχήμα 4.15 απεικονίζεται το περιβάλλον του λογισμικού Cp-Rp.vee.



Σχήμα 4.14: Σύστημα μέτρησης διηλεκτρικών παραμέτρων.



Σχήμα 4.15: Λογισμικό λήψης διηλεκτρικών μετρήσεων.

Πριν από κάθε μέτρηση καθορίζεται ο φάκελος και το όνομα του αρχείου που θα αποθηκευτούν τα δεδομένα των μετρήσεων. Τα αρχεία αυτά είναι της μορφής *.txt. Πριν από κάθε μέτρηση σημειώνεται το πάχος του κάθε δοκιμίου σε mm, από την ένδειξη του μικρόμετρου. Η διεξαγωγή μίας μέτρησης γίνεται πατώντας το κουμπί Run, ενώ μόλις τελειώσει η διαδικασία εμφανίζεται παράθυρο.

4.4 Πειραματική διαδικασία

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει αναφορά στο γενικό πλάνο της πειραματικής διαδικασίας. Η πειραματική διαδικασία ξεκίνησε με τον προσδιορισμό του ελάχιστου



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα ροής πειραματικής διαδικασίας.

ορίου θραύσης για όλα τα δοκίμια (KN, MN και κάμψης). Το όριο θραύσης θα χρησιμεύσει στον καθορισμό της σταδιακής αύξησης του ποσοστού φόρτισης κάθε είδους δοκιμίου. Έξι δοκίμια KN και έξι MN με τις αρχικές τους διαστάσεις καταπονήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη. Έτσι υπολογίστηκε το ελάχιστο όριο θραύσης κάθε είδους δοκιμίου. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για πέντε δοκίμια κάμψης τελικών διαστάσεων μόνο που τώρα καταπονήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων μέχρι την θραύση τους. Αντίστοιχα υπολογίστηκε το ελάχιστο όριο θραύσης το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό της σταδιακής αύξησης του ποσοστού φόρτισης που επιβλήθηκε.

Στη συνέχεια σε 20 δοκίμια KN, 22 δοκίμια MN και 10 δοκίμια κάμψης, πραγματοποιήθηκαν διηλεκτρικές μετρήσεις με και χωρίς την φυσική τους υγρασία. Η απομάκρυνση της φυσικής τους υγρασίας έγινε με την παραμονή των δοκιμίων σε φούρνο για εικοσιτέσσερις ώρες στους 105°C. Τα δοκίμια KN και MN φορτίστηκαν μονοαξονικά μέχρι ορισμένου ποσοστού του μέγιστου ορίου θραύσης τους. Αντίστοιχα φορτίστηκαν και τα δοκίμια σε κάμψη τριών σημείων. Η παραπάνω σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε πολλές φορές με αυξανόμενο το ποσοστό φόρτισης κάθε φορά. Η πειραματική διαδικασία τερματίστηκε όταν η πλειοψηφία τον δοκιμίων έχει αστοχήσει. Στο σχήμα 4.16 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής όλης της πειραματικής διαδικασίας.

4.4.1 Όρια θραύσης δοκιμίων

Τα όρια θραύσης των δοκιμίων είναι απαραίτητα για τον καθορισμό της σταδιακής αύξησης του ποσοστού φόρτισης κάθε είδους δοκιμίου. Για την εύρεση του ορίου αστοχίας σε μονοαξονική θλίψη χρησιμοποιήθηκαν έξι δοκίμια αρχικών διαστάσεων από τα KN και έξι από τα MN, οπού ονομάστηκαν αντίστοιχα K1,K2,...,K6 και M1,M2,...,M6 (σχήμα 4.17). Τα δοκίμια αυτά έχουν διαστάσεις περίπου 39mm x 21mm x 14mm. Πριν από την καταπόνηση τους, μετρήθηκαν οι πλευρές όλων των δοκιμίων με παχύμετρο. Για κάθε ζευγάρι απέναντι πλευρών πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις του πάχους τους. Υπολογίστηκε ο μέσος όρος του πάχους κάθε πλευράς, καθώς και το εμβαδό σε cm² της πλευράς που θα καταπονηθεί σε μονοαξονική θλίψη. Όλα τα δεδομένα συγκεντρώθηκαν και καταγράφτηκαν σε πίνακα της μορφής του σχήματος 4.18.



Σχήμα 4.17: Δοκίμια υπολογισμού ορίου θραύσης σε μονοαζονική θλίψη.

ΑΡΙΘΜΟΣ / ΕΙΔΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	Н (мегалн плеура)	h (МІКРН ПЛЕУРА)	а (АКМН ӨРАҮΣНΣ)	EMBAAON (cm²)
	H1=2,035	h1=1,415	a1= 3,940	
1/1	H2=9,040	h2= 1,415	a2= 3,310	F=9.886
IC L	H3=21045	h3= 4,415	a3= 3,835	2 2,000
	M.O.=2,040	M.O.=1,415	M.O.=3, 915	
	H1=2,045	h1=1,440	a1= 3,850	
1/9	H2=2,040	h2= {1425	a2= 5,855	F=9.914
K L	H3=2,030	h3=1,425	a3= 3,8 70	2-2,0.9
	M.O.=2,038	M.O.=1,430	M.O.=5,858	
	$\mathrm{H}_{1} = \mathfrak{A}_{1} \mathcal{O}_{4} \mathcal{S}$	h1=1,445	a1= 3,800	
4.2	$H_2=2,035$	h2=1,450	a2= 3,800	F= 9.951
K S	H3=2,035	h3=1.450	a3= 3,800	L- 1,002
	M.O.=2,038	M.O.=1,448	M.O.=3,800	

Σχήμα 4.18: Πίνακας καταγραφής πάχους πλευρών δοκιμίων και υπολογισμός του εμβαδού της πλευράς φόρτισης.

Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στην συσκευή φόρτισης MTS-815 για να υποστούν μονοαξονική θλίψη. Η συσκευή επιβάλλει σταθερό ρυθμό φόρτισης στο δοκίμιο ίσο με 0,001mm/sec, ενώ συγχρόνως μετράει και καταγράφει το επιβαλλόμενο φορτίο και την μετατόπιση. Τα δεδομένα του κάθε δοκιμίου καταγράφονται από το λογισμικό DasyLab σε αρχεία ASCII. Τα αρχεία αυτά εισάγονται σε ξεχωριστά φύλλα εργασίας του EXCEL. Από την στήλη του φορτίου βρίσκεται το μέγιστο φορτίο που επιβλήθηκε σε κάθε δοκίμιο για την αστοχία του. Όλα τα μέγιστα φορτία των δοκιμίων παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2.

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο σε kN	Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο σε kN
K1	15,63	M1	14,10
K2	16,30	M2	8,01
K3	20,05	M3	21,55
K4	19,18	M4	12,80
K5	21,70	M5	9,90
K6	21,76	M6	13,66

Πίνακας 4.2: Μέγιστα φορτία δοκιμίων Κ και Ν.

Από τον πίνακα 4.2 παρατηρείται ότι τα μέγιστα φορτία των δοκιμίων Μ εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά από αυτά των δοκιμίων Κ. Στην ενότητα 2.1.2 αναφέρθηκε ότι το γεγονός αυτό οφείλεται στην ανισοτροπία του μαρμάρου Διονύσου.

Από κάθε είδους δοκίμιο επιλέγεται το ελάχιστο μέγιστο φορτίο για να χρησιμοποιηθεί στην κατάρτιση της βαθμιαίας αύξησης του φορτίου της πειραματικής διαδικασίας που αναφέρθηκε στην ενότητα 4.4. Επομένως επιλέγεται το φορτίο 15,63 kN για τα K δοκίμια και το φορτίο 8,01 kN για τα M δοκίμια. Τα μέγιστα φορτία αφορούν δοκίμια διαστάσεων περίπου 39mm x 21mm x 14mm, ενώ τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία έχουν διαστάσεις περίπου 38mm x 20mm x 9mm. Επομένως, είναι απαραίτητο, για την σωστή σύγκριση των τιμών των μέγιστων φορτίων των δοκιμίων, να γίνει αναγωγή των τιμών αυτών στις αντίστοιχες διαστάσεως. Για την αναγωγή αυτή γίνεται η παραδοχή ότι για μικρές μεταβολές των διαστάσεων των δοκιμίων το φορτίο 15,63 kN και το εμβαδό επιβολής του φορτίου αυτού είναι 2,89 cm². Η μέση τιμή του εμβαδού των KN δοκιμίων είναι 1,78 cm². Κάνοντας την αναγωγή, σε αυτή την νέα διάσταση προκύπτει ένα φορτίο 9,66 kN, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στον καθορισμό της σταδιακής αύξησης του ποσοστού φόρτισης των δοκιμίων KN. Ομοίως το δοκίμιο M2 αστοχεί σε επιβαλλόμενο φορτίο 8,01 kN και το εμβαδό επιβολής του φορτίου αυτού είναι 2,95 cm². Η μέση τιμή του εμβαδού των KN δοκιμίων είναι 1,86 cm². Συνεπώς το φορτίο που θα χρησιμοποιηθεί στον καθορισμό της σταδιακής αύξησης του ποσοστού φόρτισης των δοκιμίων MN είναι 5,03 kN.

Για τον προσδιορισμό της ελάχιστης αντοχής σε κάμψη τριών σημείων των δοκιμίων, επιλέχτηκαν πέντε δοκίμια από τα δεκαεπτά που κατασκευάστηκαν. Πιο συγκεκριμένα επιλέχτηκαν τα X2,X3,X4,X7 και X14 διαστάσεων 100mm x 26mm x 10mm. Τα δοκίμια αυτά καταπονήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων στη συσκευή Tri-Scan (σχήμα 4.18).



Σχήμα 4.18: Μέτρηση αντοχής σε κάμψη τριών σημείων στην συσκευή Tri-Scan.

Κατά την διαδικασία της μέτρησης της αντοχής σε κάμψη τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στην συσκευή Tri-Scan, έτσι ώστε η απόσταση των δυο κάτω εδρών στήριξης να είναι σταθερή και ίση με οκτώ εκατοστά. Η πάνω έδρα επαφής εφάπτεται ακριβώς στο κέντρο του δοκιμίου. Η συσκευή επιβάλει σταθερό ρυθμό μετατόπισης ίσο με 0,06 mm/sec.

Κατά την διεξαγωγή των καταπονήσεων, η συσκευή Tri-Scan με την βοήθεια του λογισμικού DasyLab καταγράφει το επιβαλλόμενο φορτίο και την μετατόπιση. Τα δεδομένα κάθε δοκιμίου αποθηκεύονται σε αρχεία ASCII. Τα αρχεία αυτά εισάγονται σε ξεχωριστά φύλλα εργασίας του EXCEL. Από την στήλη του φορτίου βρίσκεται το μέγιστο φορτίο που επιβλήθηκε σε κάθε δοκίμιο για την αστοχία του. Όλα τα μέγιστα φορτία των δοκιμίων παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3. Στα φορτία αυτά έχει προστεθεί και το βάρος της κατασκευής το οποίο είναι ίσο με 0,2 kN. Από τον πίνακα 4.3 παρατηρείται ότι το ελάχιστο μέγιστο φορτίο αντοχής σε κάμψη είναι αυτό του δοκιμίου X2 (0,97 kN), το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στον καθορισμό της σταδιακής αύξησης του ποσοστού φόρτισης των δοκιμίων X.

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο σε kN
X2	0,97
X3	1,28
X4	1,24
X7	1,17
X14	1,05

Πίνακας 4.3: Μέγιστα φορτία αντοχής σε κάμψη δοκιμίων Χ.

4.4.2 Μονοαξονική φόρτιση δοκιμίων

Από τον προσδιορισμό της ελάχιστης αντοχής σε μοναξονική θλίψη των δοκιμίων KN και MN καθορίζονται οι τιμές του φορτίου των διαδοχικών φορτίσεων. Πιο συγκεκριμένα τα δοκίμια KN έχουν ελάχιστη αντοχή 9,66 kN. Οι διαδοχικές φορτίσεις τους θα πραγματοποιηθούν μέχρι η τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου να ανέλθει σε 3,2 kN, 6 kN και 8,5 kN αντίστοιχα. Ομοίως τα δοκίμια MN με ελάχιστη αντοχή 5,03 kN, θα φορτιστούν διαδοχικά μέχρι το επιβαλλόμενο φορτίο ανέλθει σε 1,7 kN, 3,5 kN και 8,5 kN αντίστοιχα.

Συνολικά επιβλήθηκε σταδιακά αυξανόμενο φορτίο σε 20 δοκίμια KN και 22 δοκίμια MN (σχήμα 4.19). Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στην συσκευή φόρτισης MTS-815, βάση των κανόνων και των παραμέτρων που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.4.1 και στην ενότητα 2.2. Τα αποτελέσματα κάθε δοκιμίου αποθηκεύονταν σε αρχεία ASCII μέσα από το λογισμικό DasyLab. Στην συνέχεια τα αρχεία διαδοχικών φορτίσεων εισάγονται σε φύλλα εργασίας του EXCEL προς επεξεργασία. Η επεξεργασία αφορά την δημιουργία της γραφικής παράστασης τάσης-παραμόρφωσης κάθε δοκιμίου. Στο σχήμα 4.20 παρουσιάζεται η τελική μορφή που πρέπει να έχει κάθε αρχείο ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί η γραφική παράσταση τάσης-παραμόρφωσης.



Σχήμα 4.19: Φόρτιση δοκιμίων ΚΝ και ΜΝ στην συσκευή MTS - 815.

Το αρχείο αρχικά περιέχει τις στήλες Α έως F. Η στήλη της μετατόπισης G προκύπτει αν από την στήλη B αφαιρέθει η αρχική της τιμή που βρίσκεται στο κελί B8. Η στήλη B έχει να κάνει με την μετατόπιση της κεφαλής της συσκευής MTS-815 με την πάροδο του χρόνου. Η στήλη Η αντιστοιχεί στην παραμόρφωση του δοκιμίου κάθε χρονική στιγμή και υπολογίζεται από την διαίρεση της στήλης της μετατόπισης G με το αρχικό ύψος του δοκιμίου σε χιλιοστά. Η στήλη της τάσης I υπολογίζεται από την διαίρεση της στήλης D με το εμβαδό της επιφάνειας που ασκείται το επιβαλλόμενο φορτίο. Το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με το δέκα, ώστε η τάση που προκύπτει να είναι σε MPa.

	A	В	C	D	E	F	G	н	1.
1	DASYLab -	V 3.00.16							
2	WORKSHE	EET	SMT1600	L					
3	Recording	Date : E	3/7/2005,1	2:09:22					
4	Block Leng	th :1							
5	Delta	: 0.499	996 sec.						
6	Number of	Channels :	6						
7	Time	Write 0	Write 1	Write 2	Write 3	Write 4	Displecement MTS (mm)	Strain	Stress (MPa)
8	0	11,73706	-1,9043	0,396729	-0,00122	-0,0061	0,000	0,000	2,148
9	0,499996	11,74774	-2,05078	0,38147	-0,00153	-0,00305	0,011	0,000	2,065
10	0,999992	11,75537	-1,80664	0,442505	-0,00153	-0,00458	0,018	0,000	2,396
11	2,999976	11,7569	-1,75781	0,518799	-0,00092	-0,0061	0,020	0,001	2,809
12	4,99996	11,7569	-1,80664	0,534058	-0,00122	-0,00458	0,020	0,001	2,891
13	6,999944	11,763	-1,70898	0,534058	-0,00153	-0,00458	0,026	0,001	2,891
14	10,99991	11,76605	-1,85547	0,62561	-0,00153	-0,00305	0,029	0,001	3,387
15	13,49989	11,76758	-1,70898	0,579834	-0,00092	-0,00458	0,031	0,001	3,139
16	15,49988	11,77368	-1,95313	0,671387	-0,00092	-0,00458	0,037	0,001	3,635
17	17,49986	11,77521	-1,61133	0,595093	-0,00153	-0,0061	0,038	0,001	3,222
18	19,99984	11,78284	-1,46484	0,732422	-0,00122	-0,0061	0,046	0,001	3,965
19	22,49982	11,78436	-1,5625	0,793457	-0,00122	-0,00458	0,047	0,001	4,296
20	26,49979	11,78742	-1,51367	0,839233	-0,00122	-0,00458	0,050	0,001	4,544
21	26,99978	11,79352	-1,36719	0,793457	-0,00122	-0,0061	0,056	0,001	4,296
22	41,49967	11,79657	-1,36719	0,961304	-0,00122	-0,00305	0,060	0,002	5,205
23	41,99966	11,79962	-1,36719	0,961304	-0,00153	-0,0061	0,063	0,002	5,205
24	44,49964	11,80267	-1,12305	1,00708	-0,00153	-0,00458	0,066	0,002	5,453
25	46,99962	11,80878	-1,26953	1,052856	-0,00092	-0,00458	0,072	0,002	5,700
26	49,4996	11,81183	-1,2207	1,052856	-0,00122	-0,00458	0,075	0,002	5,700
27	49,9996	11,81183	-1,17188	1,068115	-0,00122	-0,0061	0,075	0,002	5,783
28	61,49951	11,81793	-0,92773	1,220703	-0,00122	-0,00305	0,081	0,002	6,609
29	64,49948	11,82098	-1,41602	1,342773	-0,00153	-0,00458	0,084	0,002	7,270
30	64,99948	11,82098	-1,02539	1,342773	-0,00153	-0,00305	0,084	0,002	7,270

Σχήμα 4.20: Επεξεργασία αρχείων δοκιμίων KN και MN.

4.4.3 Κάμψη τριών σημείων

Από τον προσδιορισμό του ελάχιστου φορτίου κάμψης τριών σημείων των δοκιμίων Χ καθορίζονται οι τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου των διαδοχικών φορτίσεων. Πιο συγκεκριμένα τα δοκίμια Χ έχουν ελάχιστο μέγιστο φορτίο κάμψης 0,97 kN. Οι διαδοχικές φορτίσεις τους θα πραγματοποιηθούν μέχρι η τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου να ανέλθει σε 0,4 kN, 0,5 kN και 0,7 kN αντίστοιχα.

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στην συσκευή φόρτισης Tri-Scan 50 kN, βάση των παραμέτρων που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.4.1. Στα δοκίμια μετριούνται και καταγράφονται σε πίνακα (σχήμα 4.17) οι διαστάσεις τους. Σε κάθε δοκίμιο σημειώνεται η πάνω πλευρά φόρτισης του δοκιμίου. Επίσης σημειώνονται οι αριθμοί 1,2 και 3 ξεκινώντας από την πάνω πλευρά (σχήμα 4.21). Οι αριθμοί αυτοί αντιπροσωπεύουν το ύψους που θα πραγματοποιηθούν διηλεκτρικές μετρήσεις. Δηλαδή σε κάθε δοκίμιο X θα πραγματοποιηθούν μετρήσεις στην πάνω περιοχή κάμψης όπου το δοκίμιο θλίπτεται, στην ουδέτερη κεντρική ζώνη και στην κάτω περιοχή κάμψης όπου το δοκίμιο εφελκύεται.



Σχήμα 4.21: Τοποθέτηση δοκιμίων στη συσκευή Tri-Scan με την πάνω πλευρά να αντιστοιχεί στον αριθμό 1.

Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 4.4.1, η θέση τοποθέτησης των δοκιμίων ήταν τέτοια ώστε η απόσταση των δυο κάτω βάσεων στήριξης των δοκιμίων να είναι 80mm και ο ρυθμός μετατόπισης 0,06 mm/sec. Τα αποτελέσματα κάθε δοκιμίου αποθηκεύονταν σε αρχεία ASCII μέσα από το λογισμικό DasyLab.

4.4.4 Διηλεκτρικές μετρήσεις

Οι διηλεκτρικές μετρήσεις όλων των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μελέτης Ηλεκτρικών Ιδιοτήτων Υλικών του Τμήματος Ηλεκτρονικής του ΤΕΙ Αθήνας, στην πειραματική διάταξη της γέφυρας Agilent 4284A (σχήμα 4.14). Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα αρχικά αφόρτιστα δοκίμια, αλλά και έπειτα από κάθε φόρτισή τους. Κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε στον υποδοχέα του σχήματος 4.11, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με την φυσική του υγρασία και στη συνέχεια εισήχθησαν σε κλίβανο για εικοσιτέσσερις ώρες και θερμαίνεται στους 105°C. Οι διηλεκτρικές μετρήσεις είναι πάντα κάθετες στην μονοαξονική φόρτιση. Την επόμενη μέρα επαναλήφθηκε η πειραματική διαδικασία με απουσία της φυσικής τους υγρασίας.

Πριν από κάθε σειρά μετρήσεων πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση της γέφυρας με βάση την διαδικασία που αναφέρθηκε στην ενότητα 4.3.3. Στην συνέχεια ακολουθήθηκε η εξής πειραματική διαδικασία:

- Ανοίγεται ο κλωβός και τοποθετείται το δοκίμιο στον υποδοχέα, με το ηλεκτρόδιο να εφάπτεται πλήρως στην κεντρική περιοχή της πλευράς με πάχος μικρότερο των 10mm (σχήμα 4.11). Στην συνέχεια το δοκίμιο σταθεροποιείται, ενώ μετρείται και σημειώνεται το πάχος του με την βοήθεια του μικρόμετρου. Σφραγίζεται ο κλωβός.
- 2. Ανοίγεται το λογισμικό Cp-Rp.vee (σχήμα 4.15). Επιλέγεται ο φάκελος που θα τοποθετηθεί το αρχείο των μετρήσεων με όνομα το οποίο του προσδίδεται από τον χειριστή και κατάληξη txt. Η πραγματοποίηση μετρήσεων γίνεται με την εντολή run (βέλος στο πάνω αριστερό μέρος του σχήματος 4.15). Το δοκίμιο διατρέχεται από ρεύμα με εύρος συχνοτήτων από 1 kHz μέχρι 1 MHz. Στο αρχείο txt αποθηκεύεται για κάθε συχνότητα η παράλληλη χωρητικότητα *Cp* και η παράλληλη αντίσταση *Rp*. Όταν ολοκληρωθεί η μέτρηση εμφανίζεται παράθυρο και επιλέγεται close.

Συγκεκριμένα για τα δοκίμια της κάμψης πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις στις περιοχές 1, 2 και 3, για να μελετηθούν οι περιοχές θλίψης και εφελκυσμού. Το σχήμα 4.22 παρουσιάζει τις περιοχές διηλεκτρικών μετρήσεων σε δοκίμιο κάμψης.



Σχήμα 4.22: Θέσεις διηλεκτρικών μετρήσεων σε δοκίμια κάμψης.

Η επεξεργασία των μετρήσεων γίνεται σε ένα ειδικά διαμορφωμένο φύλλο εργασίας του EXCEL με το όνομα dlm proc.xls. Στο αρχείο αυτό εκτελείται μία μακροεντολή που έχει δημιουργηθεί στο εργαστήριο Μελέτης Ηλεκτρικών Ιδιοτήτων Υλικών του Υμήματος Ηλεκτρονικής του ΤΕΙ Αθήνας. Με την μακροεντολή υπολογίζεται για κάθε συχνότητα η αγωγιμότητα, το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της καθώς και η tanδ. Η εκτέλεση της μακροεντολής γίνεται από το μενού εργαλεία -> μακροεντολή -> μακροεντολές. Η εκτέλεση της μακροεντολής προϋποθέτει χαμηλό επίπεδο ασφαλείας του υπολογιστή. Κατά την επιλογή της εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 4.23. Στο παράθυρο αυτό σημειώνεται το πάχος του δοκιμίου σε χιλιοστά που μετρήθηκε από το μικρόμετρο του υποδοχέα της γέφυρας. Στη συνέχεια φορτώνεται το αρχείο *.txt με τις πειραματικές μετρήσεις του ίδιου δοκιμίου. Σημειώνεται η στήλη που θα τοποθετηθούν τα αποτελέσματα της επεξεργασίας, καθώς και η γραμμή που θα σταματήσουν οι υπολογισμοί. Τέλος πατώντας στο κουτί υπολογισμού και μεταφοράς δεδομένων εμφανίζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας (αγωγιμότητα, πραγματικό μέρος, φανταστικό μέρος και tanδ) σε ξεγωριστό φύλλο εργασίας το κάθε ένα και στην στήλη που ορίστηκε αρχικά. Με αυτήν την μακροεντολή μπορεί να πραγματοποιηθεί υπολογισμός και μεταφορά δεδομένων από άλλο αρχείο σε διπλανή στήλη. Έτσι διαμορφώνεται για κάθε δοκίμιο ξεχωριστό αρχείο με τα αποτελέσματα όλης της σειράς πειραματικών μετρήσεων που του έγιναν.

αχείριση Διηλεκτρι	κών Μετρήσ
Πάχος Δείγματος (mm)	
Φόρτωση Αρχείου Μετρήσεων	
Σε ποια στήλη θα γίνει η μεταφορά	
Μέχρι ποια γραμμή θα παρθούν δε	δομένα
Υπολογισμός και	

Σχήμα 4.23: Στιγμιότυπο προγράμματος μεταφοράς και προ-επεξεργασίας μετρήσεων διηλεκτρικής φασματοσκοπίας.

	A	В	C	D	E	F	G	н
1	1,00E+06	0,217895	0,112094	1.10	2010	100		
2	800000	0,218177	0,138986					
3	666667	0,218414	0,162598					
4	600000	0,218466	0,186593					
5	400000	0,218902	0,279864					
6	3333333	0,218857	0,252521					
7	300000	0,219094	0,326619					
8	250000	0,219309	0,403168					
9	200000	0,219508	0,500673					
10	150000	0,219906	0,678624					
11	125000	0,220118	0,83358					
12	120000	0,220232	0,884932					-
13	100000	0,220326	0,987977					
14	80000	0,220623	1,23995					
15	60000	0,220893	1,63018					
16	50000	0,221175	1,9804					
17	40000	0,221372	2,47828					
18	30000	0,221768	3,42499					
19	25000	0,222062	3,93362					
20	20000	0,222336	5,55194					
21	15000	0,222706	8,35019					
22	14117,6	0,22284	8,0632					_
23	12000	0,223144	9,20802					
24	10000	0,223629	12,906					
25	8000	0,223295	18,5093					
26	6000	0,224147	56,1086					
27	5000	0,224462	33,1116					
28	4000	0,224543	83,6077					
29	3000	0,225966	-65,5802					
30	2000	0,226393	-67,5624				1	
31	1500	0,228995	-123,959					

H + H measurements (calc / TanD / Conductivity / Real_part / Imaginary_part /

β)

	A	В	C	D	E	F	G	Н		J	K
1										mm	m
2									t-	9,45	9,450E-03
3									d=	5	5,000E-03
4									d^2=	25	2,500E-05
5									1/εοA=		5,760E+15
6									£0=	8,8464E-12	
7									A-	1.963E-05	
8											
9											
10	f(Hz)	ω(1/s)	Cp(pF)	Rp(GQ)	tanð	tanð	Øac	C.	17	(°	
11			μετρήσει	ις από τη	νέφυρα	τύπος (1)	τύπος (4)	τύπος (3)	τύπος (6)	τύπος (2)	
12										μέσω tanð	
13	1,00E+06	6.28E+06	0,217895	0,112094		6.52E-03	4.296E-06	11.860	0.08	0.077	
14	800000	5.02E+06	0,218177	0,138986		6,56E-03	3,465E-06	11,876	0.08	0,078	J
15	666667	4.19E+06	0,218414	0,162598		6,73E-03	2,961E-06	11,889	0,08	0,080	
16	600000	3,77E+06	0,218466	0,186593		6.51E-03	2.581E-06	11,892	0.08	0.077	
17	400000	2,51E+06	0,218902	0,279864		6,50E-03	1,721E-06	11,915	0.08	0,077	
18	333333	2,09E+06	0,218857	0,252521		8,64E-03	1,907E-06	11,913	0,10	0,103	
19	300000	1,88E+06	0,219094	0,326619		7,42E-03	1,474E-06	11,926	0,09	0,088	
20	250000	1,57E+06	0,219309	0,403168		7,20E-03	1,194E-06	11,937	0,09	0,086	
21	200000	1,26E+06	0,219508	0,500673		7,24E-03	9,618E-07	11,948	0,09	0,087	
22	150000	9,42E+05	0,219906	0,678624		7,11E-03	7,096E-07	11,970	0,09	0,085	
23	125000	7,85E+05	0,220118	0,83358		6,94E-03	5,777E-07	11,981	0,08	0,083	
24	120000	7,54E+05	0,220232	0,884932		6,81E-03	5,441E-07	11,988	0,08	0,082	
25	100000	6,28E+05	0,220326	0,987977		7,32E-03	4,874E-07	11,993	0,09	0,088	
26	80000	5,02E+05	0,220623	1,23995		7,28E-03	3,883E-07	12,009	0,09	0,087	
27	60000	3,77E+05	0,220893	1,63018		7,37E-03	2,954E-07	12,024	0,09	0,089	
28	50000	3,14E+05	0,221175	1,9804		7,27E-03	2,431E-07	12,039	0,09	0,088	
29	40000	2,51E+05	0,221372	2,47828		7,26E-03	1,943E-07	12,050	0,09	0,087	
30	30000	1,88E+05	0,221768	3,42499		6,99E-03	1,406E-07	12,071	0,08	0,084	
31	25000	1.57F+05	0 222062	3 93362		7.29F-03	1.224F-07	12.087	0.09	0.088	

α)

4	f(Hz)								
5	1,00E+06	8,036E-06	4,372E-06	6,078E-06	2,419E-06	7,278E-06	3,744E-06	1,668E-05	4,296E-06
6	800000	6,654E-06	3,485E-06	5,250E-06	2,051E-06	5,965E-06	3,013E-06	1,364E-05	3,465E-06
7	666667	5,752E-06	2,951E-06	4,401E-06	1,548E-06	5,276E-06	2,577E-06	1,157E-05	2,961E-06
8	600000	5,214E-06	2,556E-06	3,936E-06	1,252E-06	4,703E-06	2,301E-06	1,048E-05	2,581E-06
9	400000	3,604E-06	1,696E-06	2,662E-06	6,094E-07	3,352E-06	1,488E-06	7,302E-06	1,721E-06
10	333333	3,557E-06	1,908E-06	2,910E-06	1,100E-06	3,508E-06	1,829E-06	6,889E-06	1,907E-06
11	300000	3,105E-06	1,437E-06	2,380E-06	7,363E-07	2,797E-06	1,266E-06	6,020E-06	1,474E-06
12	250000	2,668E-06	1,186E-06	2,019E-06	5,452E-07	2,389E-06	1,042E-06	5,131E-06	1,194E-06
13	200000	2,198E-06	9,389E-07	1,594E-06	3,493E-07	1,969E-06	7,764E-07	4,228E-06	9,618E-07
14	150000	1,738E-06	6,967E-07	1,228E-06	1,548E-07	1,540E-06	5,698E-07	3,271E-06	7,096E-07
15	125000	1,488E-06	5,549E-07	1,014E-06	7,648E-08	1,319E-06	4,772E-07	2,761E-06	5,777E-07
16	120000	1,434E-06	5,375E-07	9,741E-07	6,176E-08	1,279E-06	4,473E-07	2,681E-06	5,441E-07
17	100000	1,308E-06	4,656E-07	9,266E-07	1,644E-07	1,082E-06	3,717E-07	2,399E-06	4,874E-07
18	80000	1,101E-06	3,738E-07	7,732E-07	9,255E-08	8,970E-07	2,910E-07	1,975E-06	3,883E-07
19	60000	8,843E-07	2,747E-07	5,865E-07	2,115E-08	7,053E-07	2,142E-07	1,530E-06	2,954E-07
20	50000	7,832E-07	2,337E-07	5,059E-07	7,084E-09	6,071E-07	1,769E-07	1,311E-06	2,431E-07
21	40000	6,541E-07	1,733E-07	4,085E-07	-1,676E-08	5,078E-07	1,400E-07	1,074E-06	1,943E-07
22	30000	5,380E-07	1,215E-07	3,083E-07	-5,318E-08	4,019E-07	9,228E-08	8,329E-07	1,406E-07
23	25000	4,613E-07	9,712E-08	2,641E-07	-5,995E-08	3,375E-07	8,116E-08	7,106E-07	1,224E-07
24	20000	3,962E-07	8,487E-08	2,086E-07	-8,136E-08	2,924E-07	5,963E-08	5,760E-07	8,673E-08
25	15000	3,264E-07	5,864E-08	1,520E-07	-8,978E-08	2,341E-07	5,218E-08	4,443E-07	5,767E-08
26	14117,6	3,084E-07	3,869E-08	1,405E-07	-8,856E-08	2,169E-07	4,752E-08	4,137E-07	5,972E-08
27	12000	2,714E-07	4,337E-08	1,084E-07	-1,041E-07	1,953E-07	3,375E-08	3,599E-07	5,229E-08
28	10000	2,368E-07	3,417E-08	7,908E-08	-1,074E-07	1,718E-07	3,137E-08	2,956E-07	3,731E-08
29	8000	2,008E-07	1,637E-08	6,040E-08	-1,121E-07	1,467E-07	2,809E-08	2,377E-07	2,602E-08
30	6000	1,611E-07	-1,063E-09	3,085E-08	-1,207E-07	1,195E-07	1,435E-08	1,610E-07	8,582E-09
31	5000	1,417E-07	-2,313E-10	1,545E-08	-1,209E-07	9,987E-08	9,127E-09	1,425E-07	1,454E-08
	I F H \ m	easurements /	calc / TanD)	Conductivity	(Real part /	Imaginary part	2 3000 00	10000 000	5 3505 00

Σχήμα 4.24: Φύλλο εργασίας dlm_proc.xls. α) Αρχικές μετρήσεις, β) Φύλλο υπολογισμού αγωγιμότητας, πραγματικού και φανταστικού μέρους, καθώς και της tanδ, γ) Υπολογισμός της αγωγιμότητας για μια σειρά μετρήσεων σε ένα δοκίμιο.

Στο σχήμα 4.24 διακρίνεται ο υπολογισμός της αγωγιμότητας, του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της, καθώς και της tanδ, από τις πειραματικές μετρήσεις κάθε δοκιμίου. Στο πρώτο φύλλο του αρχείου dlm_proc.xls (σχήμα 4.24 α)) μεταφέρονται και τοποθετούνται σε στήλες οι πειραματικές μετρήσεις της Cp – Rp για κάθε συχνότητα, όπως ακριβώς είναι διατεταγμένες στο αρχείο μετρήσεων *.txt. Στο φύλλο του σχήματος 4.24 β) γίνονται οι υπολογισμοί και τα αποτελέσματά τους μεταφέρονται σε στήλες στα αντίστοιχα φύλλα της αγωγιμότητας, της tan δ, του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της. Στο σχήμα 4.24 γ) έχει υπολογιστεί η αγωγιμότητα για κάθε συχνότητα. Κάθε στήλη αντιστοιχεί σε διαφορετική πειραματική μέτρηση του ίδιου δοκιμίου. Έτσι ακριβώς συμπληρώνονται και τα υπόλοιπα φύλλα tanδ, real part και imaginary part.

γ)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5⁰

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 Διηλεκτρική φασματοσκοπία σε μάρμαρο

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, πραγματοποιήθηκαν σε όλα τα δοκίμια διηλεκτρικές μετρήσεις, με και χωρίς την φυσική τους υγρασία, πριν υποστούν οποιαδήποτε μορφής καταπόνηση. Δηλαδή σε 18 δοκίμια KN και 22 δοκίμια MN υπολογίστηκε η (ac) αγωγιμότητα, το πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς και ο συντελεστής απωλειών tanδ, σαν συνάρτηση της συχνότητας. Για κάθε δοκίμιο σχεδιάστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα. Οι μετρήσεις αυτές θα χρησιμοποιηθούν ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση και η ποσοτικοποίηση της απόκλισης των μετρούμενων μεγεθών σε σχέση με το εφαρμοζόμενο κάθε φορά φορτίο. Ο τρόπος που επηρεάζει το εφαρμοζόμενο φορτίο τα μετρούμενα μεγέθη (αγωγιμότητα, πραγματικό και φανταστικό μέρος και tanδ) μελετήθηκε σε όλο το φάσμα που έχει τη δυνατότητα να μετρήσει η γέφυρα LCR (δηλ. 20Hz - 1MHz). Στις χαμηλές συχνότητες <10kHz και επειδή η ωμική αντίσταση που παρουσιάζουν τα δείγματα στις συχνότητες αυτές είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να μετρήσει η γέφυρα, οι αντίστοιχες μετρήσεις δεν χρησιμοποιήθηκαν. Ο τρόπος που το εφαρμοζόμενο φορτίο επιδρά στις διηλεκτρικές παραμέτρους μελετήθηκε σε ολόκληρο το φάσμα των συχνοτήτων και από αυτές επιλέχθηκαν οι δύο αντιπροσωπευτικές συχνότητες των 10kHz και 100kHz που βρίσκονται μέσα στην περιοχή λειτουργίας της γέφυρας. Αρχικά θα παρουσιαστεί το πλήρες φάσμα (10kHz-1MHz) των διηλεκτρικών μεγεθών που χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά για την περαιτέρω επεξεργασία και τη λήψη των μετρήσεων.

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι όσον αφορά τις αρχικές μετρήσεις σε δείγματα χωρίς μηχανική καταπόνηση, οι αποκλίσεις από δείγμα σε δείγμα των μετρούμενων μεγεθών ήταν πολύ μικρές οπότε και στη συνέχεια παρουσιάζεται μία αντιπροσωπευτική μέτρηση για το κάθε μετρούμενο μέγεθος στα αφόρτιστα δείγματα. Το σχήμα 5.1 παρουσιάζει την μεταβολή της (ac) αγωγιμότητας σε ολόκληρο το μετρούμενο φάσμα για το ίδιο δείγμα με και χωρίς την παρουσία της φυσικής του υγρασίας. Όπως είναι αναμενόμενο, η τιμή της αγωγιμότητας στο δείγμα που δεν περιέχει υγρασία είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της αγωγιμότητας στις ίδιες συχνότητες, όταν το δείγμα περιέχει υγρασία. Εμφανής γίνεται επίσης η συνεισφορά της υγρασίας σε κάθε συχνότητα αφού η αγωγιμότητα μεταβάλλεται σημαντικά περισσότερο στις χαμηλές συχνότητες (10kHz) παρά στις υψηλότερες (1MHz). Το χαρακτηριστικό είναι ότι οι μετρήσεις της (ac) αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την συχνότητα τόσο στα δείγματα που έχουν υποστεί ξήρανση όσο και σε εκείνα που δεν έχουν υποστεί, υπακούν σε ένα νόμο δύναμης της μορφής (Jonscher A.K., 1983):

$$\sigma_{ac}(f) = A \cdot f^n \tag{5.1}$$

όπου A μια σταθερή ποσότητα και n ένας με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1.

Ανάλογη συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί και σε άλλα είδη πετρωμάτων (Anastasiadis C. et al, 2005). Η προσαρμογή του νόμου της εξίσωσης (5.1) με τις μετρήσεις, δίνει για τον εκθέτη *n* μια τιμή κοντά στο 1 στην περίπτωση των δοκιμίων που έχουν υποστεί ξήρανση και μια τιμή στο 0,75 περίπου για τα δοκίμια με την παρουσία της φυσικής τους υγρασίας.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα αγωγιμότητας σαν συνάρτηση της συχνότητας με και χωρίς την παρουσία της φυσικής υγρασίας του δοκιμίου.

Στα δύο επόμενα σχήματα απεικονίζεται η εξάρτηση του πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς (σχήμα 5.2) και της γωνίας απωλειών (tanδ) (σχήμα 5.3), σε συνάρτηση με την συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του πραγματικού μέρους (ε΄) της διηλεκτρικής σταθεράς σε συνάρτηση με τη συχνότητα για το ίδιο δείγμα όταν αυτό περιέχει τη φυσική του υγρασία και όταν έχει ξηρανθεί. Είναι αξιοσημείωτο ότι όταν έχει αφαιρεθεί η φυσική υγρασία του δείγματος το πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς δεν παρουσιάζει σημαντική εξάρτηση από τη συχνότητα στο μετρούμενο φάσμα και παραμένει πρακτικά σταθερό και ίσο με 13. Στην περίπτωση που το δείγμα περιέχει τη φυσική του υγρασία παρουσιάζεται μία αρκετή διασπορά προς τις χαμηλές συχνότητες, φθάνοντας στα 10kHz στην τιμή 14,5. Στις υψηλές συχνότητες (1MHz) παρουσιάζεται μια προσέγγιση των τιμών μεταξύ των δειγμάτων που έχουν υποστεί ξήρανση και εκείνων που δεν έχουν υποστεί.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς σαν συνάρτηση της συχνότητας με και χωρίς την παρουσία της φυσικής υγρασίας του δοκιμίου.

Τέλος το σχήμα 5.3 περιγράφει τη συμπεριφορά της γωνίας απωλειών (tand) σε σχέση με τη συχνότητα όταν το δείγμα αναφοράς περιέχει ή όχι υγρασία.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα γωνίας απωλειών (tanδ) σαν συνάρτηση της συχνότητας με και χωρίς την παρουσία της φυσικής υγρασίας του δοκιμίου.

5.2 Αποτελέσματα δοκιμίων μονοαξονικής φόρτισης

Για τα δοκίμια KN και MN θα παρουσιαστεί η μεταβολή της αγωγιμότητας τους σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση. Η μεταβολή αυτή παρουσιάζεται κανονικοποιημένη σε σχέση με την τιμή της αγωγιμότητας που έχει το κάθε δείγμα πριν αυτό υποστεί οποιαδήποτε καταπόνηση.

Στα σχήματα 5.4 έως 5.8 παρουσιάζεται η συμπεριφορά της (ac) αγωγιμότητας σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση για τη συχνότητα των 100kHz. Συγκεκριμένα γίνεται σύγκριση της αγωγιμότητας όταν η φόρτισή τους γίνεται παράλληλα ή κάθετα στα νερά των δοκιμίων και στη συνέχεια συγκρίνεται η μεταβολή της αγωγιμότητας, όταν τα παραπάνω δείγματα έχουν ή όχι την φυσική τους υγρασία.

Στο σχήμα 5.4 απεικονίζονται οι τιμές της μεταβολής της αγωγιμότητας των δοκιμίων στα οποία το θλιπτικό φορτίο εφαρμόστηκε κάθετα στα νερά του μαρμάρου. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι μεταβολές της αγωγιμότητας στα δείγματα που περιέχουν τη φυσική τους υγρασία, ενώ με κόκκινο χρώμα τα αντίστοιχα δείγματα όταν τους έχει αφαιρεθεί η υγρασία.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα μεταβολής της αγωγιμότητας σαν συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης δοκιμίων KN (κόντρα στα νερά), με και χωρίς την παρουσία της φυσικής τους υγρασίας στη συχνότητα των 100kHz.

Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η αντίστοιχη μεταβολή της αγωγιμότητας για τα δείγματα στα οποία το φορτίο εφαρμόζεται παράλληλα με τα νερά του μαρμάρου. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα ότι ανεξάρτητα από τον τρόπο εφαρμογής του φορτίου, η μεταβολή της αγωγιμότητας παρουσιάζει μία μικρή μείωση, όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι χαμηλή και στη συνέχεια αυξάνει όσο αυτή αυξάνεται. Επίσης είναι σαφές ότι τα δείγματα που διατηρούν τη φυσική τους υγρασία παρουσιάζουν υψηλότερη αγωγιμότητα ανεξάρτητα από την επιβαλλόμενη τάση. Τέλος όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι σε χαμηλό επίπεδο η τιμή της αγωγιμότητας δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, ανεξάρτητα από το αν έχει υποστεί ξήρανση ή όχι, αλλά ανεξάρτητα και από τον τρόπο της φόρτισης. Φαίνεται όμως στα δοκίμια ΚΝ, ότι σε υψηλή τάση παρουσιάζεται πολύ μεγαλύτερη μεταβολή της αγωγιμότητας όταν τα δοκίμια περιέχουν τη φυσική τους υγρασία (σχήμα 5.4). Η αντίστοιχη μεταβολή για τα δοκίμια MN παρουσιάζεται να είναι σημαντικά μικρότερη (σχήμα 5.5). Η σημαντική μεταβολή της αγωγιμότητας στην υψηλή τάση αποδίδεται στην δημιουργία αγώγιμων δρόμων εξαιτίας των ολοένα και αυξανόμενων ρωγμών και στη διάχυση της φυσικής υγρασίας στη δομή του δοκιμίου.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα μεταβολής της αγωγιμότητας σαν συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης δοκιμίων MN (παράλληλα στα νερά), με και χωρίς την παρουσία της φυσικής τους υγρασίας στη συχνότητα των 100kHz.

Στα δείγματα KN, όπου το θλιπτικό φορτίο εφαρμόζεται κάθετα με τα νερά του δείγματος, η μέτρηση των διηλεκτρικών χαρακτηριστικών όπως φαίνεται στην ενότητα 4.4.4 γίνεται παράλληλα στα νερά του δείγματος. Η περιεκτικότητα των εγκλισμάτων) νερών (στρώσεις σε αγώγιμα υλικά όπως μοσχοβίτη (KAl₂(AlSi₃)O₁₀(OH)₂) και χλωρίτη ((Mg,Fe,Al)₆(Si,Al)₄O₁₀(OH)₈), αυξάνει την τιμή της αγωγιμότητας σε αυτή τη διεύθυνση. Όταν η εφαρμοζόμενη τάση αποκτά τέτοιες τιμές ικανές να δημιουργήσουν ρωγμές στη δομή του δείγματος ο συνδυασμός της κίνησης της φυσικής υγρασίας αλλά και της παρουσίας της διεύθυνσης των επιπέδων των εγκλισμάτων, έχει ως αποτέλεσμα την καταγραφή πολύ μεγαλύτερων μεταβολών στην αγωγιμότητα των δοκιμίων ΚΝ σε σχέση πάντα με τα ΜΝ. Το σχήμα 5.6 ενισχύει το παραπάνω συμπεράσματα καθώς παρουσιάζει τη σύγκριση της αγωγιμότητας των δειγμάτων ΚΝ (πράσινο χρώμα) και των δειγμάτων (πορτοκαλί) ΜΝ με τη φυσική τους υγρασία.



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα μεταβολής της αγωγιμότητας σαν συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης όλων των δοκιμίων με την παρουσία της φυσικής τους υγρασίας στη συχνότητα των 100kHz.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα της ποσοστιαίας μεταβολής της αγωγιμότητας σαν συνάρτηση της επιβαλλομένης τάσης για τα δοκίμια KN στη συχνότητα των 100kHz.

Για τα δοκίμια KN και MN υπολογίστηκε η μέση τιμή της ποσοστιαίας μεταβολή της αγωγιμότητας για κάθε εφαρμοζόμενο φορτίο. Για κάθε επιβαλλόμενο φορτίο υπολογίστηκε η μέση τιμή της αντίστοιχης εφαρμοζόμενης τάσης και δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα των σχημάτων 5.7 και 5.8. Για τον υπολογισμό της ποσοστιαίας μεταβολής χρησιμοποιήθηκε σαν σημείο αναφοράς η τιμή της αγωγιμότητας στα ασυμπίεστα δοκίμια.

Από το σχήμα 5.7 παρατηρείται ότι για τιμές της τάσης μικρότερες από 27 MPa, οι τιμές της σχετικής αγωγιμότητας είναι χαμηλότερες από την τιμή της σε ασυμπίεστα δοκίμια. Αυτό οφείλεται στο κλείσιμο των πόρων του υλικού και στη αλλαγή της δομής του μαρμάρου, με αποτέλεσμα την μείωση των αγώγιμων διαδρόμων και συνεπακόλουθα την ελάττωση της αγωγιμότητας του δείγματος. Αντίθετα για τιμές τάσης μεγαλύτερες των 27 MPa, οι τιμές της αγωγιμότητας αυξάνονται με μεγαλύτερο ρυθμό. Αυτό οφείλεται στο ότι αρχίζουν να δημιουργούνται μικρορωγμές στο εσωτερικό του δοκιμίου, οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Αυτό έχει αποτέλεσμα την αύξηση των αγώγιμων διαδρόμων, την ελάττωση της ωμικής συμπεριφοράς του μαρμάρου και τελικά την αύξηση της αγωγιμότητας. Η συμπεριφορά αυτή είναι λιγότερο έντονη έπειτα από την απομάκρυνση της φυσικής υγρασίας του μαρμάρου. Αυτό ενισχύει την υπόθεση ότι η αύξηση της τιμής της αγωγιμότητας του μαρμάρου, όταν αυτό περάσει στην περιοχή των μόνιμων παραμορφώσεων, οφείλεται στην παρουσία της ατμοσφαιρικής υγρασίας η οποία εισχωρεί στο εσωτερικό του μαρμάρου από τις επιφανειακές μικρορωγμές. Το γεγονός αυτό έρχεται να ενισχύσει παλαιότερες μετρήσεις που σαφώς αποδεικνύουν έναν διπλασιασμό της (ac) αγωγιμότητας όταν δοκίμια μαρμάρου έχουν δεχθεί φόρτιση που αντιστοιχεί σε επίπεδο κανονικοποιημένης τάσης που υπερβαίνει το 0,8 του ορίου θραύσης (Anastasiadis C. et al, 2005). Αντίστοιχες συμπεριφορές έχουν ανιχνευτεί σε δειγματα μαρμάρου με τη μέθοδο της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας, εφαρμόζοντας την τεχνική ισόθερμων ρευμάτων αποπόλωσης (Stavrakas I. et al, 2005).

Αντίστοιχα με τα παραπάνω στο διάγραμμα του σχήματος 5.8 παρουσιάζεται η συμπεριφορά της αγωγιμότητας για τα δείγματα MN. Από το διάγραμμα αυτό είναι εμφανής η μειωμένη ποσοστιαία μεταβολή της αγωγιμότητας στις υψηλές τάσεις.


Σχήμα 5.8: Διάγραμμα της ποσοστιαίας μεταβολής της αγωγιμότητας σαν συνάρτηση της επιβαλλομένης τάσης για τα δοκίμια MN στη συχνότητα των 100kHz.

5.3 Αποτελέσματα δοκιμίων κάμψης τριών σημείων

Στα δοκίμια που έχουν υποστεί κάμψη τριών σημείων θα μελετηθεί η μέση ποσοστιαία μεταβολή της τιμής της αγωγιμότητας, του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της διηλεκτρική σταθεράς σε σχέση με τις θέσεις 1,2,3 (θλίψης, ουδέτερη και εφελκυσμού) για τις συχνότητες των 10kHz και 100kHz.

Η μέση ποσοστιαία μεταβολή οποιουδήποτε διηλεκτρικού μεγέθους υπολογίζεται με βάση την αρχική μέτρηση του αντίστοιχου μεγέθους των δοκιμίων που δεν έχουν υποστεί καταπόνηση. Μετά την κανονικοποίηση των μεγεθών υπολογίζεται η μέση τιμή τους για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης τάσης και συγκεκριμένα για τα 18,5 MPa και 23,1 MPa που αντιστοιχούν στο 40% και 50% αντίστοιχα της μέγιστης αντοχής σε κάμψη. Στα σχήματα 5.9 και 5.10 παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς σε σχέση με τις θέσεις 1,2,3 και την επιβαλλόμενη τάση για τις συχνότητες των 10kHz και 100kHz, για δοκίμια με και χωρίς την φυσική τους υγρασία.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα μέσης τιμής της ποσοστιαίας μεταβολής του πραγματικού μέρους σαν συνάρτηση της επιβαλλόμενης τάσης και της θέσης μέτρησης για την συχνότητα των 10 kHz.

Μεταβολές στο πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς σχετίζονται εξορισμού με αντίστοιχες μεταβολές της συνολικής χωρητικότητας του υλικού. Εφόσον το υλικό εξαιτίας της εφαρμοζόμενης τάσης αλλάζει (δημιουργούνται ρωγμές) σε διάφορα, αλλά εντοπισμένα σημεία του σώματος του, αναμενόμενες είναι και οι αλλαγές του πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς. Οι αλλαγές αυτές δεν είναι ομοιόμορφες σε ολόκληρο το σώμα του υλικού. Συγκεκριμένα το καμπτικό φορτίο που ασκείται στο υλικό δεν έχει τις ίδιες μηχανικές επιπτώσεις στη περιοχή θλίψης και στην περιοχή εφελκυσμού, όπου όλα τα μηχανικά φαινόμενα είναι εντονότερα. Το παραπάνω οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι μεταβολές των διηλεκτρικών μεγεθών στην περιοχή του εφελκυσμού είναι σαφώς εντονότερες (σχήμα 5.9).

Στο σχήμα 5.10 φαίνεται ότι η μεταβολή του πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς για την συχνότητα των 100kHz είναι μικρότερη από την αντίστοιχη μεταβολή στα 10kHz (σχήμα 5.9). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μείωση της χωρητικής αντίστασης με την αύξηση στης συχνότητας. Τέλος από παρατήρηση των σχημάτων 5.9 και 5.10 προκύπτει ότι το πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς στην ουδέτερη ζώνη μεταβάλλεται ελάχιστα ανεξάρτητα αν τα δείγματα ξηραθούν ή όχι. Αυτό είναι λογικό καθώς στην περιοχή αυτή τα καμπτικά φορτία επιδρούν ελάχιστα, με αποτέλεσμα να μη μεταβάλλεται η δομή του υλικού σε αυτήν την θέση.



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα μέσης τιμής της ποσοστιαίας μεταβολής του πραγματικού μέρους σαν συνάρτηση της επιβαλλόμενης τάσης και της θέσης μέτρησης για την συχνότητα των 100 kHz.

Στα σχήματα 5.11 και 5.12 παρουσιάζονται τα διάγραμμα μέσης τιμής της ποσοστιαίας μεταβολής του φανταστικού μέρους σαν συνάρτηση της επιβαλλόμενης τάσης και της θέσης μέτρησης για την συχνότητα των 10kHz και των 100kHz αντίστοιχα.



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα μέσης τιμής της ποσοστιαίας μεταβολής του φανταστικού μέρους σαν συνάρτηση της επιβαλλόμενης τάσης και της θέσης μέτρησης για την συχνότητα των 10 kHz.

Έπειτα από παρατήρηση των (β) διαγραμμάτων των σχημάτων 5.11 και 5.12, οπού τα δοκίμια δεν έχουν υποστεί ξήρανση, προκύπτει ότι το φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς μειώνεται μεταξύ των τριών θέσεων κάμψης. Παρατηρείται ότι η μείωση του φανταστικού μέρους στην θέση 3 είναι λιγότερο έντονη από την αντίστοιχη μείωση του πραγματικού μέρους για τις δυο φορτίσεις των 18,5 MPa και 23,1 MPa. Ενισχύεται το γεγονός ότι οι μεγαλύτερες αλλαγές συμβαίνουν στην περιοχή 3, όπου το δοκίμιο δέχεται εφελκυστικές τάσεις.



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα μέσης τιμής της ποσοστιαίας μεταβολής του φανταστικού μέρους σαν συνάρτηση της επιβαλλόμενης τάσης και της θέσης μέτρησης για την συχνότητα των 100 kHz.

Το γεγονός ότι η μείωση της τιμής του πραγματικού μέρους είναι πιο έντονη από αυτή του φανταστικού μέρους ανεξαρτήτως συχνότητας, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η τιμή του πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της κατάστασης του μαρμάρου έπειτα από κάμψη του.

Στο σχήμα 5.13 δίνονται τα διαγράμματα της επί τις εκατό μεταβολής της μέσης τιμής της αγωγιμότητας στην συχνότητα των 100kHz σε σχέση με τις θέσεις κάμψης 1,2,3 για τις δυο φορτίσεις των 18,5 MPa και 23,1 MPa. Η διαφορά των δυο διαγραμμάτων του σχήματος 5.13, είναι ότι στο αριστερό διάγραμμα τα δοκίμια έχουν υποστεί ξήρανση. Η συχνότητα των 10kHz δεν χρησιμοποιείται καθώς δίνει λιγότερο ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα.

Από το σχήμα 5.13 είναι φανερή η μεταβολή της αγωγιμότητας σε σχέση με την θέση κάμψης. Πράγματι και εδώ η τιμή της διηλεκτρικής παραμέτρου είναι μεγαλύτερη στην περιοχή των εφελκυστικών τάσεων. Παρατηρείται ότι στην περιοχή 1 (θλίψης) η τιμή της αγωγιμότητας μεταβάλλεται περισσότερο από ότι στις άλλες περιοχές με την αύξηση του φορτίου κάμψης. Αυτό έχει παρατηρηθεί και στις μετρήσεις (ενότητα 5.2), όπου η αύξηση του θλιπτικού φορτίου οδηγεί σε αύξηση της αγωγιμότητας λόγω της δημιουργίας αγώγιμων δρόμων εξαιτίας των ολοένα και αυξανόμενων ρωγμών στη δομή του δοκιμίου.



Σχήμα 5.13: Διάγραμμα μέσης τιμής της ποσοστιαίας μεταβολής της αγωγιμότητας σαν συνάρτηση της επιβαλλόμενης τάσης και της θέσης μέτρησης για την συχνότητα των 100 kHz.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6⁰

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά των διηλεκτρικών χαρακτηριστικών δοκιμίων Διονυσιακού μαρμάρου, κάτω από την επίδραση του σταδιακά αυξανόμενου φορτίου μονοαξονικής φόρτισης και κάμψης τριών σημείων. Στην εργασία αυτή εφαρμόστηκε η μέθοδος της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας για την διερεύνηση και ποσοτικοποίηση των ασυνεχειών που υφίστανται στο εσωτερικό του μαρμάρου. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν τρεις σειρές δοκιμίων, τα δοκίμια KN (φόρτιση κόντρα στα νερά του μαρμάρου) και MN (φόρτιση παράλληλη με τα νερά του μαρμάρου), στα οποία εφαρμόστηκε μονοαζονική φόρτιση, καθώς και τα δοκίμια X, στα οποία επιβλήθηκε κάμψη τριών σημείων. Πριν από οποιαδήποτε καταπόνηση των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκαν διηλεκτρικές μετρήσεις προκειμένου οι τιμές των διηλεκτρικών παραμέτρων να χρησιμοποιηθούν σαν σημείο αναφοράς και σύγκρισης. Ακολούθησαν μετρήσεις έπειτα από την φόρτιση των δοκιμίων, σε διάφορα επίπεδα επιβαλλόμενου φορτίου.

Ταξινομήθηκαν οι τιμές των διηλεκτρικών παραμέτρων (αγωγιμότητας, πραγματικού και φανταστικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς, καθώς και της εφαπτομένης της γωνίας απωλειών - tanδ) για τις συχνότητες των 10kHz και 100kHz και για τις διάφορες τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης. Πραγματοποιήθηκε κανονικοποίηση των τιμών των διηλεκτρικών παραμέτρων ως προς τις αντίστοιχες τιμές των δοκιμίων τα οποία δεν έχουν υποστεί καταπόνηση. Τέλος κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα των διηλεκτρικών παραμέτρων σαν συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης και για τις τρεις σειρές των δειγμάτων.

Από την ανάλυση και επεξεργασία των διηλεκτρικών μετρήσεων, τόσο για τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε μονοαξονική φόρτιση, όσο και σε αυτά που εφαρμόστηκε κάμψη τριών σημείων, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Η μονοαξονική φόρτιση και η κάμψη τριών σημείων δοκιμίων Διονυσιακού μαρμάρου, προκαλούν σημαντικές μεταβολές στις διηλεκτρικές τους ιδιότητες.

72

- Όταν αρχίζει η δημιουργία μικρορωγμών στο δοκίμιο, έπειτα από την μονοαξονική φόρτισή τους, η αγωγιμότητα αυξάνεται εξαιτίας της εισροής της ατμοσφαιρικής υγρασίας στο εσωτερικό του, δημιουργώντας νέες αγώγιμες διαδρομές.
- Η μεταβολή της αγωγιμότητα των δοκιμίων που έχουν τα νερά τους (στρώσεις εγκλισμάτων) κάθετα στην επιβολή του θλιπτικού φορτίου (KN), είναι μεγαλύτερη από αυτή των δοκιμίων που έχουν τα νερά τους παράλληλα (MN), εξαιτίας της παρουσίας της υγρασίας και της διεύθυνσης των επιπέδων των εγκλισμάτων.
- Κατά την κάμψη τριών σημείων το πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς παρουσιάζει μικρότερη μείωση από ότι το φανταστικό μέρος, όταν η εφαρμοζόμενη τάση ανέρχεται στο 50% της μέγιστης αντοχής σε κάμψη των συγκεκριμένων δοκιμίων.
- Τα αποτελέσματα των διηλεκτρικών μετρήσεων δοκιμίων με την φυσική τους υγρασία και έπειτα από την καταπόνησή τους σε κάμψη τριών σημείων, δείχνουν ότι υπάρχει διαφοροποίηση των διηλεκτρικών χαρακτηριστικών μεταξύ των τριών περιοχών της κάμψης.

6.2 Προτάσεις

Από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα για την συμπεριφορά των διηλεκτρικών χαρακτηριστικών του Διονυσιακού μαρμάρου. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν οδηγός για την βελτίωση της παρούσας εργασίας, αλλά και για την περαιτέρω διερεύνηση της διηλεκτρικής συμπεριφοράς των γεωυλικών, έπειτα από την επιβολή κάποιου φορτίου. Προτείνεται να γίνουν τα ακόλουθα:

- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της συμπεριφοράς των διηλεκτρικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων κάμψης, όταν το φορτίο είναι μεγαλύτερο του 50% του μέγιστου φορτίου που μπορεί να τους επιβληθεί.
- Η περαιτέρω μελέτη σε διάφορα υλικά και πετρώματα, της συμπεριφοράς των διηλεκτρικών χαρακτηριστικών, έπειτα από την σταδιακή επιβολή φορτίου, μπορεί να καταστήσει την μέθοδο της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας σαν μία

μη καταστρεπτική μέθοδο ανίχνευσης της εντατικής κατάστασης των γεωυλικών και όχι μόνο.

Απαιτούνται συστηματικές μετρήσεις σε μια σειρά γεωυλικών πέραν του μαρμάρου, με σκοπό να συσχετιστούν διάφοροι παράμετροι που απορρέουν από διηλεκτρικές μετρήσεις με την παράμετρο καταστροφικότητας των υλικών, η οποία ποσοστικοποιεί το μέγεθος της ζημιάς. Μία τέτοια συσχέτιση θα αποτελέσει ένα καινοτόμο εργαλείο στον έλεγχο και την διακρίβωση της εντατικής κατάστασης στην οποία βρίσκεται ένα υλικό όταν έχει υποστεί μία σοβαρή μηχανική καταπόνηση.

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Anastasiadis C., Triantis D., Stavrakas I., Kyriazopoulos A. and Vallianatos F., (2005), 'Ac Conductivity Measurements of Rock Samples after the Application of Stress up to Fracture. Correlation with the Damage Variable', WSEAS Transactions on systems, Vol. 4, p. 185-190.
- 2. ASTM C293, 'Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)'.
- 3. Bagdassarov N.S. and Slutskii A.B., (2003), 'Phase Transformations in Calcite from Electrical Impedance Measurements', Moscow, Russia.
- Dervos C.T., Mergos J.A. and Iosifides A.A., (2005), 'Characterization of Insulating Particles by Dielectric Spectroscopy: Case Study for CaCO₃ Powders', Materials Letters, (V.59, #22), p. 2842-2849.
- 5. Gere J.M. and Timoshenko S.P., (1997), 'Mechanics of Materials', 4th Edition, PWS Publishing Company, Boston, USA.
- 6. Hill R.M. and Dissado L.A., (1982), 'Solid State Physics', J. Phys. C.
- 7. Jonscher A.K., (1983), 'Dielectric Relaxation in Solids', Chelsea Dielectrics Press, London.
- 8. MTS System Corporation, (2004), User's Manual.
- 9. Roberts A., (1977), 'Geotechnology An Introductory Text for Students and Engineers', Pergamon Press.
- Stavrakas I., Triantis D. and Anastasiadis C., (2005), 'The Influence of Externally Applied Uniaxial Stress on Isothermal Depolarization Current Mechanisms in Rock Samples', Materials Sciance, Vol. 52, p. 4593-4596.
- Vassilikou Dova A., Siakantari M., Kyritsis A., Varotsos P. and Pissis P., (1999), 'The Dependence of the Dielectric Behavior of Rocks on the Water Content', 10th International Symposium on Electrets (ISE), p. 481-484.

Ελληνική Βιβλιογραφία

 Αγιουτάντης Ζ.Γ., (2002), 'Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων', Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.

- Αγιούταντης Ζ.Γ., Γαβαλάκη Ε., (1998), 'Αυτοματοποίηση και Έλεγχος των Πειραματικών Διαδικασιών σε Εργαστηριακές Δοκιμές Μηχανικής Πετρωμάτων', Τεχν. Χρον. Έπιστ. Έκδ. ΤΕΕ. V. τευχ. 1-2.
- Βαρδουλάκης. Ι., Κουρκουλής Σ., Εξαδάκτυλος Γ., Ροζάκης Α., (2002), 'Μηχανικές Ιδιότητες και Συμβατότητα Φυσικών Δομικών Λίθων στα Αρχαία Μνημεία: Το Διονυσιακό Μάρμαρο', Διεπιστημονική Ημερίδα «Ο Δομικός Λίθος στα Μνημεία», ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- 4. Παπαδάκη Ζ., (2007), 'Μοντελοποίηση Συσκευών Φόρτισης που Χρησιμοποιούνται σε Δοκιμές Ανεμπόδιστης Θλίψης', Χανιά.
- 5. Παπαθεοδώρου Ε., (2004), 'Μοντελοποίηση του Προβλήματος της Κάμψης Τριών Σημείων – Ανάλυση και Σύγκριση με Πειραματικά Αποτελέσματα', Χανιά.
- 6. Τσουτρέλη Χ., (1985), Έτοιχεία Μηχανικής Πετρωμάτων Μέρος Ι'.