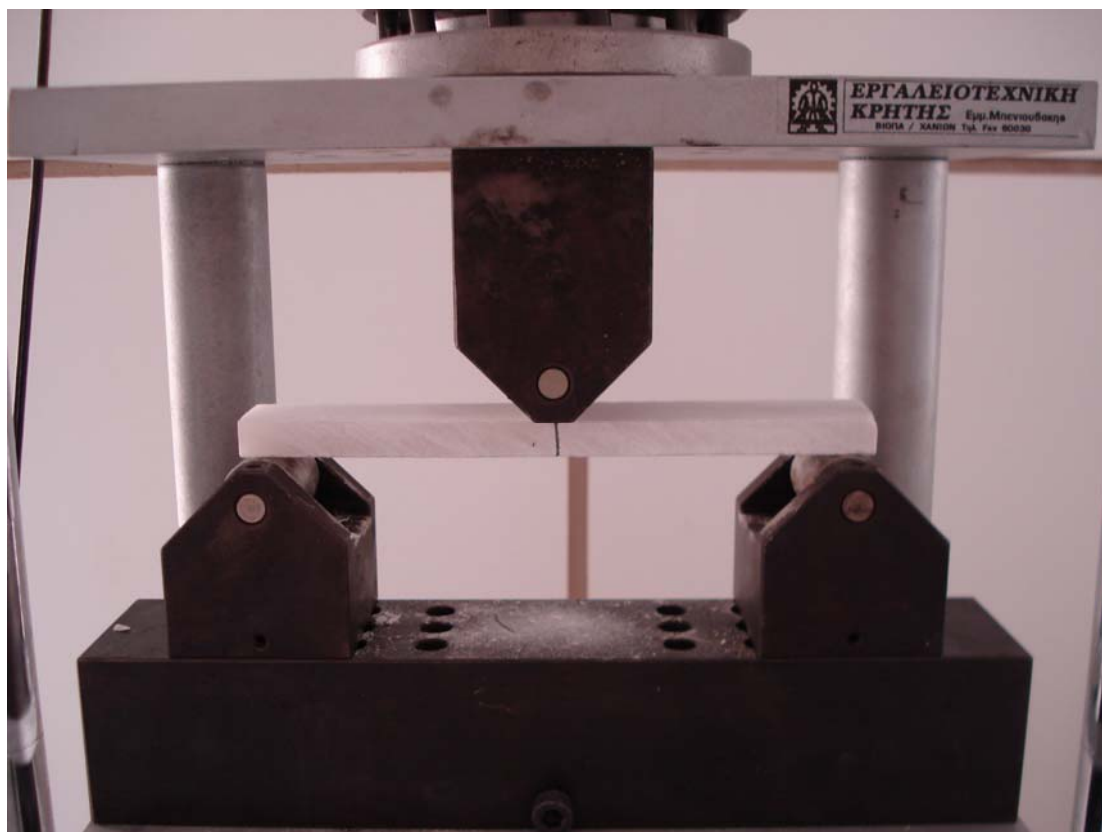




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ
ΚΑΜΨΗ ΜΑΡΜΑΡΟΥ ΔΙΟΝΥΣΟΥ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΙΣΤΑΝΤΣΟ Π. ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής

Δρ Κωνσταντίνος Κακλής, Μηχανικός Μεταλλείων - Μεταλλειολόγος

ΧΑΝΙΑ
ΑΠΡΙΛΙΟΣ, 2008

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματική αυτής εργασίας είναι η μελέτη της κάμψης μαρμάρου σε τρία σημεία. Το μάρμαρο που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από τα λατομεία Διονύσου Αττικής. Από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, υπολογίζεται η μέγιστη δύναμη που μπορούν να δεχτούν τα δοκίμια κάτω από συνθήκες κάμψης καθώς και το βέλος κάμψης τους. Στα πειράματα μεταβάλλεται κάθε φορά μια διάσταση του δοκιμίου καθώς και ο προσανατολισμός των νερών του μαρμάρου.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκαν δοκίμια και έγιναν τα πειράματα κάμψης στα εργαστήρια του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, παρά το γεγονός ότι το θέμα της κάμψης τριών σημείων έχει μελετηθεί ξανά στο παρελθόν από επιστήμονες του ίδιου τμήματος. Τα δεδομένα που προκύπτουν είναι συγκρίσιμα με αποτελέσματα πειραμάτων άλλων σχολών και εργαστηρίων. Το ευρύτερο αποτέλεσμα των δοκιμών αυτών είναι η δυνατότητα περιγραφής της συμπεριφοράς του μαρμάρου σε διαφορετικές μορφές καταπόνησης.

Τέλος, παρουσιάζονται όλα τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς και η επεξεργασία των μετρήσεων που προέκυψαν. Παρατίθενται τα συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω επεξεργασία των μετρήσεων και του θέματος της κάμψης τριών σημείων.

ABSTRACT

The object of this diplomatic thesis is the study of three points bending of marble. The marble that was used emanates from the quarries Dionysus, Attica. By the treatment of experimental results, is calculated the biggest force that they can accept the essays under conditions of bending as well as their arrow of bending. In the experiments are altered each time a dimension of essay as well as the orientation of marble's waves.

For the needs of diplomatic thesis were manufactured essays and became the experiments of bending in the laboratories of department of Mining Resources Engineering of Technical University of Crete, despite the make that the subject of bending of three points has been studied again in the past, by scientists of same department. The data that result are comparable with results of experiments of other faculties and laboratories. The wider result of these trials is the possibility of behaviour's description of marble in different forms of forces.

Finally, are presented all the experimental results as well as the treatment of measurements that resulted. Are mentioned the conclusions and proposals on further treatment of measurements and subject of bending of three points.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, είχα την άμεση βοήθεια και καθοδήγηση από σημαντικά πρόσωπα, τα οποία και θα ήθελα να ευχαριστήσω :

Τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση διπλωματικής εργασίας καθώς και για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του στην εργασία. Τέλος, να τον ευχαριστήσω για τις καίριες παρατηρήσεις και διορθώσεις του στην συγγραφή του κειμένου. Ευχαριστίες που δεν θα πρέπει να περιοριστούν στην διπλωματική εργασία και μόνο, αλλά και για την πολύχρονη προσφορά του στο τμήμα.

Τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο, για την συμμετοχή του στην αξιολόγηση της εργασίας αυτής.

Τον Επιστημονικό Συνεργάτη του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Κωνσταντίνο Κακλή, για την καθοδήγηση και τις συμβουλές, την εύρεση πηγών, την πολύτιμη βοήθεια στο πρακτικό μέρος της εργασίας και για την συμμετοχή του στην αξιολόγηση της εργασίας αυτής.

Τον επιστημονικό συνεργάτη κ. Μαυριγιαννάκη Στυλιανό, για την εξαιρετική του συνεργασία σε όλη την περίοδο της εκπόνησης των εργαστηρίων, αλλά και την πολύτιμη βοήθειά τους στο πειραματικό, αλλά κυρίως για την ‘υπομονή’ του τις ώρες των εργαστηρίων.

Ακόμη, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ από καρδιάς στους γονείς μου, Παντελή και Άννα, για την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράστασή τους ως φοιτητής στο Πολυτεχνείο της Κρήτης, στο Γιάννη Σ. και στην Μαρία Σ. και σε όλα τα αγαπημένα μου πρόσωπα που με βοήθησαν να φτάσω ως εδώ...

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1^ο Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2^ο Θεωρία Απλής και Τριών Σημείων Κάμψης.....	4
2.1. Γενικά	4
2.2. Η Ελαστοπλαστική Συμπεριφορά.....	12
2.3. Κάμψη Δοκού στην Πλαστική Περιοχή.....	13
2.4. Μορφές του Ελαστοπλαστικού Πυρήνα.....	18
2.5. Η Περίπτωση της Έκκεντρης Φόρτισης.....	21
2.6. Η Τεχνική Θεωρία του Bernoulli – Euler για κάμψη ράβδου τριών σημείων.....	22
2.6.1. Ισότροπα Υλικά.....	23
2.6.2. Ανισότροπα Υλικά.....	26
Κεφάλαιο 3^ο Ιδιότητες του Μαρμάρου.....	28
3.1. Γενικά.....	28
3.2. Τα Ελληνικά Μάρμαρα.....	29
3.3. Γένεση.....	31
3.4. Φυσικά Χαρακτηριστικά.....	32
3.5. Χημικές, Μηχανικές και Τεχνικές Ιδιότητες του Μαρμάρου.....	35
3.6. Ορυκτολογικές Ιδιότητες του Μαρμάρου.....	37
3.7. Μάρμαρα Διονύσου.....	39
3.8. Μορφές Θραύσεις Δοκιμίων Κατά την Κάμψη	42
Κεφάλαιο 4^ο Προετοιμασία και Εκτέλεση Πειραμάτων Δοκιμής Κάμψης Τριών Σημείων.....	45
4.1. Γενικά.....	45
4.2. Κατασκευή Δοκιμίων Μαρμάρου.....	46
4.3. Διαστάσεις Δοκιμίων Μαρμάρου.....	47
4.4. Εκτέλεση Πειραμάτων Κάμψης Τριών Σημείων.....	52
4.5. Πειραματικές Δοκιμές Κάμψης.....	53

Κεφάλαιο 5^ο Επεξεργασία Πειραματικών Δεδομένων Δοκιμής	
Κάμψης.....	57
5.1. Γενικά.....	57
5.2. Υπολογισμός Δυνάμεων – Τάσεων στα Δοκίμια.....	58
5.2.1. Δοκίμιο Δ _{10A}	59
5.2.2. Δοκίμιο Δ _{10B}	61
5.2.3. Δοκίμιο Δ _{10C}	63
5.2.4. Δοκίμιο Δ _K E.....	65
5.2.5. Δοκίμιο Δ _K N.....	66
5.3. Μελέτη Δοκιμίων Σταθερού Ύψους και Διαφορετικού Μήκους.....	69
5.4. Συμπεράσματα Μελέτης Δοκιμίων.....	72
5.5. Μελέτη Δοκιμίων Διαφορετικού Ύψους και Σταθερού Μήκους.....	73
5.6. Συμπεράσματα Μελέτης Δοκιμίων.....	76
5.7. Μελέτη Δοκιμίων Διαφορετικού Προσανατολισμού.....	76
 Κεφάλαιο 6^ο Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	 79
 Βιβλιογραφία.....	 82

Κατάλογος Σχημάτων

Κεφάλαιο 1^ο Εισαγωγή.....	1
 Κεφάλαιο 2^ο Θεωρία Απλής και Τριών Σημείων Κάμψης.....	4
σχήμα 2.1, επιφάνεια φόρτισης.....	6
σχήμα 2.2, παραμόρφωση των ινών από τον ουδέτερο άξονα.....	6
σχήμα 2.3, ευθεία δοκός που μετασχηματίζεται σε τόξο κύκλου κατά την κάμψη.....	7
σχήμα 2.4, Βέλος κάμψης της δοκού.....	8
σχήμα 2.5, συμπεριφορά ινών κατά την κάμψη.....	10
σχήμα 2.6, μονοαξονική φόρτιση γραμμικά ελαστικού τέλεια πλαστικού υλικού.....	12
σχήμα 2.7, πλαστική συμπεριφορά κάμψης.....	14
σχήμα 2.8, ελαστο-πλαστική παραμόρφωση σε κάμψη.....	15
σχήμα 2.9, μεταβολή της ροπής M συναρτήσει του y''	17
σχήμα 2.10α, πλαστικός στροφέας κατά την συμπεριφορά του υλικού.....	17
σχήμα 2.10β, πλαστικός στροφέας κατά την συμπεριφορά του υλικού.....	17
σχήμα 2.11, ορθογωνική αμφιέριστη δοκό με συγκεντρωμένο φορτίο στη μέση.....	18
σχήμα 2.12, η πλαστική ζώνη στα πέλματα της δοκού εκτείνεται εκατέρωθεν από το μέσο της.....	19
σχήμα 2.13, αμφιέριστη ορθογωνικής δοκού που φορτίζεται με ομοιόμορφο φορτίο.....	19
σχήμα 2.14, μορφή ελαστοπλαστικού πυρήνα δοκού που φορτίζεται με ομοιόμορφο φορτίο.....	20
σχήμα 2.15, ασύμμετρη κατανομή των τάσεων σε μια δοκό ορθογωνικής διατομής.....	21
σχήμα 2.16, πειραματικό μοντέλο του Carus Wilson.....	23
σχήμα 2.17, πειραματικές μετρήσεις των Coker και Filon.....	24
σχήμα 2.18, μεταβολή τάσεων από θλιπτικές σε εφελκυστικές.....	25
σχήμα 2.19, συγκεντρωτικό διάγραμμα του Seewald για λόγους $2L/H$	27
 Κεφάλαιο 3^ο Ιδιότητες του Μαρμάρου.....	28
σχήμα 3.1, μάρμαρο Πεντέλης.....	30
σχήμα 3.2, μάρμαρο Σκύρου.....	30
σχήμα 3.3, μάρμαρο Τήνου.....	30
σχήμα 3.4, μάρμαρο Λάρισας.....	30

σχήμα 3.5, μάρμαρο Μαραθώνα.....	30
σχήμα 3.6, μάρμαρο Ερέτριας.....	30
σχήμα 3.7, μάρμαρο Ρόδου.....	31
σχήμα 3.8, μάρμαρο Διαλισκάρης.....	31
σχήμα 3.9, κίτρινο τιγροειδές μάρμαρο.....	33
σχήμα 3.10, μαυροκίτρινος σιπολίνης.....	33
σχήμα 3.11, αμυγδαλοειδής σιπολίνης.....	33
σχήμα 3.12, πράσινο μάρμαρο.....	33
σχήμα 3.13, λατυποπαγές μάρμαρο.....	33
σχήμα 3.14, κόκκινο μάρμαρο.....	33
σχήμα 3.15, ορυκτολογική μελέτη μαρμάρου.....	38
σχήμα 3.16, μορφές θραύσης δοκιμίων.....	43
σχήμα 3.17, κοινές μηχανές κάμψης.....	43
σχήμα 3.18, κοινές μηχανές κάμψης.....	43
σχήμα 3.19, κοινές μηχανές κάμψης.....	43
σχήμα 3.20, μηχανή κάμψης TRI-SCAN.....	44
σχήμα 3.21, μηχανή κάμψης TRI-SCAN.....	44
σχήμα 3.22, δυναμικές γραμμές σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων.....	44
σχήμα 3.23, δυναμικές γραμμές σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων.....	44
σχήμα 3.24, δυναμικές γραμμές σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων με κενό.....	44
σχήμα 3.25, δυναμικές γραμμές σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων με εγκοπές.....	44

Κεφάλαιο 4^ο Προετοιμασία και Εκτέλεση Πειραμάτων Δοκιμής

Κάμψης Τριών Σημείων.....	43
σχήμα 4.1, μάρμαρο Διονύσου.....	46
σχήμα 4.2, δίσκος μαρμαροκοπής εργαστηρίου.....	47
σχήμα 4.3, δίσκος μαρμαροκοπής εργαστηρίου.....	47
σχήμα 4.4, δοκίμιο διαστάσεων 250*25*25mm.....	48
σχήμα 4.5, δοκίμιο διαστάσεων 200*25*25mm.....	48
σχήμα 4.6, δοκίμιο διαστάσεων 152*25*25mm.....	48
σχήμα 4.7, δοκίμιο διαστάσεων 97*25*25mm.....	48
σχήμα 4.8, δοκίμιο διαστάσεων 250*25*12,5mm.....	49
σχήμα 4.9, δοκίμιο διαστάσεων 200*25*50mm.....	49

σχήμα 4.10, δοκίμια διαφορετικού ύψους.....	49
σχήμα 4.11, δοκίμια διαφορετικών μήκων.....	49
σχήμα 4.12, δοκός υπό συνθήκες κάμψης.....	52
σχήμα 4.13, άνοιγμα κεφαλών 235mm.....	53
σχήμα 4.14, άνοιγμα κεφαλών 77mm.....	53
σχήμα 4.15, θραύση χωρίς ρωγμή.....	54
σχήμα 4.16, κάθετη θραύση.....	54
σχήμα 4.17, κάθετη θραύση.....	55
σχήμα 4.18, κάθετη θραύση.....	55
σχήμα 4.19, θραύση υπό γωνία.....	55
σχήμα 4.20, θραύση υπό γωνία.....	55
σχήμα 4.21, θραύση με μεγάλη απόκλιση από το κέντρο.....	55
σχήμα 4.22, θραύση με μεγάλη απόκλιση από το κέντρο.....	55
σχήμα 4.23, θραύση με μεγάλη απόκλιση από το κέντρο.....	56
σχήμα 4.24, θραύση με μεγάλη απόκλιση από το κέντρο.....	56
σχήμα 4.25, θραύση με μεγάλη απόκλιση από το κέντρο.....	56
σχήμα 4.26, θραύση με μεγάλη απόκλιση από το κέντρο.....	56

Κεφάλαιο 5^ο Επεξεργασία Πειραματικών Δεδομένων Δοκιμής

<i>Κάμψης.....</i>	<i>57</i>
---------------------------	------------------

<i>Κεφάλαιο 6^ο Συμπεράσματα - Προτάσεις.....</i>	<i>79</i>
--	------------------

Κατάλογος Πινάκων

Κεφάλαιο 1^ο Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2^ο Θεωρία Απλής και Τριών Σημείων Κάμψης.....	4
πίνακας 2.1, συγκεντρωτικός πίνακας του Seewald για λόγους $2L/H$	26
πίνακας 2.2, συγκεντρωτικός πίνακας του Seewald για λόγους $2L/H$	27
Κεφάλαιο 3^ο Ιδιότητες του Μαρμάρου.....	28
Κεφάλαιο 4^ο Προετοιμασία και Εκτέλεση Πειραμάτων Δοκιμής Κάμψης Τριών Σημείων.....	43
πίνακας 4.1, διαστάσεις δοκιμίων που η κάμψη έγινε ως προς το πρόσωπο με $h=25mm$	48
πίνακας 4.2, διαστάσεις δοκιμίων που η κάμψη έγινε ως προς το μουρέλο με $h=25mm$	49
πίνακας 4.3, διαστάσεις δοκιμίων που η κάμψη έγινε ως προς το πρόσωπο με $h=50mm$	49
πίνακας 4.4, διαστάσεις δοκιμίων που η κάμψη έγινε ως προς το πρόσωπο με $h=12,5mm$	49
Κεφάλαιο 5^ο Επεξεργασία Πειραματικών Δεδομένων Δοκιμής Κάμψης.....	57
πίνακας 5.1, χαρακτηριστικά δοκιμίου $\Delta_{10}A$	59
πίνακας 5.2, συνοπτικός πίνακας με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας.....	59
πίνακας 5.3, χαρακτηριστικά δοκιμίου $\Delta_{10}B$	61
πίνακας 5.4, συνοπτικός πίνακας με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας.....	61
πίνακας 5.5, χαρακτηριστικά δοκιμίου $\Delta_{10}C$	63
πίνακας 5.6, συνοπτικός πίνακας με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας.....	63
πίνακας 5.7, χαρακτηριστικά δοκιμίου $\Delta_K E$	65
πίνακας 5.8, συνοπτικός πίνακας με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας.....	65
πίνακας 5.9, χαρακτηριστικά δοκιμίου $\Delta_K N$	67
πίνακας 5.10, συνοπτικός πίνακας με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας.....	67

πίνακας 5.11, πίνακας αποτελεσμάτων για δοκίμια με $l_s = 77mm$	69
πίνακας 5.12, πίνακας αποτελεσμάτων για δοκίμια με $l_s = 133mm$	70
πίνακας 5.13, πίνακας αποτελεσμάτων για δοκίμια με $l_s = 187mm$	70
πίνακας 5.14, πίνακας αποτελεσμάτων για δοκίμια με $l_s = 235mm$	70
πίνακας 5.15, πίνακας αποτελεσμάτων για δοκίμια με $h = 12,5mm$	74
πίνακας 5.16, πίνακας αποτελεσμάτων για δοκίμια με $h = 25mm$	74
πίνακας 5.17, πίνακας αποτελεσμάτων για δοκίμια με $h = 50mm$	74
πίνακας 5.18, πίνακας αποτελεσμάτων με προσανατολισμό προσώπου.....	77
πίνακας 5.19, πίνακας αποτελεσμάτων με προσανατολισμό μουρέλου.....	77
Κεφάλαιο 6^ο Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	79

Κατάλογος Διαγραμμάτων

<i>Κεφάλαιο 1^ο Εισαγωγή.....</i>	<i>1</i>
<i>Κεφάλαιο 2^ο Θεωρία Απλής και Τριών Σημείων Κάμψης.....</i>	<i>4</i>
<i>Κεφάλαιο 3^ο Ιδιότητες του Μαρμάρου.....</i>	<i>28</i>
<i>Κεφάλαιο 4^ο Προετοιμασία και Εκτέλεση Πειραμάτων Δοκιμής Κάμψης Τριών Σημείων.....</i>	<i>43</i>
<i>Κεφάλαιο 5^ο Επεξεργασία Πειραματικών Δεδομένων Δοκιμής Κάμψης.....</i>	<i>57</i>
διάγραμμα 5.1, διάγραμμα μετατόπισης – δύναμης.....	60
διάγραμμα 5.2, διάγραμμα μετατόπισης – τάσης.....	60
διάγραμμα 5.3, διάγραμμα μετατόπισης – δύναμης.....	62
διάγραμμα 5.4, διάγραμμα μετατόπισης – δύναμης.....	62
διάγραμμα 5.5, διάγραμμα μετατόπισης – δύναμης.....	64
διάγραμμα 5.6, διάγραμμα μετατόπισης – δύναμης.....	64
διάγραμμα 5.7, διάγραμμα μετατόπισης – δύναμης.....	66
διάγραμμα 5.8, διάγραμμα μετατόπισης – δύναμης.....	66
διάγραμμα 5.9, διάγραμμα μετατόπισης – δύναμης.....	68
διάγραμμα 5.10, διάγραμμα μετατόπισης – δύναμης.....	68
διάγραμμα 5.11, διάγραμμα Fracture Load (kN) – ls (mm).....	71
διάγραμμα 5.12, διάγραμμα Bending Tensile Strength (MPa) – ls (mm).....	71
διάγραμμα 5.13, διάγραμμα Fracture Load (kN) – h/b.....	75
διάγραμμα 5.14, διάγραμμα Bending Tensile Strength (MPa) – h/b.....	75
διάγραμμα 5.15, διάγραμμα Fracture Load (kN) – προσανατολισμού.....	78
διάγραμμα 5.16 διάγραμμα Tensile Strength- προσανατολισμού.....	78
<i>Κεφάλαιο 6^ο Συμπεράσματα - Προτάσεις.....</i>	<i>79</i>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα ελληνικά μάρμαρα παρουσιάζουν πολλές ποικιλίες και χρώματα. Από αυτά έχουν φιλοτεχνηθεί μοναδικά καλλιτεχνήματα και έχουν κατασκευαστεί ή διακοσμηθεί μνημεία και οικοδομήματα σε διάφορες χώρες του κόσμου.

Η πολυτιμότερη ποικιλία είναι το μάρμαρο που χρησιμοποιείται στην γλυπτική. Είναι λεπτόκοκκο, ολόλευκο, διαφώτιστο, που λαξεύεται τέλεια, αλλά προσβάλλεται εύκολα από τους ατμοσφαιρικούς παράγοντες. Τα περιφημότερα μάρμαρα γλυπτικής προέρχονται από την Πεντέλη, την νήσο Πάρο και από ορισμένα λατομεία των Απουανών Άλπεων στην Ιταλία. Τα μάρμαρα αυτά ήταν αντικείμενα εκμετάλλευσης από την αρχαιότητα.

Το κοινό μάρμαρο είναι πιο χοντρόκοκκο από το μάρμαρο που προορίζεται για γλυπτική και τείνει ελαφρά προς το γκρι ή το κυανότεφο, με έντονες φλέβες μερικές φορές.

Στις μέρες μας το ενδιαφέρον για το μάρμαρο έχει μεταφερθεί από την χρήση του στην γλυπτική στην χρήση του ως δομικό υλικό. Τα μάρμαρα χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, μεταξύ των οποίων είναι η παρασκευή αδρανών υλικών, χημικών προϊόντων (συνθετικού μαγνησίτη, αλκαλίων, ανθρακασβεστίου, λευκαντικών, φωσφορικού ασβεστίου, οργανικών χημικών ενώσεων), υάλου, ως προσθετικό στις ζωοτροφές κ.λ.π. Ιδιαίτερη σημασία έχει η παρασκευή κονιόδους ανθρακικού ασβεστίου, το οποίο χρησιμοποιείται ως πληρωτικό υλικό στη χαρτοβιομηχανία, τη βιομηχανία πλαστικών, ελαστικών και χρωμάτων και σε διάφορα είδη στόκων, (εγκυκλοπαίδεια Δομή)

Για τον λόγο αυτό, έχουν ξεκινήσει πειράματα για την μελέτη και την εύρεση των μηχανικών ιδιοτήτων του μαρμάρου ώστε να εγγυάται η ασφάλεια σε όλες τις εφαρμογές του. Αν και τα πειράματα ξεκίνησαν με δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού η δοκιμή κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων θεωρείται μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μηχανική δοκιμή πλέον, (Πρασιανάκης, 1986)

Η μέθοδος της κάμψης τριών σημείων είναι η περίπτωση της ράβδου που υπόκειται σε συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσο της. Η μέθοδος αυτή προσομοιάζει την καταπόνηση του πετρώματος στην οροφή ανοίγματος, φυσικού ή τεχνητού, με μεγάλη εφαρμογή στην ευστάθεια αρχαίων μνημείων. Με τον υπολογισμό των τάσεων στα μάρμαρα τα οποία συνθέτουν τα μνημεία αυτά μπορούν να βρεθούν μέθοδοι για την αντιμετώπιση των καταπονήσεων που υφίστανται και έτσι να συντελεί η αποκατάστασή τους.

Έχει παρατηρηθεί παλαιότερα ότι σε ράβδους ορθογωνικής διατομής με μεγάλο λόγο μήκους προς ύψος (θεωρείται το πάχος της δοκού πολύ λεπτό), που υποβάλλονται σε συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσο τους, η κατανομή των τάσεων προκύπτει με ικανοποιητική ακρίβεια με χρήση της τεχνικής θεωρίας των Bernoulli-Euler.

Παρόλα αυτά η τεχνική θεωρία κάμψης δεν εφαρμόζεται για δοκούς με μεγάλο λόγο μήκους προς ύψος εξαιτίας του γεγονότος ότι στο σημείο εφαρμογής της συγκεντρωμένης δύναμης παρατηρείται μια τοπική διαταραχή στην κατανομή των τάσεων γι' αυτό και πρέπει να γίνει περισσότερη έρευνα για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Οι δοκιμές κάμψης βασίζονται σε μια απλή πειραματική διαδικασία, από την οποία προκύπτει ένας σημαντικός αριθμός δεδομένων για τη μηχανική συμπεριφορά του εξεταζόμενου υλικού. Ο προσδιορισμός όμως του πεδίου τάσεων και παραμορφώσεων σε μια σχετικά μικρή πρισματική δοκό υπό την επίδραση εγκεντρώσεως συγκεντρωμένου φορτίου, αποτελεί ένα πρόβλημα για το οποίο δεν έχει βρεθεί ακόμα μια λύση κλειστής μορφής.

Σχετικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί από το τέλος του 19ου από τους Wilson και Flamant, ενώ τα πρώτα αναλυτικά μοντέλα παρουσιάστηκαν από τους Boussinesq και Filon. Στη συνέχεια, με το πρόβλημα ασχολήθηκαν και άλλοι επιστήμονες όπως οι Carman, Seewald, Timoshenko και άλλοι. Όμως ακόμα και σήμερα το πρόβλημα δεν έχει λυθεί αναλυτικά και ο προσδιορισμός του πεδίου τάσεων και παραμορφώσεων παραμένει αντικείμενο εκτεταμένης πειραματικής και αριθμητικής μελέτης, (Πρασιανάκης, 1985)

Αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η μελέτη της κάμψης μαρμάρου τριών σημείων. Συγκεκριμένα τα δοκίμια του μαρμάρου προέρχονται από το μάρμαρο του Διονύσου. Από την επεξεργασία των πειραμάτων αποτελεσμάτων, υπολογίζεται η μέγιστη δύναμη που μπορούν να δεχτούν τα δοκίμια κάτω από

συνθήκες κάμψης καθώς και το βέλος κάμψης τους. Στα πειράματα μεταβάλλεται κάθε φορά μια διάσταση του δοκιμίου καθώς και ο προσανατολισμός των νερών του μαρμάρου. Γίνονται μελέτες ως προς το size-effect του μαρμάρου, δηλαδή εξετάζονται οι διαφοροποιήσεις στην αντοχή κάμψης του καθώς μεταβάλλεται το μήκος μιας διάστασής του, ή διατηρώντας τις διαστάσεις των δοκιμίων ίδιες αλλάζει ο προσανατολισμός του.

Το σημαντικότερο στην διπλωματική αυτή εργασία είναι ότι για πρώτη φορά κατασκευάζονται δοκίμια και γίνονται τα πειράματα κάμψης στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, παρά το γεγονός ότι το θέμα της κάμψης τριών σημείων έχει μελετηθεί ξανά στο παρελθόν από επιστήμονες του ίδιου τμήματος. Τα δεδομένα που προκύπτουν είναι συγκρίσιμα με αποτελέσματα πειραμάτων εργαστηρίων.

Αποτέλεσμα όλων των δοκιμών είναι η δυνατότητα για περαιτέρω μελέτη και έρευνα διαφόρων τεχνικών χαρακτηριστικών του μαρμάρου όπως είναι, για παράδειγμα, η εύρεση του μέτρου ελαστικότητας του Young καθώς και του λόγου Poisson.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο**ΘΕΩΡΙΑ ΑΠΛΗΣ ΚΑΙ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΚΑΜΨΗΣ**

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση της θεωρίας της απλής κάμψης καθώς και της κάμψης τριών σημείων.

2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Με τη δοκιμή της κάμψης (bending test), ελέγχεται η συμπεριφορά ενός υλικού, όταν καταπονείται σε καθαρή κάμψη. Κατά την καταπόνηση των υλικών σε καμπτικές ροπές αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους ένας συνδυασμός εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων.

Η κάμψη μελετάται με τρισδιάστατους δοκούς, συνήθως κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής, οι οποίες καταπονούνται υπό σταθερή καμπτική ροπή M , με την απουσία, παράλληλα, τεμνουσών δυνάμεων, αξονικών δυνάμεων, ή στρεπτικής ροπής (καθαρή κάμψη). Εάν η τιμή της ροπής κάμψης είναι τέτοια, ώστε το υλικό να βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, τότε οι τάσεις σε μια διατομή μεταβάλλονται σύμφωνα με το νόμο (Πρασιανάκης, 1986) :

$$\sigma^{\kappa} = \frac{M_z}{W} = \frac{M_z}{I_z} y$$

όπου W είναι η ροπή αντίστασης και I_z , η ροπή αδράνειας της διατομής της δοκού. Η διατομή της δοκού είναι πάντοτε μικρή σε σχέση με το μήκος της, (Πρασιανάκης, 1986).

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών σε κάμψη υιοθετούνται δύο παραδοχές (παραδοχές Bernoulli) οι οποίες άλλωστε ανταποκρίνονται σε πολύ μεγάλο βαθμό στην πραγματική συμπεριφορά των καμπτόμενων δοκών (υπό συνθήκες καθαρής κάμψης) :

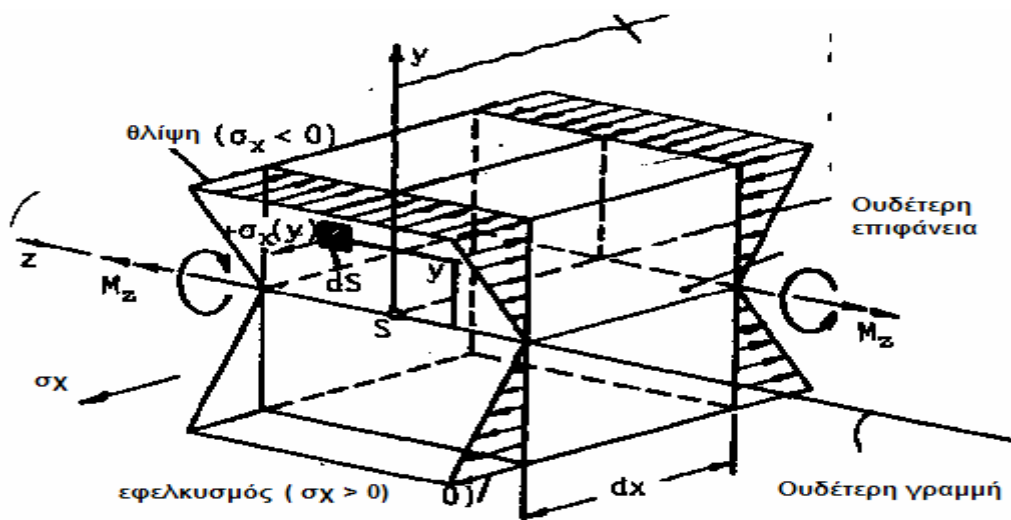
- α) Ότι οι εγκάρσιες διατομές της δοκού διατηρούν την επιπεδότητά τους κατά τη διάρκεια της καμπτικής παραμόρφωσης.
- β) Ότι η δοκός παραμορφώνεται σαν να ήταν ένα άθροισμα από ανεξάρτητες μεταξύ τους διαμήκεις ίνες.

Οι παραδοχές αυτές υποδεικνύουν ότι οι διατομές της δοκού στρέφονται υπό την επίδραση του καμπτικού φορτίου ως ανένδοτες επιφάνειες, καθώς η μία περιοχή ινών στο εσωτερικό του δοκιμίου εφελκύεται, ενώ η άλλη θλίβεται. Η μετάβαση από την περιοχή των θλιβόμενων ινών στην περιοχή των εφελκυομένων ινών συντελείται ομαλά (γραμμική μεταβολή των τάσεων από τη μέγιστη εφελκυστική τιμή στην ελάχιστη θλιπτική - τιμή), πράγμα που σημαίνει ότι η περιοχή των εφελκυομένων ινών διαχωρίζεται από την περιοχή των θλιβόμενων ινών με μια επιφάνεια μηδενικών τάσεων. Η επιφάνεια αυτή πάνω στην οποία οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι μηδέν, καλείται ουδέτερη επιφάνεια (Σχ. 2.1).

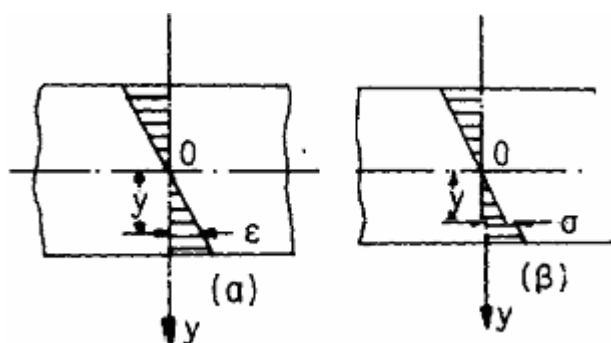
Από την παραδοχή αυτή προκύπτει ότι η ουδέτερη επιφάνεια είναι ο τόπος των τομών των παλιών (πριν την παραμόρφωση) με τις νέες (μετά την παραμόρφωση) θέσεις των διατομών της ράβδου. Οι τομές αυτές ονομάζονται ουδέτερες γραμμές. Κάθε διαμήκης γραμμή πάνω στην ουδέτερη επιφάνεια, καλείται ο ουδέτερος άξονας.

Η παραδοχή της επιπεδότητας των εγκάρσιων διατομών σημαίνει παράλληλα ότι η παραμόρφωση των ινών της ράβδου είναι (στην ελαστική μόνο περιοχή) γραμμική συνάρτηση της απόστασης τους από τον ουδέτερο άξονα, δηλαδή (Πρασιανάκης, 1986):

$$\varepsilon = \kappa y \quad (2.1)$$



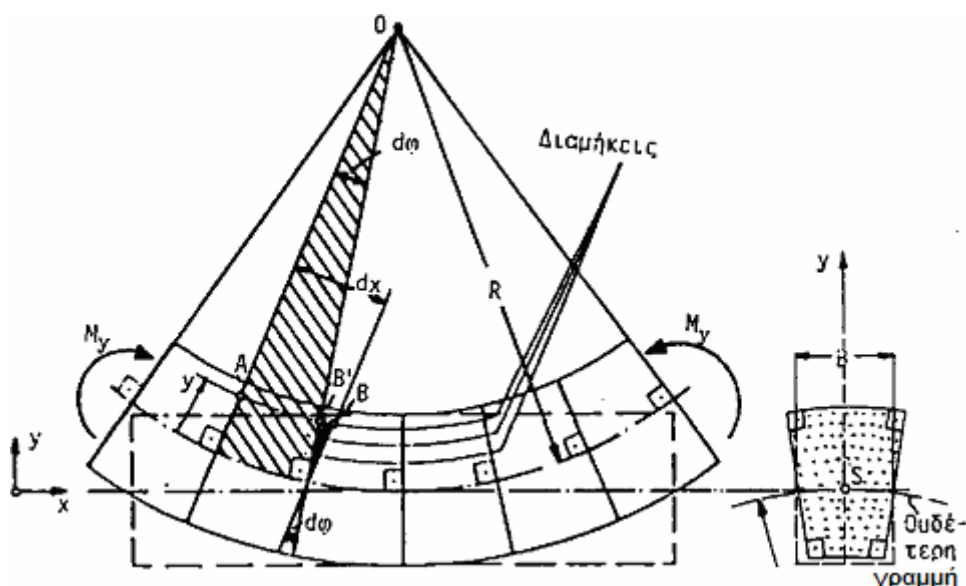
Σχήμα 2.1, επιφάνεια φόρτισης (Πρασιανάκης, 1985)



Σχήμα 2.2, παραμόρφωση των ινών από τον ουδέτερο άξονα (Πρασιανάκης, 1985)

Επειδή ισχύει γραμμική σχέση μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων πρέπει και η τάση των ινών της ράβδου να είναι γραμμική συνάρτηση της απόστασης τους y από τον ουδέτερο άξονα (Σχ. 2.2). Όταν όμως η δοκός εισέλθει στην πλαστική περιοχή τότε παύει να ισχύει η γραμμικότητα μεταξύ των τάσεων και παραμορφώσεων.

Κατά τη διάρκεια της κάμψης της δοκού οι κάτω ίνες της δοκού επιμηκύνονται, ενώ οι πάνω ίνες της βραχύνονται. Οι εξωτερικές ίνες της δοκού δέχονται τις (κατά απόλυτη τιμή) μέγιστες παραμορφώσεις. Καθ' όλο το μήκος μιας ίνας της δοκού η παραμόρφωση είναι ενιαία, πράγμα που σημαίνει ότι η αρχικά ευθεία δοκός μετασχηματίζεται σε τόξο κύκλου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3, ευθεία δοκός που μετασχηματίζεται σε τόξο κύκλου κατά την κάμψη
(Πρασιανάκης, 1985)

Για την ορθή διαμήκη παραμόρφωση $\varepsilon_{xx} = \varepsilon$ από την ομοιότητα των τριγώνων του σχήματος 2.3 προκύπτει (Πρασιανάκης, 1985) :

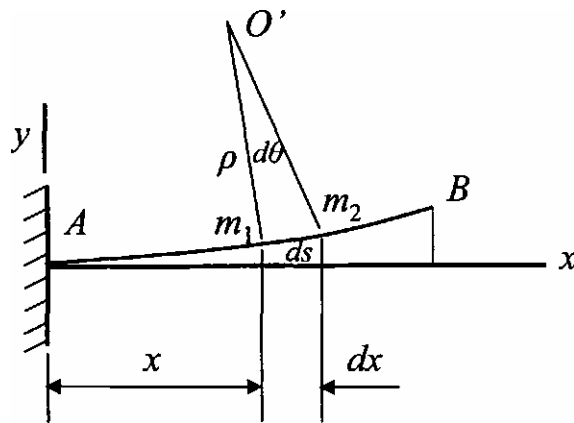
$$\varepsilon = \frac{\Delta dx}{dx} = \frac{y}{R} \quad (2.2)$$

η οποία σε συνδυασμό με την σχέση (2.1) δίνει (Πρασιανάκης, 1985) :

$$\kappa = \frac{1}{R} \quad (2.3)$$

όπου R η ακτίνα καμπυλότητας της δοκού, (Πρασιανάκης, 1985).

Για την διευκρίνιση της έννοιας της καμπυλότητας, θεωρείται η διάταξη του σχήματος 2.4. Το βέλος κάμψης της δοκού είναι η καμπύλη AB. Στη συνέχεια σημειώνονται δύο σημεία m_1 και m_2 πάνω στο βέλος κάμψης. Το σημείο m_1 επιλέγεται σε μια αυθαίρετη απόσταση x από τον άξονα y και το σημείο m_2 επιλέγεται σε μια μικρή απόσταση ds λίγο μακρύτερα κατά μήκος της καμπύλης. Σε κάθε ένα από αυτά τα δύο σημεία σχεδιάζεται μια γραμμή κάθετα στην εφαπτομένη του βέλους κάμψης. Αυτές οι κάθετες τέμνονται στο σημείο O', το οποίο είναι το κέντρο της καμπυλότητας του βέλους κάμψης.



Σχήμα 2.4, Βέλος κάμψης της δοκού (Gere και Timoshenko, 1997)

Η απόσταση m_1O' καλείται ακτίνα καμπυλότητας ρ και η καμπυλότητα κ καθορίζεται σαν την αντίστροφη της ακτίνας της καμπυλότητας.

Με την καμπυλότητα μετράται πόσο έντονα κάμπτεται μια δοκός. Αν το φορτίο στη δοκό είναι μικρό, η δοκός θα είναι σχεδόν ευθεία, η ακτίνα της καμπυλότητας θα είναι πολύ μεγάλη και η καμπυλότητα πολύ μικρή. Από την γεωμετρία του τριγώνου $O'm_1m_2$ προκύπτει ότι (Gere και Timoshenko, 1997) :

$$\rho d\theta = ds$$

όπου, $d\theta$ είναι η εσωτερική γωνία μεταξύ των δύο κάθετων και ds είναι η απόσταση μεταξύ των m_1 και m_2 .

Αν η καμπυλότητα είναι σταθερή κατά μήκος μιας καμπύλης, η ακτίνα καμπυλότητας θα είναι επίσης σταθερή και η καμπύλη θα είναι το τόξο ενός κύκλου. Τα βέλη κάμψης μιας δοκού είναι συνήθως πολύ μικρά σε σχέση με το μήκος της. Μικρά βέλη κάμψης σημαίνει ότι η καμπύλη τους είναι σχεδόν ευθεία. Συνεπώς η απόσταση ds κατά μήκος της καμπύλης μπορεί να τεθεί ίση με την οριζόντια προβολή της dx , (Gere και Timoshenko, 1997).

Αλλά από τη διαφορική γεωμετρία είναι γνωστό ότι (Πρασιανάκης, 1985) :

$$\frac{1}{R} = \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}} \approx y''$$

(για μικρά βέλη κάμψης y) και συνεπώς γίνεται (Πρασιανάκης, 1985) :

$$\kappa = \frac{1}{R} \approx y'' \quad (2.4)$$

Στην ελαστική περιοχή ισχύει ο νόμος του Hooke (Πρασιανάκης, 1985) :

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{Ey}{R} \quad (2.5)$$

Η τάση σ μεταβάλλεται λοιπόν γραμμικά από τη μέγιστη (εφελκυστική) τιμή

$$\frac{Ey_{\max}}{R} = \frac{Eh/2}{R} \text{ (εξωτερική εφελκυστική ίνα) μέχρι την ελάχιστη (θλιπτική) τιμή} \\ - \frac{Eh/2}{R} \text{ (εξωτερική θλιβόμενη ίνα).}$$

Στην καθαρή κάμψη ισχύει ότι $M \approx 0$, $N=0$ (απουσία αξονικών δυνάμεων). Επειδή λοιπόν η συνισταμένη δύναμη, στη διατομή S είναι μηδέν γίνεται (Πρασιανάκης, 1985) :

$$\int_s \sigma dS = 0 \Rightarrow \frac{E}{R} \int_s y dS = 0 \Rightarrow \int_s y dS = 0$$

Επομένως η ουδέτερη γραμμή περνάει από το κέντρο βάρους της διατομής. Η εξωτερική ροπή M που εφαρμόζεται στη δοκό ισούται με το άθροισμα των ροπών των εσωτερικών δυνάμεων ($\sigma \cdot dS$), άρα (Πρασιανάκης, 1985) :

$$M = \int_s y \sigma dS = \frac{E}{R} \int_s y^2 dS \quad (2.6)$$

Στη σχέση (2.6) η ποσότητα $\int y^2 dS$ είναι η ροπή αδράνειας της διατομής ως προς τον άξονα z .

Άρα η σχέση (2.6) δίνει (Πρασιανάκης, 1985) :

$$\frac{E}{R} = \frac{M}{I_z} \quad (2.7\alpha)$$

η οποία με τη βοήθεια της σχέσης (2.7) γίνεται (Πρασιανάκης, 1985) :

$$\frac{\sigma}{y} = \frac{M}{I_z} \quad (2.7\beta)$$

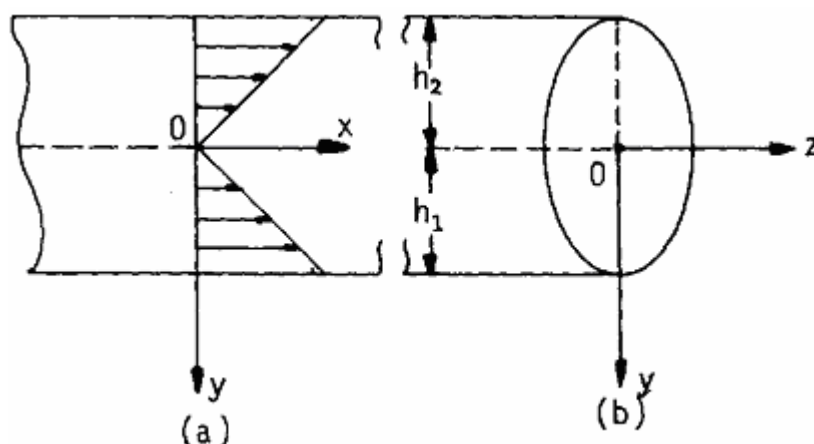
Για $y=y_{\max}$ προκύπτει (Πρασιανάκης, 1985) :

$$\sigma_{\max} = \frac{My_{\max}}{I_z} \quad (2.8)$$

Άρα η τάση γίνεται μέγιστη στις ακραίες τιμές δηλαδή τις πλέον απομακρυσμένες από τον ουδέτερο άξονα της δοκού.

Είναι όμως εφελκυστική στην κυρτή κατώτερη ίνα της δοκού, αλλά και θλιπτική στην κοίλη ανώτερη ίνα.

Συμβολίζοντας τις αποστάσεις των εφελκυσμένων ακρότατων ινών με h_1 , και των θλιβόμενων αντίστοιχα με h_2 , (Σχ 2.5),



Σχήμα 2.5, συμπεριφορά ινών κατά την κάμψη (Πρασιανάκης, 1985)

τότε για την τάση σε κάθε μία από αυτές τις ίνες ισχύει αντίστοιχα και ότι (Πρασιανάκης, 1985) :

$$\sigma_{\max} = \frac{Mh_1}{I_z} \text{ και } \sigma_{\min} = \frac{Mh_2}{I_z} \quad (2.9)$$

Αν η διατομή είναι συμμετρική ως προς τον άξονα που περνάει από το κέντρο βάρους είναι $h_1 = h_2 = \frac{h}{2}$ τότε και οι τάσεις των ακρότατων ινών σε εφελκυσμό και θλίψη είναι ίσες.

Στη σχέση (2.8) ο λόγος $\frac{I_z}{y} = W$ καλείται ροπή αντίστασης της διατομής. Για την περίπτωση ορθογωνικής διατομής είναι : $W = \frac{\beta h^2}{6}$ ενώ για κυκλική διατομή διαμέτρου d είναι : $W = \frac{\pi d^3}{32}$, (Πρασιανάκης, 1985).

Με τη δοκιμή κάμψης προσδιορίζονται οι ποσότητες (Πρασιανάκης, 1986) :

Α) η αντοχή κάμψης σ_{θ}^{κ} που για τα ψαθυρά υλικά ορίζεται ως ο λόγος της ροπής κάμψης τη στιγμή της θραύσης προς τη ροπή αντίστασης της διατομής.

$$\sigma_{\theta}^{\kappa} = \frac{M_z^{\theta}}{W}$$

Για δοκό ορθογωνικής διατομής πλάτους β και ύψους h , που στηρίζεται σε εφέδρανα, που απέχουν μεταξύ τους απόσταση L , η προηγούμενη σχέση γίνεται (Πρασιανάκης, 1986) :

$$\sigma_{\theta}^{\kappa} = \frac{3P_{\max}L}{2bh^2}$$

όπου $P_{\max}$ το μέγιστο φορτίο.

Β) το βέλος κάμψης y κατά τη στιγμή της θραύσης, που είναι η κατακόρυφη μετακίνηση του σημείου εφαρμογής του φορτίου P κατά την θραύση. 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 μια μονόπακτη δοκός AB που υπόκειται σε φορτίο P στο ελεύθερο άκρο της, ο αρχικά ευθύγραμμος άξονας της δοκού καμπυλώνεται. Η απόκλιση αυτή δίνεται από το βέλος κάμψης της δοκού y , (deflection curve).

Γ) η δυσκαμψία K , που είναι ο λόγος της αντοχής κάμψης προς το βέλος κάμψης τη στιγμή της θραύσης της δοκού (Πρασιανάκης, 1986) :

$$K = \frac{\sigma_{\theta}^{\kappa}}{y}$$

Δ) ο συντελεστής κάμψης λ , που ορίζεται ως ο λόγος της αντοχής σε κάμψη σ_{θ}^{κ} προς την αντοχή σε εφελκυσμό $\sigma_{\theta}^{\varepsilon}$ (Πρασιανάκης, 1986) :

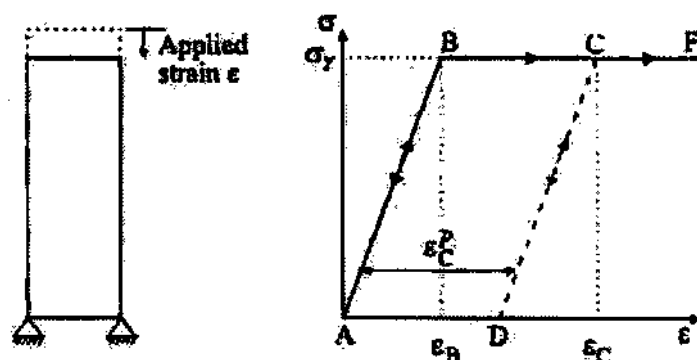
$$\lambda = \frac{\sigma_{\theta}^{\kappa}}{\sigma_{\theta}^{\varepsilon}}$$

Η αντοχή σε κάμψη, σ_{θ}^{κ} , είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη από την αντοχή σε εφελκυσμό, $\sigma_{\theta}^{\varepsilon}$, και αυτό γιατί η σ_{θ}^{κ} συνάγεται με βάση την υπόθεση ότι ο νόμος του Hooke ισχύει σε όλη τη διάρκεια της καταπόνησης, πράγμα που ακόμα και για τα περισσότερα ψαθυρά υλικά δεν είναι απόλυτα ακριβές.

Ε) η μορφή της ελαστικής γραμμής $y = f(x)$ σε διάφορες καταστάσεις φόρτισης της δοκού, (Πρασιανάκης, 1986)

2.2. Η ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από έναν γραμμικά ή μη γραμμικά ελαστικό κλάδο. Όταν η εντατική κατάσταση του υλικού αντιπροσωπεύεται από τον ελαστικό κλάδο, τότε το υλικό παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά. Όταν όμως η εντατική κατάσταση υπερβεί το σημείο διαρροής του υλικού, τότε αρχίζει η εμφάνιση μόνιμων παραμορφώσεων. Επίσης, ένα πέτρωμα ή γεωυλικό μπορεί να μην χαρακτηρίζεται από τέλεια ελαστοπλαστική συμπεριφορά, αλλά στον κλάδο, μετά το σημείο διαρροής, να παρουσιάζει είτε κράτυνση είτε χαλάρωση.



Σχήμα 2.6, μονοαξονική φόρτιση γραμμικά ελαστικού τέλεια πλαστικού υλικού (Πρασιανάκης, 1986)

Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται μια δοκός ενός ιδανικού γραμμικού ελαστοπλαστικού υλικού, που φορτίζεται κατά τον κάθετο άξονα με την εφαρμογή θλιπτικής αξονικής παραμόρφωσης, ε . Σε αυτό το σχήμα εύκολα παρατηρείται επίσης και η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης για αυτή την δοκό.

Κατά την πρώτη παραμορφωσιακή κατάσταση η δοκός συμπεριφέρεται ελαστικά, όπως φαίνεται στη γραμμή AB. Όταν το υλικό είναι γραμμικά ελαστικό, η κλίση της γραμμής AB δίνεται από το μέτρο ελαστικότητας του Young, E. Αν η παραμορφωσιακή διαδικασία σταματήσει πριν η τάση στη δοκό φτάσει το σημείο B και η δοκός είναι αφόρτιστη, η σχέση τάσης - παραμόρφωσης περιγράφεται από την γραμμή BA. Συνεπώς, όσο η παραμόρφωση δεν προκαλεί την τάση να φτάσει στο σημείο B, η δοκός συμπεριφέρεται με γραμμικά ελαστικό τρόπο και όταν αποφορτίζεται, επιστρέφει στην αρχική της κατάσταση, χωρίς να έχει υποστεί μόνιμες παραμορφώσεις.

Αν η δοκός φορτιστεί πέρα από την τροπή ε_B στο σημείο C, η καμπύλη τάσης- παραμόρφωσης περνά το σημείο B. Στο σημείο B εμφανίζεται η τάση διαρροής σ_y και η δοκός γίνεται πλαστική. Δεν υπάρχει πλέον γραμμική σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης και η τάση στη δοκό παραμένει σταθερή και ίση με σ_y . Αν στη συνέχεια αποφορτιστεί, η δοκός γίνεται ελαστική και η καμπύλη τάσης και παραμόρφωσης περιγράφεται από την γραμμή CD, η οποία είναι παράλληλη με την γραμμή BA. Όταν γίνεται αποφόρτιση ώστε η αξονική τάση να είναι μηδέν (σημείο D), υπάρχει ακόμα παραμόρφωση στη δοκό. Αυτή η παραμόρφωση είναι ίδια με την πλαστική παραμόρφωση που επιτυγχάνεται κατά την γραμμή BC και δίνεται από την σχέση : $\varepsilon_c^p = \varepsilon_c - \varepsilon_B$. Έτσι η δοκός δεν επιστρέφει στην αρχική της μορφή αφού έχει υποστεί μόνιμες παραμορφώσεις.

Αν στη συνέχεια η δοκός επαναφορτιστεί, η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης ακολουθεί και πάλι την γραμμή DC μέχρι το σημείο C, στο οποίο η αξονική τάση ισούται με την τάση διαρροής και η δοκός γίνεται και πάλι πλαστική. Στη συνέχεια κινείται στη γραμμή CF. Είναι σαφές ότι αν η παραμόρφωση δεν είναι επαρκής ώστε η τάση να είναι στο σημείο C, η δοκός συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά. Η συμπεριφορά είναι αναστρέψιμη και για αυτό το λόγο ελαστική, στις γραμμές AB και DC, δεδομένου ότι στο τμήμα BCF η συμπεριφορά είναι μη αναστρέψιμη. Το υλικό που συμπεριφέρεται όπως στο σχήμα 2.6 ονομάζεται γραμμικά ελαστικό ιδανικά πλαστικό υλικό, (Πρασιανάκης, 1986).

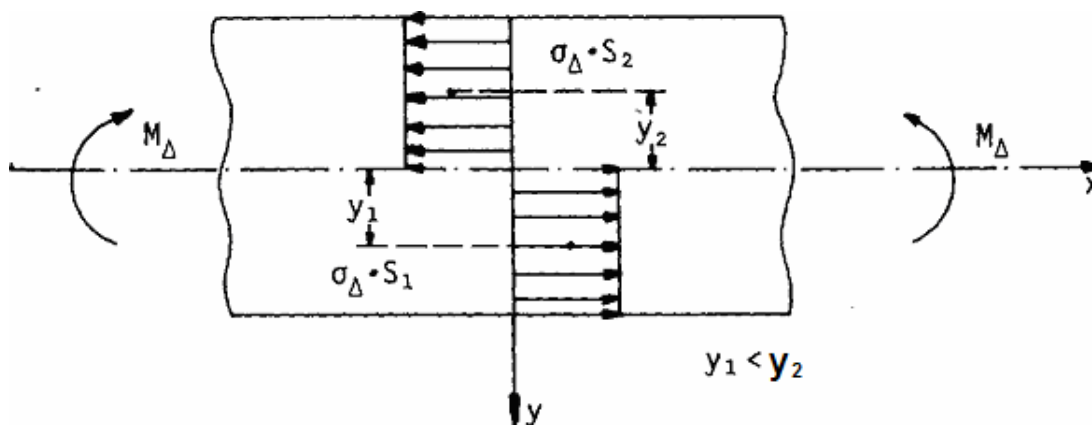
2.3. ΚΑΜΨΗ ΔΟΚΟΥ ΣΤΗΝ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

Η γραμμική αύξηση της απόλυτης τιμής των τάσεων (τόσο στη θλιπτική όσο και στην εφελκυστική περιοχή) καθώς αυξάνει η απόσταση y των ινών της ράβδου από τον ουδέτερο άξονα, έχει σαν αποτέλεσμα μια σταδιακή διαρροή της ράβδου καθώς αυξάνει το επιβαλλόμενο φορτίο P.

Κατ'αρχήν διαρρέουν δηλαδή οι εξωτερικές ίνες, ενώ στο εσωτερικό της ράβδου διατηρείται μια ελαστική ζώνη, ο ελαστικός πυρήνας, ο οποίος διαρκώς συρρικνώνεται με την αύξηση του φορτίου και την επέκταση του διαρρέοντος εξωτερικού φλοιού του δοκιμίου. Η ομαλή συνεχής μεταβολή της τιμής των τάσεων από την περιοχή του εφελκυσμού (θετικές τιμές) στην περιοχή της θλίψης (αρνητικές τιμές) σημαίνει ότι όσο κι αν επεκταθεί προς το εσωτερικό ο πλαστικός φλοιός της ράβδου, θα

εξακολουθεί πάντοτε να υφίσταται στο εσωτερικό της ένας ελαστικός πυρήνας (γύρω από τον ουδέτερο άξονα). Επειδή όμως, για μεγάλες παραμορφώσεις, η διάμετρος του ελαστικού πυρήνα γίνεται πάρα πολύ μικρή σε σχέση με τη διάμετρο της ράβδου (για τους χάλυβες έχει υπολογιστεί ότι η ελάχιστη τιμή της ελαστικής περιοχής συρρικνώνεται στο $\frac{1}{200} y_{\max}$ περίπου), γίνεται η παραδοχή ότι ολόκληρη η διατομή του υλικού διαρρέει, οπότε η κατανομή των τάσεων παίρνει τη μορφή του "πλαστικού στροφέα", (Πρασιανάκης, 1986).

Για τη μελέτη της κάμψης στην πλαστική περιοχή θεωρείται ότι η συμπεριφορά του υλικού είναι ελαστική-απολύτως πλαστική. Αν σ_{Δ} είναι η τάση διαρροής του υλικού σε κάμψη, τότε όταν η διατομή εισέλθει εξ ολοκλήρου στην πλαστική περιοχή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7, πλαστική συμπεριφορά κάμψης (Πρασιανάκης, 1986)

τότε το άθροισμα των εξωτερικών δυνάμεων σε ολόκληρη τη διατομή ανάγεται σε ζεύγος με ροπή ίση με (Πρασιανάκης, 1986) :

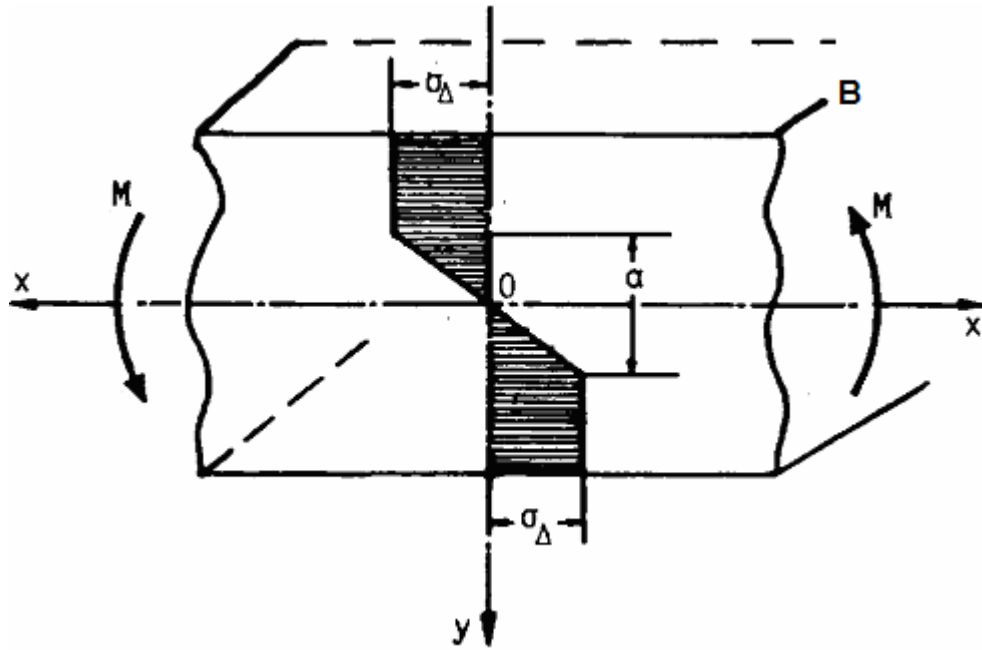
$$M_{\Delta} = \sigma_{\Delta} S_1 y_1 + \sigma_{\Delta} S_2 y_2 \quad (2.10)$$

Για ορθογωνική διατομή και όταν $S_1 = S_2 = S/2$ προκύπτει ότι (Πρασιανάκης, 1986) :

$$M_{\Delta} = \frac{\beta h^2}{4} \sigma_{\Delta} \quad (2.11)$$

όπου h και β είναι το ύψος και το πλάτος της ορθογωνικής διατομής αντίστοιχα.

Στην περίπτωση της ελαστο-πλαστικής παραμόρφωσης σε κάμψη (δοκός με ορθογωνική διατομή, σχήμα 2.8) για το ύψος του ελαστικού πυρήνα λαμβάνεται υπόψη ότι σ' αυτήν την περίπτωση η επιβαλλόμενη ροπή ισούται με το άθροισμα των ροπών των εσωτερικών δυνάμεων. Αυτό ισχύει τόσο για την περιοχή του ελαστικού πυρήνα, όσο και στην περιοχή της διαρροής, (Πρασιανάκης, 1986).



Σχήμα 2.8, ελαστο-πλαστική παραμόρφωση σε κάμψη (Πρασιανάκης, 1986)

Είναι δηλαδή (Πρασιανάκης, 1986) :

$$M = \left[\sigma_{\Delta} \left(\frac{h}{2} \beta \frac{h}{2} - \frac{1}{2} \frac{\alpha}{2} \beta \frac{\alpha}{3} \right) \right] = \beta \sigma_{\Delta} \left(\frac{h^2}{4} - \frac{\alpha^2}{12} \right) \quad (2.12)$$

όπου α το ύψος του ελαστικού πυρήνα της διατομής και β το πλάτος της ορθογωνικής δοκού.

Επίσης ισχύουν οι σχέσεις (Πρασιανάκης, 1986) :

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{\sigma_{\Delta}}{E} \quad (2.13\alpha)$$

και

$$y'' = \frac{1}{R} = \frac{\varepsilon_{\Delta}}{\alpha/2} = \frac{2\sigma_{\Delta}}{E\alpha} \quad (2.13\beta)$$

Από τη σχέση (2.13β) προκύπτει (Πρασιανάκης, 1986) :

$$\alpha = \frac{2\sigma_{\Delta}}{Ey''} \quad (2.13\gamma)$$

και αντικαθιστώντας την τιμή του ελαστικού πυρήνα στη σχέση (2.12) προκύπτει για τη ροπή M η σχέση (Πρασιανάκης, 1986) :

$$M = \frac{\beta h^2 \sigma_{\Delta}}{4} - \frac{\beta \sigma_{\Delta}^3}{3E^2 (y'')^2} \quad (2.14)$$

Η σχέση (2.14) δίνει τη ροπή M για τη γενική περίπτωση της ελαστο-πλαστικής καμπτικής παραμόρφωσης. Για την οριακή ελαστική περίπτωση, όπου $\sigma_{\max} = \sigma_{\Delta}$ αλλά και $a = h$, η ροπή δίνεται από τη σχέση (Πρασιανάκης, 1986) :

$$M = M_E = \frac{\beta h^2}{6} \sigma_{\Delta} = W_E \sigma_{\Delta} \quad (2.15)$$

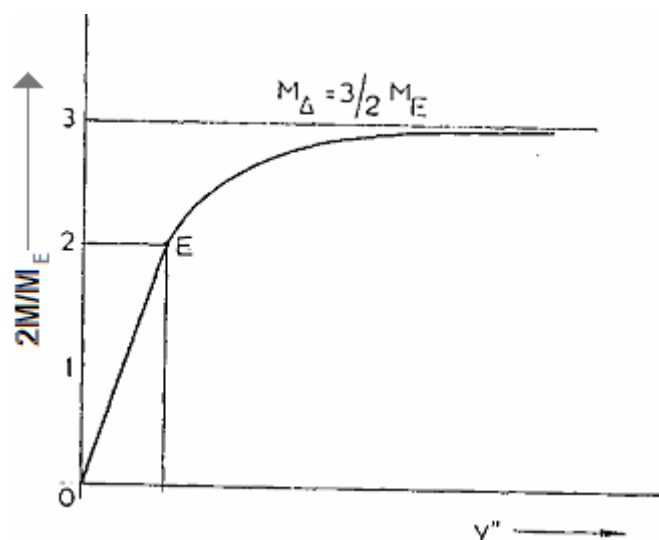
όπου W_E η ελαστική ροπή αντίστασης.

Τέλος με συνδυασμό των σχέσεων (2.14) και (2.15) προκύπτει (Πρασιανάκης, 1986):

$$M = M_E \left(\frac{3}{2} - \frac{2\sigma_{\Delta}^2}{h^2 E^2 (y'')^2} \right) \quad (2.16)$$

που δίνει τη ροπή στη γενική περίπτωση της ελαστικής καμπτικής παραμόρφωσης συναρτήσει της τιμής της καμπτικής ροπής στην ελαστική περιοχή και της καμπυλότητας της δοκού y'' . Το σχήμα 2.9, παρουσιάζει τη μεταβολή της ροπής M σαν συνάρτηση του y'' , σχέση , για την ελαστική, όριο E , και την ελαστοπλαστική περιοχή. Για την οριακή περίπτωση του πλαστικού στροφέα, οπότε $a \rightarrow 0$ και $y'' \rightarrow \infty$ προκύπτει από τη σχέση (2.16) (Πρασιανάκης, 1986) :

$$M_{\Delta} = \frac{3}{2} M_E = \frac{\beta h^2}{4} \sigma_{\Delta} = W_E \sigma_{\Delta} \quad (2.17)$$

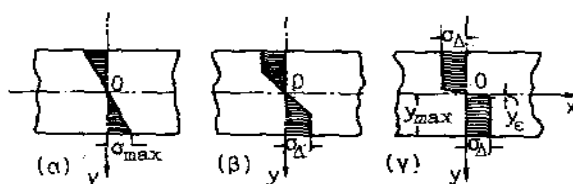


Σχήμα 2.9, μεταβολή της ροπής M συναρτήσει του y'' (Πρασιανάκης, 1986)

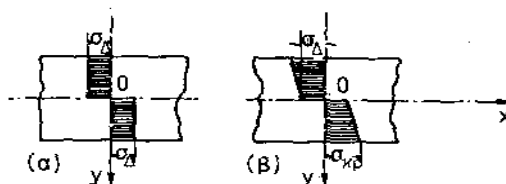
Το μέγεθος $W_{\Delta} = \frac{\beta h^2}{4}$ ονομάζεται πλαστική ροπή αντίστασης και καθορίζει την οριακή φέρουσα ικανότητα της δοκού στην πλαστική περιοχή. Ο λόγος της ροπής στην πλαστική περιοχή (M_{Δ}) προς τη ροπή στην ελαστική περιοχή M_E λέγεται συντελεστής μορφής και εξαρτάται από τη μορφή της καταπονούμενης διατομής.

Για την περίπτωση της ράβδου ορθογωνικής διατομής ισχύει λοιπόν $\frac{W_{\Delta}}{W_E} = 1,5$.

Αν η συμπεριφορά του υλικού θεωρηθεί ελαστική - απόλυτα πλαστική ή ελαστική - γραμμικά κρατυνόμενη, τότε η διανομή των καμπτικών τάσεων για την ελαστοπλαστική περίπτωση και την περίπτωση του πλαστικού στροφέα δίνεται από τα σχήματα 2.15α και 2.15β αντίστοιχα, (Πρασιανάκης, 1986).



Σχήμα 2.10α, πλαστικός στροφέας κατά την συμπεριφορά του υλικού (Πρασιανάκης, 1986)



Σχήμα 2.10β, πλαστικός στροφέας κατά την συμπεριφορά του υλικού (Πρασιανάκης, 1986)

2.4. ΜΟΡΦΕΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΠΥΡΗΝΑ

Αν η σχέση (2.12) επιλυθεί ως προς α , (ύψος ελαστικού πυρήνα, δοκού ορθογωνικής διατομής) και ληφθεί υπόψη και η σχέση (2.11) τότε προκύπτει (Πρασιανάκης, 1986) :

$$\alpha = h \sqrt{3 \left(1 - \frac{M}{M_{\Delta}} \right)} \quad (2.18)$$

Στη σχέση (2.18) αντικαθίσταται η ροπή M με την αναλυτική της έκφραση για κάθε περίπτωση καταπόνησεως και βρίσκεται έτσι η συγκεκριμένη κατά περίπτωση έκφραση του α .

Όπως είναι γνωστό :

A) Για ορθογωνική αμφιέρειστη δοκό με συγκεντρωμένο φορτίο στη μέση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11 ισχύει (Πρασιανάκης, 1986) :

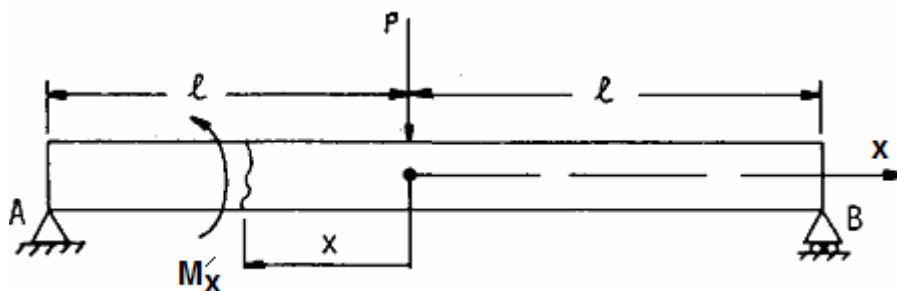
$$M_x = \frac{P}{2}(l - x) = M \xrightarrow{x=0} M_{\Delta} = \frac{P}{2}l$$

οπότε προκύπτει (Πρασιανάκης, 1986) :

$$\frac{M}{M_{\Delta}} = 1 - \frac{x}{l} \quad (2.19)$$

και από τις σχέσεις (2.18) και (2.19) θα λυθεί (Πρασιανάκης, 1986) :

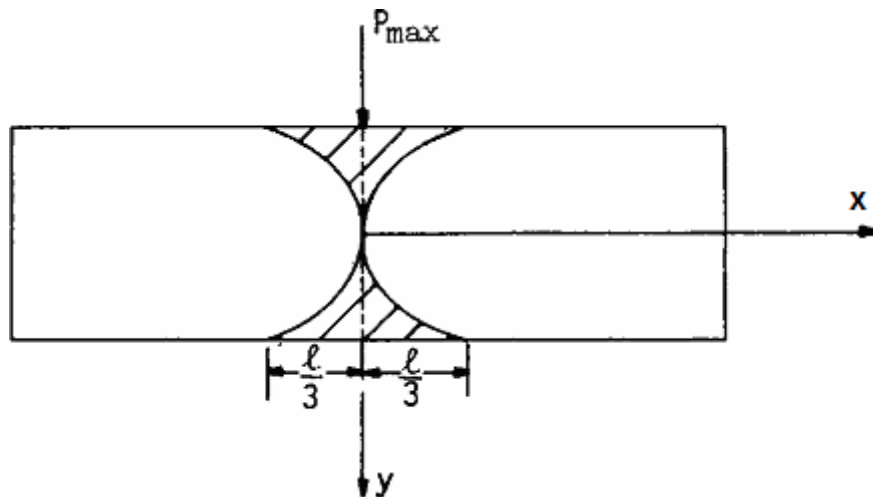
$$a = h \sqrt{\frac{3x}{l}} \quad (2.20)$$



Σχήμα 2.11, ορθογωνική αμφιέρειστη δοκό με συγκεντρωμένο φορτίο στη μέση (Πρασιανάκης, 1986)

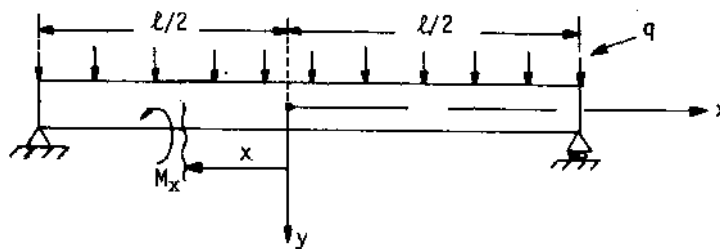
Από την σχέση (2.20) φαίνεται ότι η μορφή του ελαστοπλαστικού πυρήνα είναι παραβολικής μορφής ($a = f(x)$).

Για $h = a$, προκύπτει ότι $x = \pm \frac{1}{3}$, δηλαδή η πλαστική ζώνη στα πέλματα της δοκού εκτείνεται εκατέρωθεν μέχρι αυτή την απόσταση από το μέσο της, όπως στο σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12, η πλαστική ζώνη στα πέλματα της δοκού εκτείνεται εκατέρωθεν από το μέσο της (Πρασιανάκης, 1986)

Β) Για την περίπτωση της αμφιέρειστης ορθογωνικής δοκού που φορτίζεται με ομοιόμορφο φορτίο, (Σχ. 2.18).



Σχήμα 2.13, αμφιέρειστη ορθογωνικής δοκού που φορτίζεται με ομοιόμορφο φορτίο (Πρασιανάκης, 1986)

Στην περίπτωση αυτή ισχύει (Πρασιανάκης, 1986) :

$$M_x = M = ql(l-x) - q(l-x)\left(\frac{l-x}{2}\right) = \frac{ql^2 - qx^2}{2} \quad (2.21\alpha)$$

και για $x = 0$ οπότε $M_x = M = M_\Delta$ και προκύπτει (Πρασιανάκης, 1986) :

$$M_\Delta = \frac{ql^2}{2} \quad (2.21\beta)$$

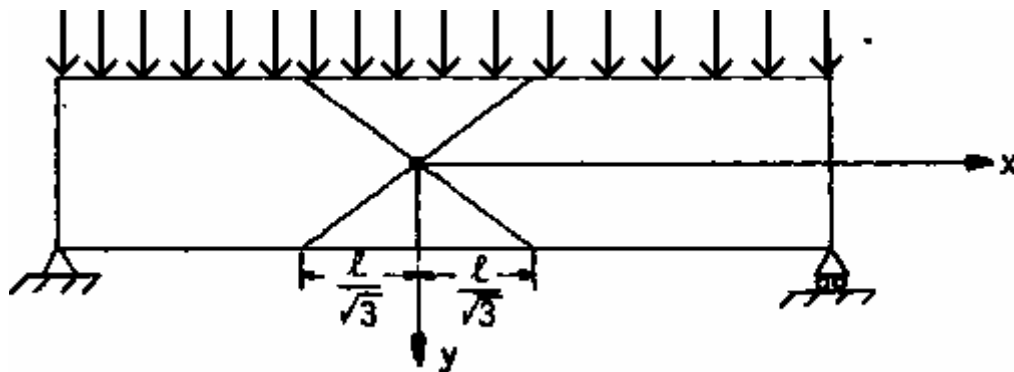
Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (2.21α) και (2.21β) (Πρασιανάκης, 1986) :

$$\frac{M}{M_{\Delta}} = 1 - \frac{x^2}{l^2} \quad (2.21\gamma)$$

και από τις σχέσεις (2.18) και (2.21γ) προκύπτει (Πρασιανάκης, 1986) :

$$a = h\sqrt{3} \frac{x}{l} \quad (2.22)$$

Από την τελευταία σχέση προκύπτει ότι η μορφή του ελαστοπλαστικού πυρήνα για αυτήν την περίπτωση είναι γραμμικής μορφής και εκτείνεται σε απόσταση $x = \pm \frac{l}{\sqrt{3}}$ για $h = a$, εκατέρωθεν του μέσου της δοκού, (Σχ. 2.19), (Πρασιανάκης, 1986).

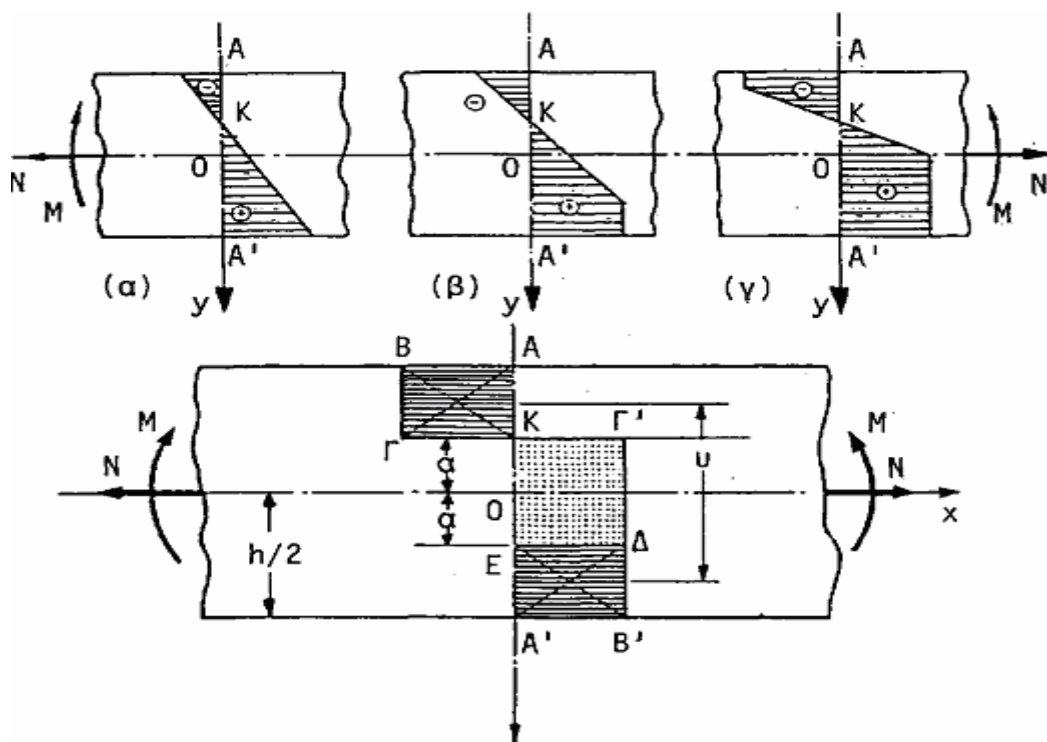


Σχήμα 2.14, μορφή ελαστοπλαστικού πυρήνα δοκού που φορτίζεται με ομοιόμορφο φορτίο (Πρασιανάκης, 1986)

2.5. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕΚΚΕΝΤΡΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Εάν σε μια δοκό ορθογωνικής διατομής υπερτίθεται φόρτιση μιας καμπτικής ροπής M και μιας αξονικής δύναμης N , προκύπτει μια ασύμμετρη κατανομή των τάσεων όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.20.

Η περίπτωση δ του σχήματος ονομάζεται άνισος πλαστικός στροφέας και παριστά την οριακή περίπτωση της διαρροής ολόκληρης της επιφάνειας του δοκιμίου.



Σχήμα 2.15, ασύμμετρη κατανομή των τάσεων σε μια δοκό ορθογωνικής διατομής (Πρασιανάκης, 1986)

Από αυτήν την περίπτωση γίνεται προφανές ότι η αξονική δύναμη N δίνεται από την σχέση (Πρασιανάκης, 1986) :

$$N = 2\alpha\beta\sigma_{\Delta}$$

Η θλιπτική δύναμη P_{θ} είναι (Πρασιανάκης, 1986) :

$$P_{\theta} = \sigma_{\Delta}\beta\left(\frac{h}{2} - \alpha\right)$$

και η εσωτερική ροπή M δίνεται από την σχέση (Πρασιανάκης, 1986) :

$$M = P_{\theta} \nu = \sigma_{\Delta} \beta \left(\frac{h}{2} + \alpha \right) \left(\frac{h}{2} - a \right) = \sigma_{\Delta} \beta \left(\frac{h^2}{4} - a^2 \right)$$

όπου το $\nu = \frac{h}{2} + a$, (Πρασιανάκης, 1986).

Τέλος, πρέπει να είναι γνωστό ότι, η παραμόρφωση από κάμψη ε_{κ} είναι μεγαλύτερη της παραμόρφωσης από εφελκυσμό $\varepsilon_{\varepsilon}$ δοκού διατομής $\beta * h$ που καταπονείται με φορτίο P . Δηλαδή είναι (Πρασιανάκης, 1986) :

$$\varepsilon_{\varepsilon} = \frac{P}{\beta h E}, \quad \varepsilon_{\kappa} = \frac{\sigma_{\kappa}}{E} = \frac{M}{WE} = \frac{3Pl}{2E\beta h^2}, \quad \varepsilon_{\kappa} > \varepsilon_{\varepsilon} \quad (2.23)$$

2.6. Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ BERNOLLI - EULER ΓΙΑ ΚΑΜΨΗ ΡΑΒΔΟΥ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

Σύμφωνα με την τεχνική θεωρία του Bernoulli – Euler, η επίδραση του συγκεντρωμένου φορτίου παραλείπεται. Είναι όμως γνωστό ότι στην κεντρική περιοχή μιας δοκού η οποία υποβάλλεται σε κάμψη τριών σημείων, αναμένεται σημαντική διαταραχή του πεδίου των τάσεων και παραμορφώσεων, λόγω της επίδρασης του συγκεντρωμένου φορτίου.

Στα ισότροπα υλικά η κατάσταση της επίπεδης τάσης εμφανίζεται όταν όλες οι τάσεις (ορθές και διατμητικές) που επιδρούν σ' ένα απ' τα ορθογώνια επίπεδα ενός στοιχειώδους κομματιού όγκου είναι μηδέν.

Η κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης εμφανίζεται όταν οι παραμορφώσεις σ' ένα από τα ορθογώνια επίπεδα ενός στοιχειώδους κομματιού της δοκού είναι μηδέν. Κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης προκύπτει για παράδειγμα στην περίπτωση της στοάς μεγάλου μήκους. Μπορεί να θεωρηθεί δηλαδή ότι οι παραμορφώσεις στην διεύθυνση που ακολουθεί το μήκος της στοάς είναι μηδέν.

Όπως παρατηρείται και στην κατάσταση επίπεδης τάσης και στην κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης οι σχέσεις τάσης - παραμόρφωσης έχουν την ίδια μορφή. Στο μόνο σημείο που διαφέρουν είναι στις ελαστικές σταθερές, (Πρασιανάκης, 1986).

2.6.1. ΙΣΟΤΡΟΠΑ ΥΛΙΚΑ

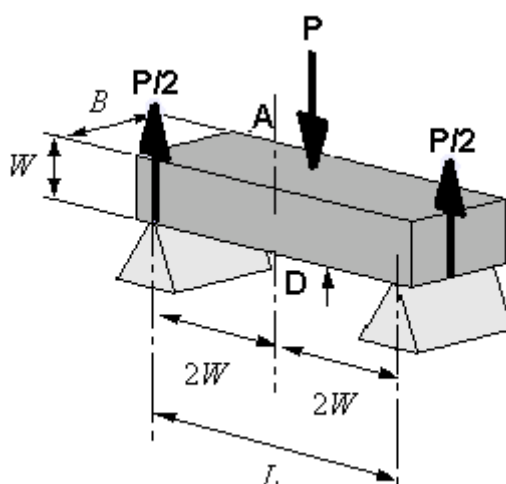
Σε ένα ισότροπο υλικό οι ελαστικές ιδιότητες του είναι ίδιες σε όλες τις κατευθύνσεις. Γι' αυτό έχει ένα μέτρο ελαστικότητας και ένα λόγο του Poisson και στις τρεις κατευθύνσεις (X, Y και Z).

Μια πρώτη προσπάθεια μελέτης της διαταραχής των τάσεων (σε μια ράβδο που υφίσταται κάμψη τριών σημείων) στη θέση που εφαρμόζεται το συγκεντρωμένο φορτίο έγινε από τον Cams Wilson.

Σε πειράματα με μία ράβδο από γυαλί ορθογωνικής διατομής (πλάτους ίσο με τη μονάδα) η οποία στηρίζεται στα δύο άκρα της, όπως στο σχήμα 2.16 και υπόκειται σε συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσο της παρατηρήθηκε ότι στο σημείο A, εφαρμόζεται η κατανομή των τάσεων και προσεγγίζει την κατανομή των τάσεων που παράγεται σε ένα πλακίδιο που υπόκειται σε κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο.

Κατά μήκος της τομής AD η οριζόντια τάση σ_x δεν ακολουθεί γραμμική κατανομή και στο σημείο D απέναντι από το A η εφελκυστική τάση παίρνει μικρότερη τιμή απ' την τιμή που αναμένονταν από τη θεωρία κάμψης, (Gere και Timoshenko, 1997)

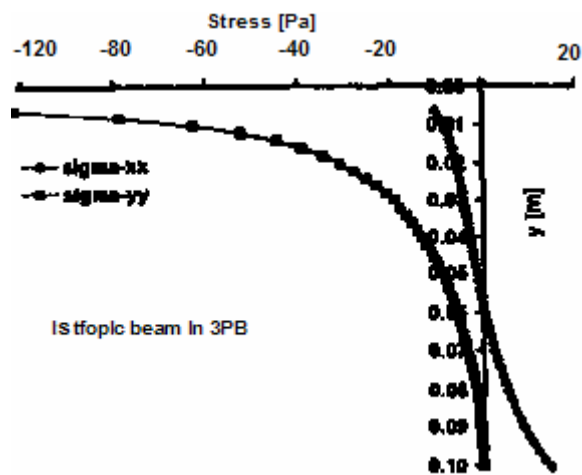
Τα αποτελέσματα αυτά ερμηνεύτηκαν με χρήση εμπειρικών υποθέσεων από τον Stokes (Stokes, 1984).



Σχήμα 2.16, πειραματικό μοντέλο του Cams Wilson (Stokes, 1984)

Η ροπή κάμψης στο μέσο της τομής AD της ράβδου υπολογίστηκε αθροίζοντας τη ροπή της αντίδρασης P/2 με τις ροπές των ακτινικών εφελκυστικών δυνάμεων που ασκούνται στο μισό της ράβδου.

Αυτή η ροπή μπορεί εύκολα να υπολογιστεί αν παρατηρηθεί ότι οι ακτινικά κατανομημένες εφελκυστικές δυνάμεις είναι στατικά ισοδύναμες με την κατανομή της πίεσης γύρω από το σημείο A, (Gere και Timoshenko, 1997).

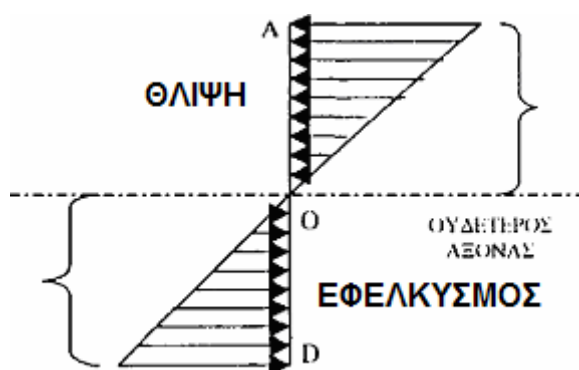


Σχήμα 2.17, πειραματικές μετρήσεις των Coker και Filon

Πειραματικές μετρήσεις που έγιναν από τους Coker και Filon για τον υπολογισμό της κατανομής των κυρίων τάσεων (σ_{xx} και σ_{yy}) κατά μήκος του ύψους της δοκού (για διάφορα ύψη της δοκού) που υποβάλλεται σε κάμψη τριών σημείων παρουσιάζονται στο σχήμα 2.17.

Όπως παρατηρείται από το σχήμα 2.17 η κατανομή των οριζόντιων τάσεων σ_{xx} (κατά μήκος της τομής AD) αρχικά αποτελείται από θετικές τάσεις, στη συνέχεια όμως γίνεται αρνητική. Η θέση στην οποία εμφανίζονται οι θετικές τάσεις είναι η περιοχή της τομής AD που υφίσταται εφελκυσμό, ενώ η θέση στην οποία εμφανίζονται αρνητικές τάσεις είναι η περιοχή της τομής που υφίσταται θλίψη. Το σημείο στο οποίο τέμνει τον άξονα Y είναι η θέση της τομής AD που ούτε θλίβεται ούτε εφελκύεται. Από τη θέση αυτή διέρχεται ο ουδέτερος άξονας της ράβδου.

Στη θέση αυτή η ράβδος ούτε θλίβεται, ούτε εφελκύεται, δηλαδή οι τάσεις είναι μηδέν, όπως φαίνεται από το σχήμα 2.18.



Σχήμα 2.18, μεταβολή τάσεων από θλιπτικές σε εφελκυστικές (Gere και Timoshenko, 1997)

Στη μέση της ράβδου (κατά μήκος της τομής AD) αναπτύσσεται μια κατανομή τάσεων η οποία μεταβάλλεται απ' το μηδέν μέχρι μια ελάχιστη αρνητική τιμή στην ακραία ίνα της ράβδου που θλίβεται (σημείο A της διατομής της ράβδου) και από το μηδέν μέχρι μια μέγιστη θετική τιμή στην ακραία ίνα που εφελκύεται (σημείο D της διατομής της ράβδου). Από τη θέση O διέρχεται μια νοητή ευθεία που ονομάζεται ουδέτερος άξονας της ράβδου, (Gere και Timoshenko, 1997).

Η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων σ_{yy} του σχήματος 2.23 στη θέση A (θέση στην οποία εφαρμόζεται το κατακόρυφο φορτίο), παρουσιάζει υψηλότερες τιμές τάσεων, και στη συνέχεια μειώνεται εκθετικά μέχρι μια τιμή κοντά στο μηδέν (θέση D).

Πειράματα κάμψης τριών σημείων συνεχίστηκαν από τον Seewald. Ο Seewald εισήγαγε νέα συμπεράσματα επηρεασμένος βέβαια από την τεχνική θεωρία Bernoulli-Euler. Από τις τιμές του πίνακα 2.1, του Seewald και των συντελεστών Seewald, προκύπτει ότι για μικρούς λόγους $2L/H$ ο λόγος β αυξάνει συνεχώς ενώ από το λόγο $2L/H=6$ και μετά τείνει ασυμπτωτικά προς την μονάδα. Άρα η τεχνική θεωρία προσεγγίζεται για μεγάλους λόγους $2L/H$, (Gere και Timoshenko, 1997).

Πίνακας 2.1, συγκεντρωτικός πίνακας του Seewald για λόγους $2L/H$ (Gere και Timoshenko, 1997)

$2L/H$	SEEWALD
1,5	0,764
2	0,823
2,3	0,846
2,6	0,863
3	0,882
3,8	0,906
4	0,911
6	0,941
8	0,955
10	0,964

2.6.2. ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΑ ΥΛΙΚΑ

Σε ένα ανισότροπο υλικό οι ελαστικές ιδιότητες είναι διαφορετικές σε κάθε κατεύθυνση. Οι κατευθύνσεις στις οποίες οι ελαστικές ιδιότητες του υλικού είναι ίδιες είναι ελαστικά ισοδύναμες. Σ' ένα ισότροπο υλικό όλες οι κατευθύνσεις είναι ελαστικά ισοδύναμες ενώ σ' ένα ανισότροπο υλικό ορισμένες από αυτές είναι ελαστικά ισοδύναμες.

Στη γενική περίπτωση της ανισοτροπίας κάθε συντελεστής της παραμόρφωσης είναι μια γραμμική συνάρτηση των έξι συντελεστών της τάσης. Μελετώντας ένα ομογενές σώμα που βρίσκεται σε κατάσταση ανισοτροπίας και αναφερόμενοι στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, οι εξισώσεις της τάσης εκφράζονται από το γενικευμένο νόμο του Hooke.

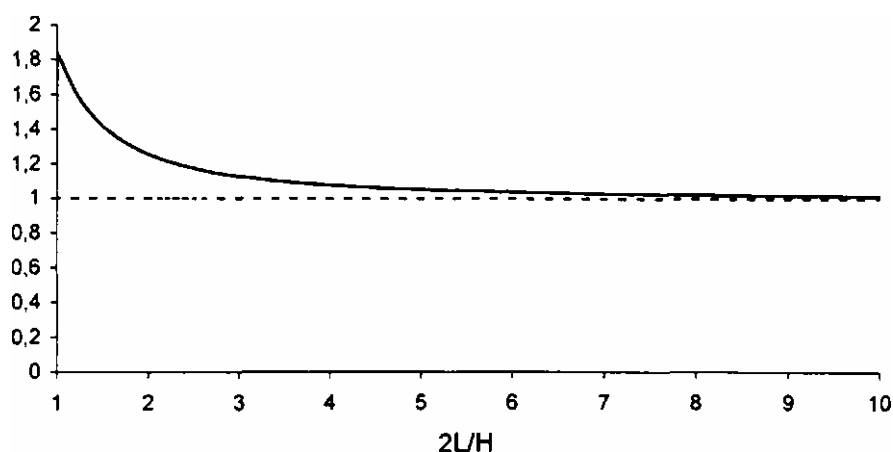
Σε περίπτωση που οι αλλαγές στο υλικό γίνονται ισοθερμικά (η θερμοκρασία κάθε στοιχείου παραμένει σταθερή) κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης τότε θεωρείται ότι υπάρχει ένα ελαστικό δυναμικό ίσιο με την ενέργεια παραμόρφωσης ανά μονάδα όγκου

Ο Seewald έκανε πειράματα και με ανισότροπα υλικά. Αντίστοιχα λοιπόν για τα ισότροπα υλικά, και για τα ανισότροπα προέκυψε ο πίνακας 2.2, με δοκιμές για διάφορους λόγους $2L/H$, (Gere και Timoshenko, 1997).

Πίνακας 2.2, συγκεντρωτικός πίνακας του Seewald για λόγους $2L/H$ (Gere και Timoshenko, 1997)

$2L/H$	βαναλ.
1.5	1.543
2	1.229
2.3	1.177
2.6	1.14
3	1.107
3.8	1.068
4	1.045
6	1.028
8	1.015
10	1.011

Από τον πίνακα 2.2, κατασκευάζεται το σχήμα 2.19, για διαφόρους λόγους $2L/H$, (Gere και Timoshenko, 1997).

Σχήμα 2.19, διάγραμμα του Seewald για λόγους $2L/H$ (Gere και Timoshenko, 1997)

Όπως παρατηρείται από το σχήμα 2.19 για μικρούς λόγους $2L/H$ ο λόγος β μειώνεται συνεχώς μέχρις ότου να ομαλοποιηθεί για τιμές του λόγου $2L/H \geq 6$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο**ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ**

Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται ιστορικά στοιχεία για το μάρμαρο και γίνεται μια σύντομη σύγκριση με το μάρμαρο του ελληνικού χώρου. Επίσης δίνονται στοιχεία για τις ιδιότητες του μαρμάρου καθώς και για το μάρμαρο Διονύσου.

3.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η λέξη «μάρμαρο» χρησιμοποιείται από τα αρχαία χρόνια μέχρι στις μέρες μας. Στην Ελληνική και την διεθνή βιβλιογραφία ο ορισμός του μαρμάρου μπορεί να δοθεί με τους εξής τρόπους, που ο ένας δεν αναιρεί τον άλλον, αλλά χρησιμοποιούνται σε διαφορετικούς τομείς, (Εξαδάκτυλος, 2006)

- **Μάρμαρο** : Κατά τους Ομηρικούς χρόνους η λέξη μάρμαρος σήμαινε πέτρα. Η αρχαία ελληνική λέξη μαρμέρω σημαίνει γυαλίζω την πέτρα.
- **Γεωλογικά**, μάρμαρο σημαίνει το προϊόν της μεταμορφώσεως των ασβεστολίθων, δηλαδή πέτρωμα που αποτελείται από κρυστάλλους ασβεστίτη ή δολομίτη ή μίγμα των δύο αυτών ορυκτών.
- **Τεχνικά**, εννοείται κάθε πέτρωμα που μπορεί να εξορυχθεί σε όγκους ικανών διαστάσεων και μπορεί να κοπεί, να λειανθεί και να στιλβωθεί. Π.χ. στην τέχνη των μαρμαρογλυπτών ή των οικοδόμων με τον όρο «μάρμαρο» ονομάζουν κάθε πέτρωμα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή έργων γλυπτικής, στην εσωτερική ή στην εξωτερική διακόσμηση κτιρίων. Μάρμαρα μπορούν να θεωρηθούν ο ασβεστόλιθος (που επιδεικνύει μικρή κρυσταλλική δομή), ο όνυχας, ο σερπεντινίτης και ο τραβερτίνης. Αν και ο ασβεστόλιθος έχει την ίδια χημική σύσταση με το μάρμαρο διαφέρει στο ότι τα σωματίδια ανθρακικού ασβεστίου ή ανθρακικού μαγνησίου είναι κοκκώδη και όχι κρυσταλλικά. Οι ασβεστόλιθοι που έχουν κάποιο ποσοστό κρυσταλλικής δομής μπορούν να πουληθούν ως μάρμαρα με πολύ καλή στίλβωση.

- **Εμπορικά**, σημαίνει κάθε πέτρωμα που μπορεί να πουληθεί σε όγκους και πλάκες (λ.χ. αυτός ο ορισμός συμπεριλαμβάνει τους γρανίτες, του σχιστόλιθους κ.ά.).
- **Κατά την Αμερικάνικη Επιτροπή Δοκιμών Υλικών** (American Society of Testing Materials) *ASTM* (C 119) ο ορισμός του μαρμάρου είναι: «ανθρακικό πέτρωμα που διακρίνεται από την κρυσταλλική δομή του εξαιτίας ανακρυστάλλωσης, συνήθως από θέρμανση ή πίεση κατά την διάρκεια μεταμόρφωσης, το οποίο συνίσταται κυρίως από ανθρακικά ορυκτά, ασβεστίτη ή δολομίτη, αποκλειστικά ή σε συνδυασμό. (Εξαδάκτυλος, 2006)

3.2. ΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΜΑΡΜΑΡΑ

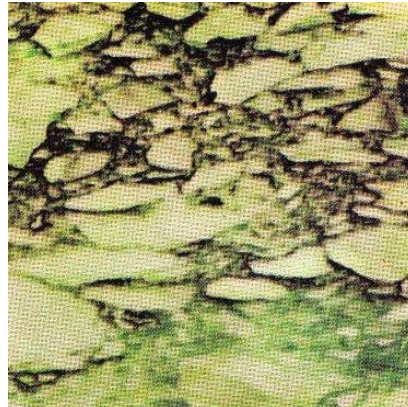
Τα ελληνικά μάρμαρα παρουσιάζουν πολλές ποικιλίες και χρώματα. Από αυτά έχουν φιλοτεχνηθεί αθάνατα καλλιτεχνήματα και έχουν κατασκευαστεί ή διακοσμηθεί μνημεία και οικοδομήματα σε διάφορες χώρες του κόσμου. Τα κυριότερα από τα ελληνικά μάρμαρα είναι :

- Τα μάρμαρα Αττικής με τα σπουδαιότερα αυτών το Πεντελικό μάρμαρο και το μάρμαρο Διονύσου, σχήμα 3.1. Η περιοχή της Πεντέλης είναι γνωστή από την αρχαιότητα για το λευκό μάρμαρο από το οποίο έχουν κατασκευαστεί πολλά μνημεία, όπως ο Παρθενώνας, το Ερεχθείο, ο ναός του Ολυπίου Διός, τα Προπύλαια, το Θησείο, η Βαλλιάνειος βιβλιοθήκη, η Ακαδημία Αθηνών κ.ά. Ακόμα, το λευκό μάρμαρο της Πεντέλης, είναι περιζήτητο στη γλυπτική για την λαμπρότητα που δίνει στα έργα τέχνης, πάλλευκο και διαφώτιστο καθώς είναι.
- Το περίφημο μάρμαρο της Πάρου, ο λυχνίτης ή λυχνεύς των αρχαίων, από το οποίο έχουν κατασκευαστεί ο Ερμής του Πραξιτέλους, ο ναός των Δελφών, το Πτι Παλαί στο Παρίσι.
- Τα λευκά μάρμαρα της Θάσου, το λευκό ή ανοιχτότεφρο μάρμαρο της Νάξου, τα πράσινα μάρμαρα της Σκύρου και της Τήνου, σχήμα 3.2 και 3.3, το περίφημο verde antico της αρχαιότητας, το κόκκινο μάρμαρο, rosso antico, στα Δημαριώτικα της Μάνης. Ακόμα ο κροκεάτης λίθος, πορφύρης, που υπάρχει κοντά στις Κροκεές της Λακωνίας.
- Ο πράσινος λατυποπαγής οφείτης της Λάρισας, σχήμα 3.4, από τον οποίο κατασκευάστηκαν οι μονόλιθοι της Αγίας Σοφίας στην Κωνσταντινούπολη και του αγίου Παύλου και Ιωάννη στη Ρώμη (Εγκυκλοπαίδεια Δομή) .

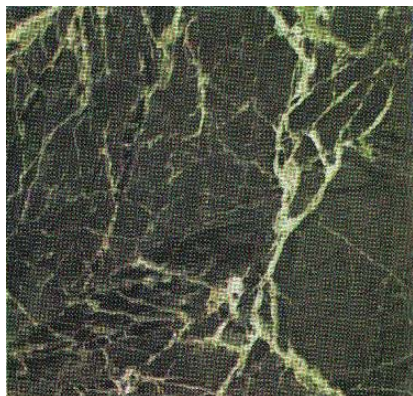
- Μάρμαρα ακόμα απαντώνται στον Μαραθώνα, σχήμα 3.5, στη Θήβα, στην Ερέτρια, σχήμα 3.6, στην Άνδρο, στη Χίο, στην Εύβοια, στην Ρόδο, σχήμα 3.7, και στην Διαλισκάρη, σχήμα 3.8. (Εγκυκλοπαίδεια Δομή)



Σχήμα 3.1, μάρμαρο Πεντέλης,
(Εγκυκλοπαίδεια Δομή)



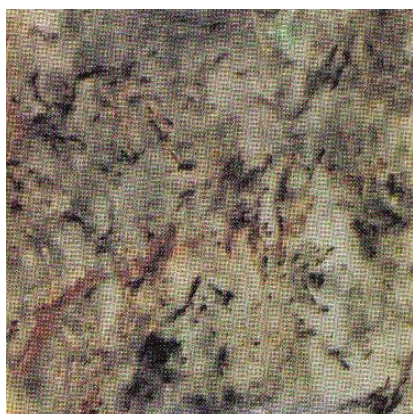
Σχήμα 3.2, μάρμαρο Σκύρου
(Εγκυκλοπαίδεια Δομή)



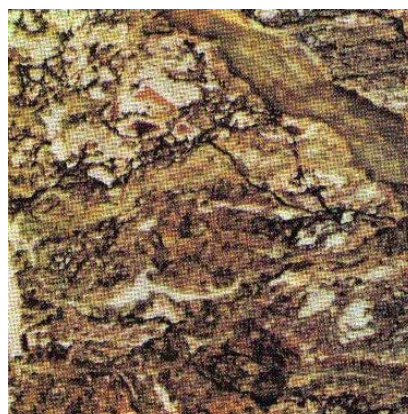
Σχήμα 3.3, μάρμαρο Τήνου, με φλεβίδια ασβεστίτη
λατυποπαγές (Εγκυκλοπαίδεια Δομή)



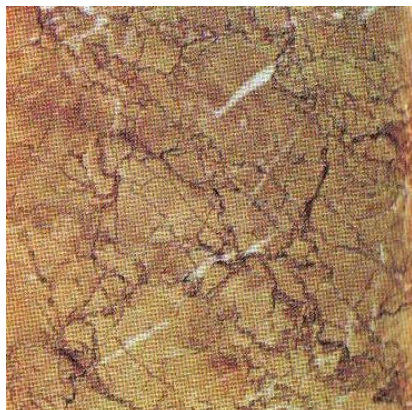
Σχήμα 3.4, μάρμαρο Λάρισας,
σερπεντίνης (Εγκυκλοπαίδεια Δομή)



Σχήμα 3.5, μάρμαρο Μαραθώνα
με κηλίδες και ταινίες (Εγκυκλοπαίδεια Δομή)



Σχήμα 3.6, μάρμαρο Ερέτριας
(Εγκυκλοπαίδεια Δομή)



Σχήμα 3.7, μάρμαρο Ρόδου
(Εγκυκλοπαίδεια Δομή)



Σχήμα 3.8, μάρμαρο
Διαλισκάρης (Εγκυκλοπαίδεια Δομή)

3.3. ΓΕΝΕΣΗ

Το μάρμαρο είναι ένας ασβεστόλιθος οργανικής προέλευσης με σακχαρώδεις κόκκους, ο οποίος προέκυψε ύστερα από έντονες διεργασίες μεταμόρφωσης, οι οποίες επέφεραν μια πλήρη ανακρυστάλλωση του ανθρακικού ασβεστίου το οποίο αποτελεί τη μάζα του πετρώματος. Σχηματίζονται από την μεταμόρφωση ασβεστολίθων ή δολομιτών. Πολλές ποικιλίες μαρμάρων προέρχονται από μια διπλή δράση μεταμόρφωσης : πρώτα καταταμαχίζονται από δυναμικές δράσεις και στη συνέχεια ανασυγκολλώνται με απόθεση ανθρακικού ασβεστίου μέσα στις ρωγμές.

Οι ασβεστόλιθοι προκύπτουν από διαγένεση ασβεστολιθικών ιζημάτων. Τα ασβεστολιθικά ιζήματα προκύπτουν από συσσώρευση σκελετικών υπολειμμάτων διαφόρων απολιθωμάτων, άλλων μη σκελετικών κόκκων, κλαστικό υλικό με ή χωρίς ασβεστολιθική ιλύ (μικριτικό υλικό). Σε πολλές περιπτώσεις όλο το πέτρωμα συνίσταται από μικριτικό υλικό με αποτέλεσμα να είναι πολύ σκληρό και να έχει κογχοειδή θραυσμό και πολύ μικρό πορώδες. Στην επιστήμη των πετρωμάτων οι μάζες των ανθρακικών αλάτων του ασβεστίου (ή διαφορετικά των ασβεστόλιθων), καθώς και του ασβεστίου – μαγνησίου (δολομιτών) μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: τα μη-κρυσταλλικά και τα κρυσταλλικά.

Το ασβεστολιθικό υλικό που αποτίθεται στις θαλάσσιες λεκάνες μεταφέρεται από την ξηρά. Το εδαφικό και ποτάμιο νερό περιέχει ως κύριο διαλυμένο συστατικό το ιόν $\text{HCO}_{(32)}^-$, το οποίο τελικά καταλήγει στη θάλασσα. Πολλοί θαλάσσιοι οργανισμοί όπως είναι τα κοράλλια, τα βρυόζωα, τα φύκι και τα διάφορα μαλάκια, παραλαμβάνουν ανθρακικό ασβέστιο από το θαλασσινό νερό το οποίο και χρησιμοποιούν. Μετά το θάνατό τους αποδίδουν το ανθρακικό ασβέστιο με τη μορφή των θρυμματισμένων κελυφών τους. Η καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου με τη μορφή

χημικού ιζήματος λαμβάνει χώρα σε βάθη που δεν υπερβαίνουν τα 5500 μέτρα, αφού σε μεγαλύτερα βάθη παραμένει διαλυμένο στο θαλασσινό νερό.

Αξιοσημείωτο είναι να αναφερθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατό να σχηματιστούν δομές όπως είναι οι ύφαλοι, με συμμετοχή ενός μόνο οργανισμού. Πολλές φορές συμβαίνει ένα ολόκληρο ορυχείο να εξορύσσει υλικό που περιλαμβάνει μόνο έναν οργανισμό. Τέτοια υλικά χαρακτηρίζονται από έλλειψη στρώσης και συνήθως περιέχουν πολύ μικρό ποσοστό μη ασβεστολιθικών προσμείξεων.

Στα μάρμαρα τα ίχνη της αρχικής στρώσης ασβεστολίθου είναι γενικά εμφανή, ενώ αντίθετα είναι σχεδόν αδύνατον να βρεθούν ίχνη απολιθωμάτων. Τα ορυκτά που συνυπάρχουν ως δευτερεύοντα είναι γενικά αυθιγενούς προέλευσης και δημιουργούνται από ρευστές προσμίξεις και ανακρυσταλλωμένες σε διάφορες ορυκτολογικές μορφές κατά την διεργασία της διαγένεσης. Τα συνηθέστερα δευτερεύοντα συστατικά είναι ο διοψίδιος, ο βιοτίτης, ο χλωρίτης, πλαγιόκλαστο, ο γρανίτης, ο χαλαζίας, ο αλβίτης (άστριος), ο μοσχοβίτης και ο γραφίτης. Συχνή είναι η παρουσία, έστω και σε μικρές ποσότητες, πυριτικών ορυκτών.

Τα μάρμαρα μπορούν να σχηματιστούν και στις τρεις ζώνες θερμοκρασιών και πίεσης. Ανάλογα με τα συμπτωματικά ορυκτά που περιέχουν, κατατάσσονται σε μάρμαρα υψηλών θερμοκρασιών (καταζώνης), ή μέσων θερμοκρασιών (μεσοζώνης), ή χαμηλών θερμοκρασιών (επιζώνης), (Χρηστίδης, 1998).

3.4. ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Τα χαρακτηριστικά των μαρμάρων (με την τεχνική έννοια του όρου) που δίνουν σε αυτά την ανάλογη εμπορική τους αξία είναι (Χρηστίδης, 1998) :

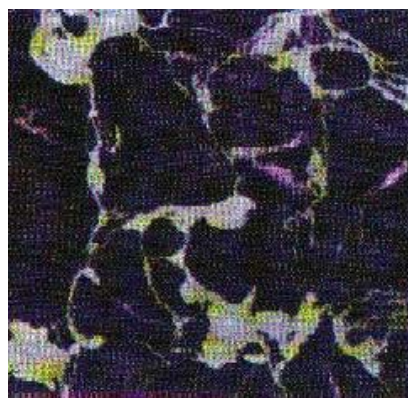
- Η χρωματική και αισθητική τους εμφάνιση
- Ο ιστός
- Η παρουσία ή όχι φλεβιδίων, και η διάταξη και το χρώμα αυτών
- Η παρουσία εγκλεισμάτων, καθώς και η ύπαρξη και η συχνότητα των λεγόμενων «λεκέδων»
- Οι φυσικές, χημικές, μηχανικές και τεχνικές τους ιδιότητες.

Το χρώμα του μαρμάρου είναι από τις πιο σημαντικές φυσικές ιδιότητες του. Προσδιορίζεται από την φύση των συστατικών του. Τα μάρμαρα που αποτελούνται

από καθαρό ασβεστίτη ή δολομίτη είναι λευκά επειδή τα ορυκτά αυτά έχουν λευκό χρώμα. Ένα σερπεντινικό μάρμαρο έχει πράσινο χρώμα εφόσον το ορυκτό του σερπεντίνη που κυριαρχεί στη σύσταση αυτού του τύπου μαρμάρου είναι πράσινου χρώματος. Οι διάφορες αποχρώσεις ενός λευκού αγνού μαρμάρου οφείλονται στις προσμίξεις διαφόρων ξένων ουσιών. Τέτοιες προσμίξεις μπορεί να κατανέμονται ομοιόμορφα δίδοντας έτσι ομοιόμορφο χρωματισμό, ή μπορεί να εμφανίζονται με ζωνώδη μορφή «μπαλωμάτων» αποδίδοντας στο μάρμαρο μη ομοιόμορφο χρωματισμό, σχήματα 3.9 – 3.14, (Εγκυκλοπαίδεια Δομή)



Σχήμα 3.9, κίτρινο τιγροειδές μάρμαρο
(Εγκυκλοπαίδεια Δομή)



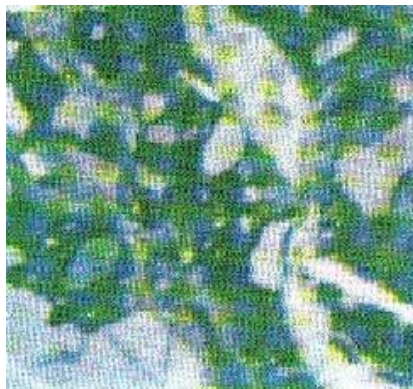
Σχήμα 3.10, μαυροκίτρινος σιπολίνης
(Εγκυκλοπαίδεια Δομή)



Σχήμα 3.11, αμυγδαλοειδής σιπολίνης
(Εγκυκλοπαίδεια Δομή)



Σχήμα 3.12, πράσινο μάρμαρο
(Εγκυκλοπαίδεια Δομή)



Σχήμα 3.13, λατνοπαγές μάρμαρο
(Εγκυκλοπαίδεια Δομή)



Σχήμα 3.14, κόκκινο μάρμαρο
(Εγκυκλοπαίδεια Δομή)

Η πολυτιμότερη ποικιλία είναι το μάρμαρο που χρησιμοποιείται στην γλυπτική. Είναι λεπτόκοκκο, ολόλευκο, διαφώτιστο, που λαξεύεται τέλεια, αλλά προσβάλλεται εύκολα από τους ατμοσφαιρικούς παράγοντες. Τα περιφημότερα μάρμαρα γλυπτικής προέρχονται από την Πεντέλη, την νήσο Πάρο και από ορισμένα λατομεία των Απουανών Άλπεων στην Ιταλία. Τα μάρμαρα αυτά ήταν αντικείμενα εκμετάλλευσης από την αρχαιότητα.

Το κοινό μάρμαρο είναι πιο χοντρόκοκκο από το μάρμαρο που προορίζεται για γλυπτική και τείνει ελαφρά προς το γκρι ή το κυανότεφρο, με έντονες φλέβες μερικές φορές. Το μάρμαρο είναι το πιο εύχρηστο ως δομικό υλικό. Όταν οι φλέβες είναι πολύ πυκνές, τότε δημιουργείται το λευκό φλεβώδες μάρμαρο. Από τις έγχρωμες ποικιλίες του συνηθέστερες είναι το κυανότεφρο και ο σιπολίνης. Τα μάρμαρα αυτά, ανάλογα με το είδος των σχεδίων που σχηματίζουν τα πιο βαθύχρωμα τμήματα πάνω στα ανοιχτόχρωμα, μπορούν να χαρακτηριστούν ως ταινιωτά, ζωώδη, φλεβώδη και ποικιλόχρωμα. Ο σιπολίνης περιέχει αξιόλογη ποσότητα τάλκη, τόσο που η λειασμένη επιφάνειά του να εμφανίζει μια έντονη πράσινη απόχρωση. (Εγκυκλοπαίδεια Δομή)

Τα μάρμαρα χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, μεταξύ των οποίων είναι τα δομικά υλικά, η παρασκευή αδρανών υλικών, χημικών προϊόντων (συνθετικού μαγνησίτη, αλκαλίων, ανθρακασβεστίου, λευκαντικών, φωσφορικού ασβεστίου, οργανικών χημικών ενώσεων), υάλου, ως προσθετικό στις ζωοτροφές κ.λ.π. Ιδιαίτερη σημασία έχει η παρασκευή κονιώδους ανθρακικού ασβεστίου, το οποίο χρησιμοποιείται ως πληρωτικό υλικό στη χαρτοβιομηχανία, τη βιομηχανία πλαστικών, ελαστικών και χρωμάτων και σε διάφορα είδη στόκων και σε οικοδομικά υλικά (Χρηστίδης, 1998).

Τέλος, οι χαρακτηριστικές επιφάνειες του μαρμάρου με την ονοματολογία που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία εξόρυξης των ογκομαρμάρων αλλά στα εργαστήρια που πραγματοποιήθηκαν κατά την διπλωματική εργασία είναι (Εξαδάκτυλος 2006) :

Α) Πρόσωπο ή τα «νερά» του μαρμάρου, ορίζεται η επιφάνεια που είναι παράλληλη προς την στρώση (παράλληλου ιστού) του μαρμάρου. Η αντίσταση στη διάτρηση, στη συρματοκοπή, στην κάμψη ή στην θλίψη είναι μικρότερη κατά την έννοια αυτού του επιπέδου.

Β) Μουρέλο ή παρειά, είναι η επιφάνεια που είναι παράλληλη προς την παράταξη του μαρμαροφόρου κοιτάσματος και κάθετη προς το πρόσωπο.

Γ) Κεφάλι, είναι η επιφάνεια που είναι κάθετη στις δύο προηγούμενες. Η αντίσταση στη διάτρηση, στη συρματοκοπή, στην κάμψη ή στην θλίψη είναι μεγαλύτερη κατά την έννοια αυτού του επιπέδου.

3.5. ΧΗΜΙΚΕΣ, ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ ΔΙΟΝΥΣΟΥ

Το μάρμαρο Διονύσου έχει σκληρότητα κατά Mohs 3 και αναβράζει έντονα σε ψυχρό υδροχλωρικό οξύ σε αντίθεση με τους δολομίτες και το οποίο αποτελεί τρόπος διάκρισης των ασβεστολίθων από τους δολομίτες.

Το μάρμαρο του Διονύσου έχει πυκνότητα 2717 kg/m^3 , φαινόμενη πυκνότητα 2717 kg/m^3 και συντελεστή απορρόφησης κατά βάρος περίπου 0,11%. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι περίπου $9 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$ μεταξύ $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 $0,43 \times 10^{-3} \text{ m}$, οι κρύσταλλοι του έχουν πολυγωνικό σχήμα με διαστάσεις μεταξύ $900 \text{ }\mu\text{m} \times 650 \text{ }\mu\text{m}$ και $950 \text{ }\mu\text{m} \times 874 \text{ }\mu\text{m}$ και είναι σχεδόν ομοιόμορφοι όσον αφορά τις διαστάσεις του, (Εξαδάκτυλος, 2006).

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.

Σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου, τα δεδομένα που αναφέρονται στην ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία, ποικίλουν εντός ευρέων ορίων. Οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής κυμαίνονται μεταξύ 2,4 MPa και 9,4 MPa, ενώ για το μέτρο ελαστικότητας μεταξύ 23 GPa και 90 GPa. Η διασπορά αυτή, οφείλεται κυρίως στις διαφορετικές συνθήκες υπό τις οποίες εκτελούνται τα πειράματα, αλλά και στην ανισοτροπία η οποία χαρακτηρίζει τη μηχανική συμπεριφορά του Διονυσιακού μαρμάρου. Υπάρχουν τρεις διευθύνσεις ανισοτροπίας, μία κάθετη στις υλικές 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)

Συνοπτικά οι φυσικομηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου είναι :

- φαινόμενο ειδικό βάρος : $2.67 \times 10^5 \text{ N/m}^3$
- συντελεστής υδατοαπορροφητικότητας : 0.11 Wt%
- αντοχή σε θλίψη : 90 MPa
- αντοχή σε άμεσο εφελκυσμό : 9 MPa (Εξαδάκτυλος, 2006)

Στα μάρμαρα του Διονύσου, μέχρι τα 2 cm πάχος υπάρχει περατότητα του φωτός. Αυτό συμβαίνει γιατί το μάρμαρο Διονύσου έχει ποικίλη κοκκομετρία. Υπάρχουν περιοχές όπου το μάρμαρο έχει πολύ μικρούς κρυστάλλους, άλλες που έχει ενδιάμεσους κρυστάλλους και άλλες που έχει πολύ μεγάλους κρυστάλλους. Λόγω του ότι το μάρμαρο αυτό είναι πολυτεκτονισμένο, αλλά και ταυτόχρονα καλά μεταμορφωμένο, οι μηχανικές του ιδιότητες είναι πάρα πολύ καλές, πολύ καλύτερες από τα μάρμαρα που είναι παγκοσμίως γνωστά, (Εξαδάκτυλος, 2006).

Τέλος αξίζει να γίνει αναφορά στα χαρακτηριστικά των μαρμάρων ως προς τα προβλήματα που εμφανίζονται κατά την εκμετάλλευσή τους, χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστούν ποια κοιτάσματα μαρμάρων είναι οικονομικώς εκμεταλλεύσιμα. Αναλυτικότερα μπορεί να ξεχωρίσει κανείς τις περιπτώσεις (Εξαδάκτυλος, 2006) :

- Υπάρχει συγκεκριμένο πάχος των μαρμάρων που καθιστά συμφέρουσα οικονομικά την εκμετάλλευσή τους γιατί καθορίζει το μέγεθος των τεμαχίων που παράγονται κατά την εξόρυξη.
- Από την διάβρωση των μαρμάρων από προσμείξεις εξαιτίας στρωμάτων ιλύος, αργίλου και πυριτόλιθων που επηρεάζουν τη σκληρότητα, τη χημική σύσταση και το χρώμα. Συνήθως εξωτερικά εμφανίζονται οι ασβεστόλιθοι με ερυθροκάστανο χρώμα (Terra Rosa).
- Σε περιπτώσεις που τα μάρμαρα προορίζονται για δομικό υλικό, η δημιουργία καρστικών κοιλοτήτων, έγκοιλα, από την διάλυση των ασβεστόλιθων όταν τα τελευταία πληρώνονται με αργιλικό υλικό ή θειικά άλατα προκαλούν ανεπιθύμητα αποτελέσματα.
- Εμφανίσεις στρωμάτων λιπιολίθων, τα οποία αναγνωρίζονται πολύ δύσκολα ανάμεσα στα μάρμαρα, προκαλούν ζημιές σε κυκλώματα θραύσης κατά την περαιτέρω επεξεργασία τους εξαιτίας της μεγάλης σκληρότητάς τους (Mohs 6,5).

- Τα ρήγματα αποτελούν σοβαρό πρόβλημα σε πιθανά προς εξόρυξη κοιτάσματα μαρμάρων καθώς προκαλείται ασυνέχεια στα στρώματα και καθιστά επιτρεπτή την κυκλοφορία διαλυμάτων που τα εξαλλοιώνουν.
- Τέλος η δολομιτίωση και πιθανή υδροθερμική εξαλλοίωση αποτελούν τις κυριότερες καταστροφές των μαρμάρων.

3.6. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

Η ορυκτολογική σύνθεση του μαρμάρου Διονύσου είναι :

- ασβεστίτης 98.0%
- χαλαζίας 0.5%
- μοσχοβίτης 0.5%
- σερικήτης 0.5%
- χλωρίτης 0.5%

Ο ασβεστίτης είναι παρών στο μεγαλύτερο ποσοστό και εμφανίζει έντονο πλεοχρωισμό. Δολομίτης παρουσιάζει μια γενική θολότητα και μόνο τοπικά είναι ισχυρά θολός. Οι κρύσταλλοι του χαλαζία είναι υπογωνιώδεις. Είναι μεγαλοκρυσταλλικός με μέγεθος κρυστάλλων 1 – 5 mm, ενώ κατά θέσεις εντοπίζονται πορφυροβλάστες μεγέθους 10 mm και περισσότερο, (Χρηστίδης, 1998).

Ο ιστός των μαρμάρων ποικίλει. Συνήθως είναι κοκκοβλαστικός, ποικιλοβλαστικός ή πορφυλοβλαστικός με πορφυροβλάστες γρανίτη, ακτινολίθου και βολλαστονίτη. Συχνά παρουσιάζουν σχιστότητα. Ταινιωτή υφή είναι συνήθης και οφείλεται στην παρουσία των παραπάνω συμπτωματικών ορυκτών. Το χρώμα των μαρμάρων ποικίλει, ανάλογα με τα συνοδευτικά ορυκτά. Ο ιστός του μαρμάρου του Διονύσου είναι γλανοβλαστικός – πολυγωνικός και η υφή του ελαφρά προσανατολισμένη (Χρηστίδης, 1998).

Από πετρογραφικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε λεπτά τμήματα μαρμάρου με μικροσκόπιο, προκύπτει μια εικόνα της ορυκτολογικής σύστασης του πετρώματος. Το ορυκτό περιεχόμενο των μαρμάρινων δειγμάτων καθορίστηκε σε αυτά τα λεπτά τμήματα με μέτρηση από σημείο. Τα μεγέθη των ορυκτών μετριοούνται στα λεπτά τμήματα χρησιμοποιώντας μικρόμετρο (Yavuz, 1998).

Τα permo-Carboniferous μαύρα μάρμαρα έχουν μια γρανοπλαστική σύσταση και περιέχουν ασβεστίτη ως κύριο ορυκτό με δευτερεύοντα ποσά δολομίτη και μοσχοβίτη, (σχήμα 3.15Α).

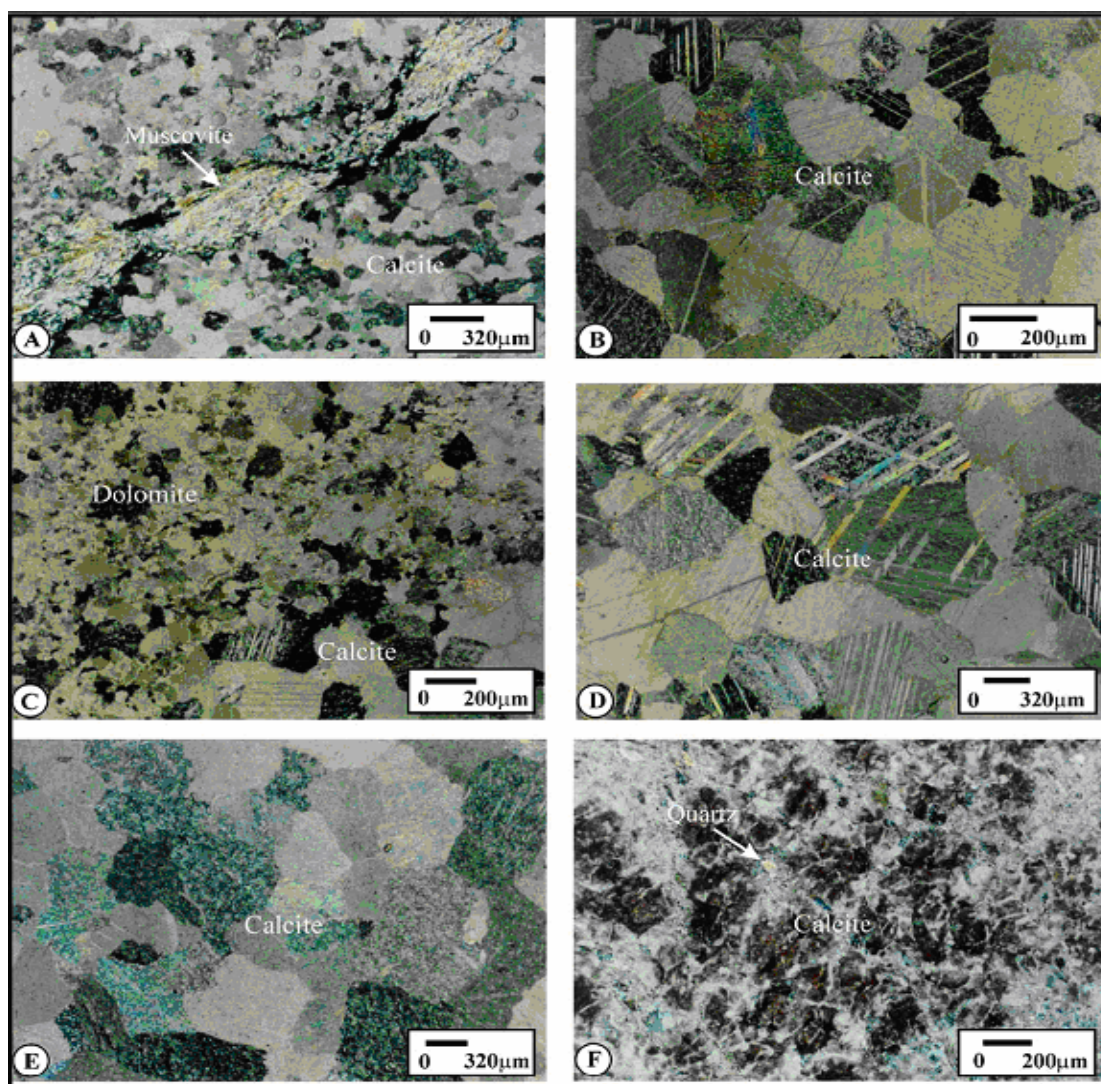
Οι κρύσταλλοι του μοσχοβίτη παρατίθενται παράλληλα στα λεπτά τμήματα μαρμάρου. Το λευκό μάρμαρο Milas του τριασίου και τα φλεβώδη μάρμαρα Milas αποτελούνται κυρίως από ασβεστίτη με μια γρανοπλαστική σύσταση (σχήμα 3.15B) (Yavuz, 1998).

Το πλούσιο μαργαριτάρι Milas δολομίτη, η Aubergine και τα ιώδη μάρμαρα έχουν ετεροβλαστικές συστάσεις με ποικίλα μεγέθη κρυστάλλου (σχήμα 3.15C). Τα δολομιτικά μάρμαρα έχουν λεπτούς κρυστάλλους δολομίτη και χονδρούς κρυστάλλους ασβεστίτη (σχήμα 3.15C).

Τα άσπρα έως ελαφρά κιτρινωπά μάρμαρα Milas Lemony αποτελούνται κυρίως από κρυστάλλους ασβεστίτη με γρανοπλαστική σύσταση (σχήμα 3.15D). Αυτός ο μαρμαρίνος τύπος διαφέρει από τα άλλα μάρμαρα του τριασίου λόγω των μεγαλύτερων κρυστάλλων που τον αποτελούν. Οι κρύσταλλοι ασβεστίτη και δολομίτη, στα δολομιτικά μάρμαρα διακρίνονται μεταξύ τους με το μαρκάρισμα των λεπτών τμημάτων, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο χρωματισμού χρωμικών αλάτων. Η ασημένια δοκιμή χρωμικών αλάτων μάρκαρε τους κρυστάλλους ασβεστίτη που αποτελούν το μάρμαρο αλλά ο δολομίτης παρέμεινε αμετάβλητος.

Τα κρητιδικά μάρμαρα αποτελούνται πλήρως από κρυστάλλους ασβεστίτη με μια γρανοπλαστική σύσταση (σχήμα 3.15E).

Τα αιγαία μάρμαρα παλαιωμένου του Μπορντό είναι γρανοπλαστικά στη σύσταση. Περιέχουν ασβεστίτη ως κύριο ορυκτό με μικρά ποσά χαλαζία, αμφίβολου, μοσχοβίτη και επίδοτου ως δευτερεύοντα ορυκτά, (σχήμα 3.15F), (Yavuz, 1998).



Σχήμα 3.15, ορυκτολογική μελέτη μαρμάρου. (Yavuz, 1998)

3.7. ΜΑΡΜΑΡΑ ΔΙΟΝΥΣΟΥ

Στην περίπτωση του Διονύσου, ένα ποτάμι μαζί με φερτές ύλες οι οποίες στη συνέχεια συντρίβονται, συνθλίβονται και κατακάθονται στην κοίτη του, δημιουργήσε τους πρωτογενείς ασβεστόλιθους οι οποίοι μετά από ανακρυστάλλωση και μεταμόρφωση, δημιούργησαν το κοίτασμα Μαρμάρων του Διονύσου. Το κοίτασμα αυτό είναι σαν σπονδυλική στήλη και ξεκινά από την κορυφή της Πεντέλης και τελειώνει στην λεκάνη του Μαραθώνα.

Παλαιότερα, για 2500 χρόνια, οι λατόμοι δούλευαν με τον παλιό παραδοσιακό τρόπο, ο οποίος περιλάμβανε μια σειρά από διαδικασίες όπου αρχικά είχαμε άνοιγμα του κοιτάσματος με παραμίνα, εισχώρηση ξύλου σε αυτό, πότισμα νερού με αποτέλεσμα τη διόγκωση του μαρμάρου και τελικά την θραύση του.

Πολύ αργότερα κάνουν την είσοδό τους τα εκρηκτικά, τα οποία μπορεί να εξορίσουν μεγάλους ογκόλιθους όμως, μειονεκτούσαν στο ότι καταπονούσαν άσχημα το πέτρωμα αφήνοντας όψη σεληνιακού τοπίου καθώς επίσης καταστρέφουν το περιβάλλον γι' αυτό και θεωρήθηκαν απαράδεκτα προς χρήση, (Εξαδάκτυλος, 2006).

Στη γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής, συμμετέχουν μεταμορφωμένοι σχηματισμοί του Προ-Πέρμιου, με ολικό στρωματογραφικό πάχος της σειράς, της τάξης των 6000 m. Διακρίνονται τα εξής μέλη :

- μάρμαρα,
- μετα – κροκαλοπαγές από μάρμαρα
- μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι και γνεύσιοι, που εμφανίζονται σαν υποκείμενος και υπερκείμενος σχηματισμός αλλά και σε ενστρώσεις του μαρμάρου
- αμφιβολίτες ζωνώδεις, που εμφανίζονται σαν παρεμβολές στα μάρμαρα και σχιστόλιθους
- μεταμορφωμένα υπερβασικά και γαββρικά πετρώματα.

Στα στρωματογραφικά κατώτερα μέρη της μεταμορφωμένης σειράς, τα περισσότερα μάρμαρα είναι χονδροκρυσταλλικά και λευκά. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ορατή μια παχιά στρώση, η οποία συχνά χαρακτηρίζεται από λεπτές ζώνες ταινιών αμφιβολιών και βιοτιτικών – κεροστιλβικών γνευσίων. Ορυκτά που εμφανίζονται σε μάρμαρα είναι ο φλογοπίτης, σκαπόλιθος, γροσσουλαρίτης, διοψίδιος, βεζουβιανίτης και τιτανίτης. Το επίδοτο ουσιαστικά απουσιάζει από τους βαθύτερους ορίζοντες μαρμάρου. Στα στρωματογραφικά υψηλότερα μέρη της μεταμορφωμένης σειράς, τα μάρμαρα είναι πιο λεπτόκκοκα, (Εξαδάκτυλος, 2006).

Όλα τα μάρμαρα παρουσιάζουν απότομες πλευρικές αλλαγές στο πάχος και στη σύσταση και τα περισσότερα από αυτά, πλήν αυτών που βρίσκονται στο μαγματίτη, περιέχουν πολυάριθμες εμφανίσεις σμύριδος ή διασπόρου, οι οποίες συχνά φαίνεται να συγκεντρώνονται σε οριζόντια στρώματα.

Η τεκτονική της περιοχής, οι κλίσεις και το μέγεθος των όγκων προς εξόρυξη, δημιουργούν ευνοϊκές (καταθέσεις) προϋποθέσεις για την εξόρυξη ογκομαρμάρων του τύπου αυτού.

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα της περιοχής συνίστανται αποκλειστικά από Μεσοζωικής ηλικίας κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα, ήτοι από μάρμαρα και μαρμαρυγικούς σχιστόλιθους.

Το ανώτερο μάρμαρο, υπόκεινται οι σχιστόλιθοι Καισαριανής, μέγιστου πάχους μέχρι 400 m, συνίσταται από λεπτοστρωματώδη έως μεσοστρωματώδη

μάρμαρα χρώματος τεφρόλευκου έως κυανόλευκου που είναι από λεπτοκρυσταλλικά (με κρυστάλλια του ασβεστίτη μέχρι 0,5 mm) έως μεσοκρυσταλλικά (με κρυστάλλια του ασβεστίτη από 0,6-2 mm) στη δομή τους.

Η κυριότερή τους ανάπτυξη είναι στο Β. τμήμα (περιοχή Κοκκιναρά) της υπόψη περιοχής. Τα μάρμαρα αυτά εναλλάσσονται τοπικά σε συμφωνία με διάφορες ενστρώσεις σχιστολίθων κυμαινόμενου πάχους. Οι λεπτότερες από αυτές πιθανόν να αποτελούν φακούς ανομοιόμορφης ανάπτυξης.

Το κατώτερο μάρμαρο, που αποτέλεσε την κυριότερη πηγή του Πεντελικού μαρμάρου, κατά τον Lepsius έχει πάχος 500 m, κατά δε νεότερες απόψεις φθάνει το μέγιστο πάχος των 650 m τούτο συνίσταται από κυανοτεφρόλευκα μάρμαρα, που κατά περιοχές γίνονται χιονόλευκα με άριστα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Σπανιότερα εμφανίζονται με ελαφρά κιτρινωπή χροιά, ενώ καταθέσεις περιέχουν φυλλάρια χλωρίτη και αργυρόχρου μοσχοβίτη, οι οποίοι σχηματίζουν στρωματίδια ή φλεβίδια φακοειδείς φωλιές ή δικτυοειδείς συγκεντρώσεις όπου το μάρμαρο λαμβάνει πράσινο έως τεφροπράσινο χρώμα, (Εξαδάκτυλος, 2006).

- **Εξόρυξη:** Στο Διόνυσο πλέον η παλιά εξόρυξη ανοιχτών βαθμίδων έχει περάσει σε υπόγεια εκμετάλλευση, η οποία στοιχίζει τρεις φορές περισσότερο από την επιφανειακή. Όσον αφορά τις υπαίθριες εξορύξεις, οι μελέτες που αναφέρονται στις οικολογικές επιπτώσεις μπορούν ανά πάσα στιγμή να τις διακόψουν χωρίς καμία εγγύηση ότι θα επιτραπεί η επανεκκίνησή τους. Όταν δεν είναι δυνατή η εκμετάλλευση του κοιτάσματος, τότε κλείνει η πόρτα του υπογείου και ακολουθεί αποκατάσταση του περιβάλλοντος.

Από τους όγκους που βγαίνουν, το πολύτιμο μάρμαρο ουσιαστικά στο Διόνυσο είναι στην υπαίθρια εκμετάλλευση το 5% του συνολικού όγκου που εκμεταλλεύονται και στην υπόγεια το 12%. Το 95% προορίζεται για τις υπόλοιπες λειτουργίες και χρήσεις του εργοστασίου, (Εξαδάκτυλος, 2006).

- **Επεξεργασία:** Υπάρχουν κομμάτια μαρμάρου με μορφή μακρόστενων μπαστούνιων τα οποία στη συνέχεια κόβονται σε διάφορες διαστάσεις ανάλογα με τους κομμούς (οι ασυνέχειες στη γλώσσα των λατόμων). Το μάρμαρο κόβεται σε πλάκες, η διαδικασία αυτή απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε οι πλάκες να βγαίνουν ακέραιες και να μην σπάζουν, η αξία της οποίας αυξάνει αναλογικά με το μέγεθος της. Οι ακανόνιστες πλάκες αναγκαστικά θα κοπούν σε μικρότερα κομμάτια (30x30 ή 30x60), μικρότερης αξίας, (Εξαδάκτυλος, 2006).

Στη συνέχεια τα κομμάτια πηγαίνουν στο σχιστήριο. Η κοπή ενός κομματιού (μάρμαρο) υπολογίζεται περίπου στις 6 με 8 ώρες σε αντίθεση με τον γρανίτη που χρειάζεται περί τις 24 ώρες. Μετά την κοπή οι πλάκες μεταφέρονται στο μηχάνημα γυαλίσματος και από εκεί στο εργοστάσιο filler που αποτελεί ένα ξηραντήριο όπου γίνεται η ξήρανση του υλικού μιας τάξης μεγέθους 0,1-0,2% εμπεριεχόμενης υγρασίας.

Στη συνέχεια τα υπολείμματα του εκμεταλλεύσιμου μαρμάρου, πηγαίνουν στους σφαιρόμυλους για πρωτογεννή θραύση και μετά μεταφέρεται στους αεροδιαχωριστές που διαχωρίζουν τα διαφορετικά κλάσματα του μαρμάρου.

Έπειτα πηγαίνει στο σπαστήριο. Επιλέχθηκε σπαστήρας γιατί ελαχιστοποιεί τη δουλειά που κάνουν τα υδραυλικά σφυριά μέσα στο λατομείο. Ακολουθεί για την δευτερογενή θραύση ένας περιστροφικός σπαστήρας που βρίσκεται πίσω από κόσκινο. Από τον δεύτερο σπαστήρα βγαίνει το υλικό που έχει διάμετρο περίπου σαν χαλίκι. Ακολουθεί ένα κόσκινο απ' όπου φεύγει όλο το ψιλό υλικό, και πέφτει σε ένα σιλό το οποίο με τις μεταφορικές ταινίες τροφοδοτεί τέσσερα τρίβελα.

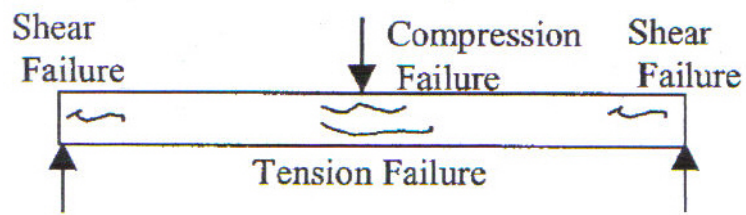
Το υλικό λειοτριβείται ανάμεσα στα σφυριά και στις σχάρες που υπάρχουν. Έτσι βγαίνει η άμμος η οποία χρησιμοποιείται στα τσιμέντα ή η λεγόμενη μαρμαρόσκονη, (Εξαδάκτυλος, 2006).

3.8. ΜΟΡΦΕΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΜΑΡΜΑΡΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΜΨΗ

Τρεις τύποι θραύσης μπορούν να παρουσιασθούν σε μια μαρμάρινη δοκό, όπως είναι η δοκός της συγκεκριμένης δοκιμής, σχήμα 3.16. Κατ' αρχάς, μια εφελκυστική μορφή θραύσης (Tension Failure) μπορεί να εμφανιστεί στο κάτω άκρο της δοκού, όπου η καμπτική τάση έχει την μέγιστη θετική τιμή της.

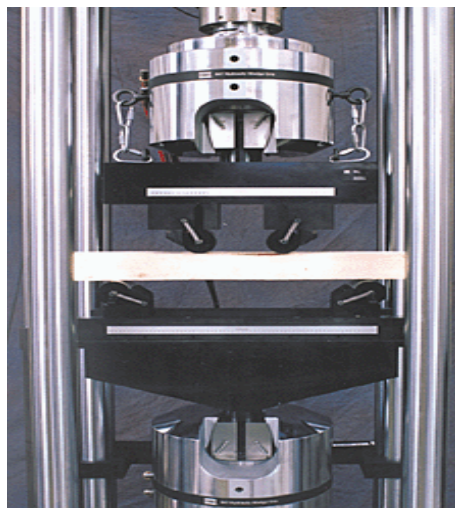
Μια δεύτερη μορφή θραύσης μπορεί να εμφανιστεί στο πάνω μέρος της δοκού, που προέρχεται από θλιπτική τάση (Compression Failure) αφού στο άκρο αυτό εμφανίζεται και η μέγιστη αρνητική τιμή της καμπτικής τάσης.

Η τρίτη μορφή θραύσης που μπορεί να εμφανιστεί, είναι μια διατμητική θραύση (Shear Failure), που εμφανίζεται στον ουδέτερο άξονα της δοκού, κοντά στα σημεία στήριξης. Στα σημεία αυτά, η διατμητική τάση $\tau_{\max}$ παίρνει την μέγιστη τιμή της, (Προβιδάκης, 1998).



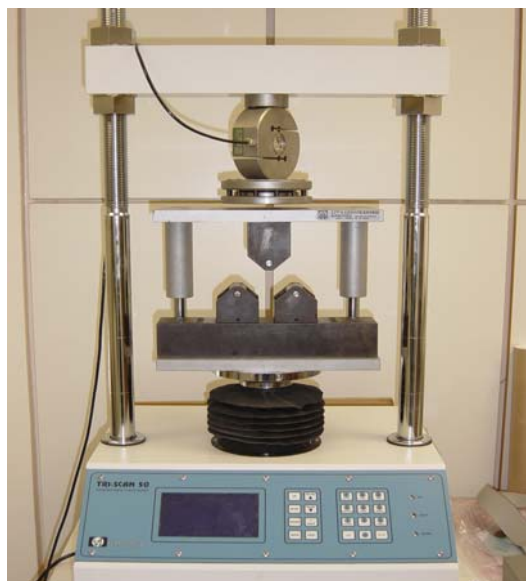
σχήμα 3.16, μορφές θραύσης δοκιμίων(Προβιδάκης, 1998)

Οι πιο κοινές μηχανές κάμψης φαίνονται στα σχήματα 3.17 έως 3.19.



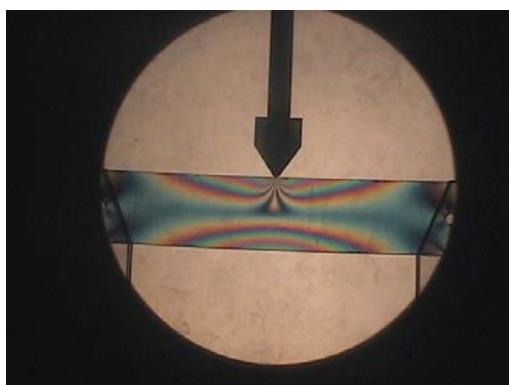
Σχήμα 3.17 – 3.19, κοινές μηχανές κάμψης

Στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε η 50 kN TRI-SCAN, σχήματα 3.20 – 3.21.

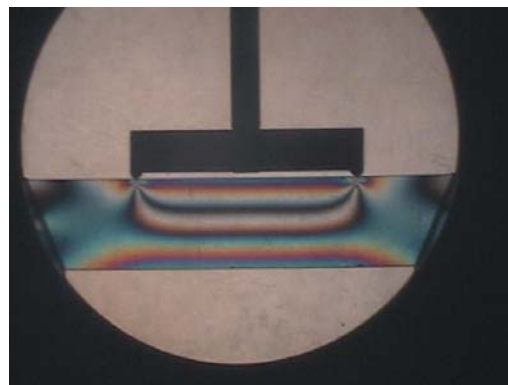


Σχήμα 3.20 και 3.21, μηχανή κάμψης TRI-SCAN

Κατά την διάρκεια του πειράματος, με κατάλληλο μικροσκόπιο θα ήταν δυνατό να παρατηρηθούν οι δυναμικές γραμμές που εμφανίζονται στο δοκίμιο, σχήματα 3.22 έως 3.25.



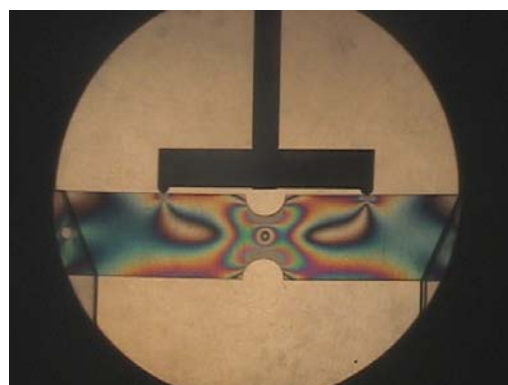
Σχήμα 3.22, δυναμικές γραμμές σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων (Gere, 1996)



Σχήμα 3.23, δυναμικές γραμμές σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων (Gere, 1996)



Σχήμα 3.24, δυναμικές γραμμές σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων με κενό (Gere, 1996)



Σχήμα 3.25, δυναμικές γραμμές σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων με εγκοπές (Gere, 1996)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο**ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ
ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ**

Στο κεφάλαιο περιγράφεται η προετοιμασία και η εκτέλεση των πειραμάτων κάμψης τριών σημείων. Περιγράφεται η καμπτική φόρτιση πρισματικών δοκιμίων σε συνάρτηση με την δύναμη που προκαλεί την κάμψη, τις διαστάσεις της ράβδου και τέλος με την απόσταση των σημείων στήριξης της ράβδου. Κατασκευάζονται διαγράμματα που συνδέουν το φορτίο με την μετατόπιση και εξάγονται συμπεράσματα για την ποιότητα του μαρμάρου.

4.1. ΓΕΝΙΚΑ

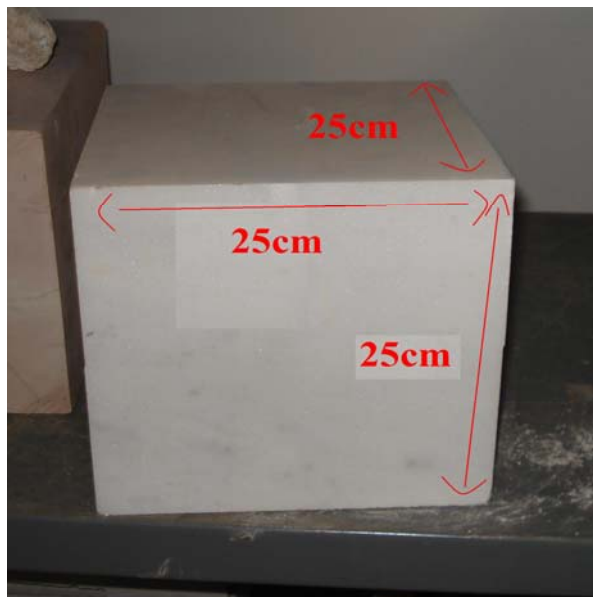
Πριν την έναρξη των πειραματικών δοκιμών υπήρξε προγραμματισμός των πειραμάτων και της διαμόρφωσης των δοκιμίων. Οι κύβοι μαρμάρου του Διονύσου που διέθετε το εργαστήριο ήταν συγκεκριμένοι και δύσκολα θα μπορούσε να προμηθευτεί νέους. Οπότε θα έπρεπε να υπάρξει πολύ καλός προγραμματισμός για την επίτευξη σωστών πειραμάτων σε όλη την πορεία τους.

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική μελέτη της δοκιμής, προέρχονταν από πρόσφατα εξορυσσόμενους όγκους μαρμάρου Διονύσου του ίδιου νταμαριού και της ίδιας βαθμίδας. Εξαιτίας αυτού, τα τελικά αποτελέσματα της επεξεργασίας, που ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο, δεν θα πρέπει να έχουν διαφορά περισσότερη του 5%, ενώ τα αποτελέσματα δεν θα πρέπει να διαφέρουν περισσότερο από 12% από ανάλογα πειράματα σε άλλο νταμάρι, (Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete, ASTM).

Για να διασφαλιστούν τα παραπάνω, κατασκευάζονταν τα δοκίμια, γίνονταν οι δοκιμές κάμψης, ολοκληρώνονταν η επεξεργασία των αποτελεσμάτων και μετά συνεχίζονταν τα πειράματα με άλλη ομάδα δοκιμίων. Αν και τα πειράματα διεξάγονταν με πιο αργούς ρυθμούς, τα αποτελέσματα μπορούσαν να ελεγχθούν.

4.2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

Οι κύβοι μαρμάρου Διονύσου, σχήμα 4.1, που υπήρχαν στο εργαστήριο ήταν διαστάσεων 25x25x25 και θα έπρεπε να κοπούν σε ράβδους.



Σχήμα 4.1, μάρμαρο Διονύσου

Η κοπή σε ράβδους έγινε από ειδικό δίσκο μαρμαροκοπής όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2 και 4.3.

Στο σημείο αυτό επαναλαμβάνεται η ορολογία του κεφάλαιου 3 που θα χρησιμοποιηθεί στον χαρακτηρισμό των δειγμάτων. Οι χαρακτηριστικές επιφάνειες του μαρμάρου είναι :

- Πρόσωπο ή «νερά» του μαρμάρου, ορίζεται η επιφάνεια που είναι παράλληλη προς την στρώση του μαρμάρου. Η αντίσταση στη διάτρηση, στη συρματοκοπή, στην κάμψη ή στην θλίψη είναι μικρότερη κατά την έννοια αυτού του επιπέδου.
- Μουρέλο ή παρειά, είναι η επιφάνεια που είναι παράλληλη προς την παράταξη του μαρμαροφόρου κοιτάσματος και κάθετη προς το πρόσωπο.
- Κεφάλι, είναι η επιφάνεια που είναι κάθετη στις δύο προηγούμενες. Η αντίσταση στη διάτρηση, στη συρματοκοπή, στην κάμψη ή στην θλίψη είναι μεγαλύτερη κατά την έννοια αυτού του επιπέδου.



Σχήμα 4.2 και 4.3, δίσκος μαρμαροκοπής εργαστηρίου

Στόχος των πειραμάτων ήταν να κατασκευαστούν δοκίμια έτσι ώστε :

- Να συγκριθεί η αντοχή σε κάμψη τριών σημείων σε δοκίμια μαρμάρου, διατηρώντας τον ίδιο προσανατολισμό και μεταβάλλοντας το μήκος l του δοκιμίου,
- Να συγκριθεί η αντοχή, διατηρώντας τον ίδιο προσανατολισμό και μεταβάλλοντας το ύψος h του δοκιμίου,
- Να συγκριθεί η αντοχή, μεταβάλλοντας τον προσανατολισμό του δοκιμίου από το πρόσωπο στο μωρέλο και διατηρώντας τις διαστάσεις ίδιες.

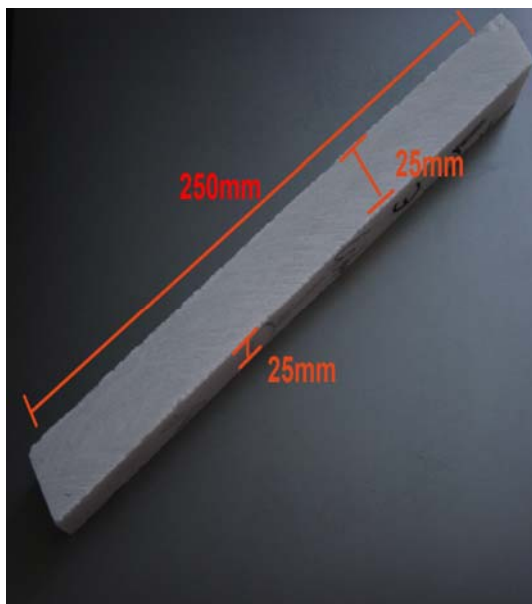
4.3. ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

Οι κύβοι μαρμάρου Διονύσου που υπήρχαν στο εργαστήριο είχαν από το νταμάρι τις αρχικές ονομασίες, Δ_{10} , Δ_{20} , Δ_{12} , Δ_I και Δ_K .

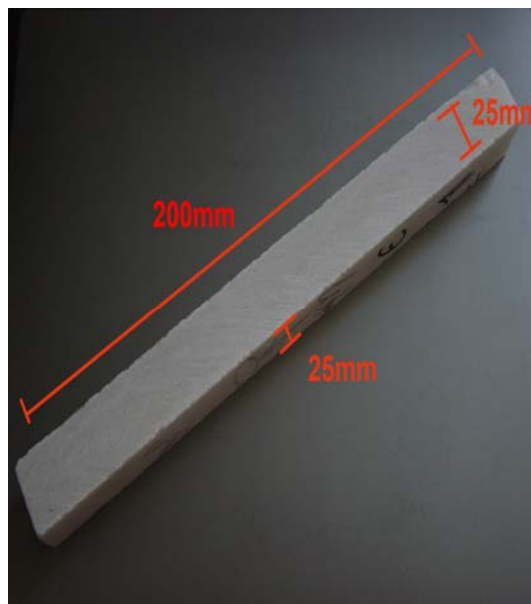
Οι διαστάσεις των δοκιμίων που επιλέχτηκαν ήταν τέτοιες έτσι ώστε να μπορούν να κοπούν τα δοκίμια με σχετική ευκολία αλλά και να είναι δυνατή η εφαρμογή τους στο μηχάνημα της κάμψης. Το μηχάνημα αυτό διαθέτει μήκος ανοίγματος κεφαλών ls 77, 133, 187 και 235mm.

Τα δοκίμια κόπηκαν κατά τέτοιο μήκος ώστε να τοποθετούνται στη μηχανή κάμψης χωρίς να προεξέχουν πολύ από τις κεφαλές. Το πλάτος b παρέμεινε σταθερό σε όλα τα δοκίμια στα 25mm. Το ύψος h των δοκιμίων ήταν στα 12,5, 25 και 50mm για τις ανάγκες των πειραμάτων. Οι διαστάσεις των δοκιμίων μετριούνταν με

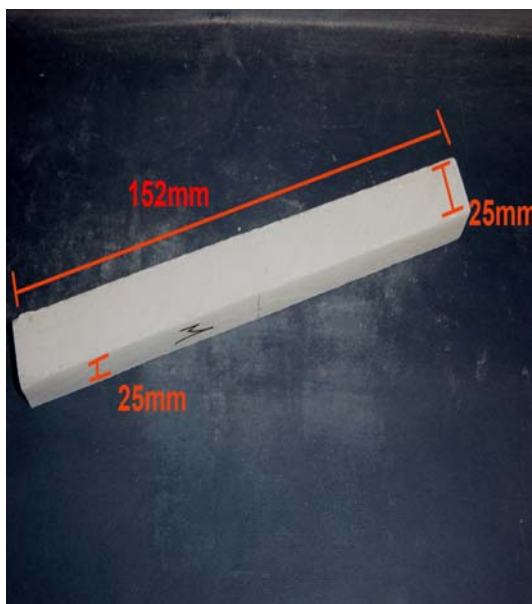
μηκυνσιόμετρο σε τρία σημεία και καταγράφονταν ο μέσος όρος ως τελική μέτρηση. Χαρακτηριστικά δοκίμια παρουσιάζονται στα σχήματα 4.4 έως 4.9 με τις διαστάσεις τους, ενώ στα σχήματα 4.10 και 4.11 εμφανίζεται η διαφορά στα δοκίμια ως προς τις διαστάσεις τους.



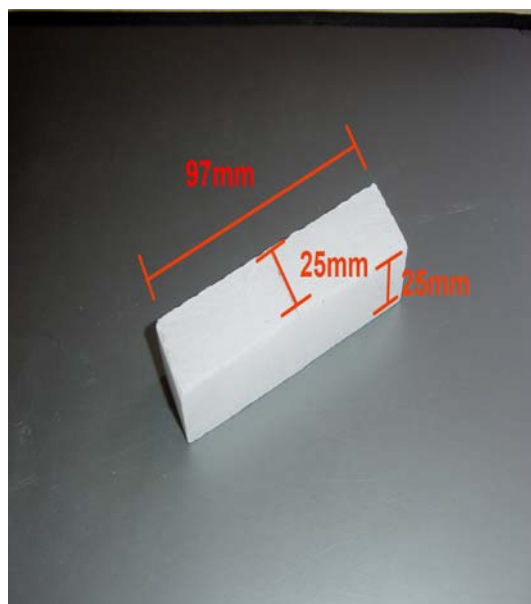
Σχήμα 4.4, δοκίμιο διαστάσεων 250*25*25mm



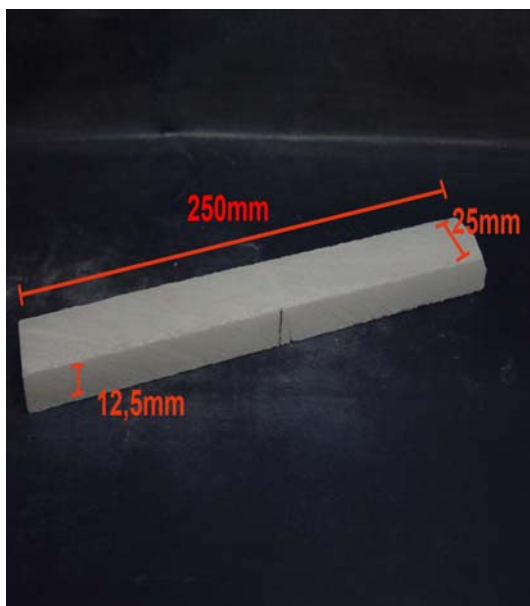
Σχήμα 4.5, δοκίμιο διαστάσεων 200*25*25mm



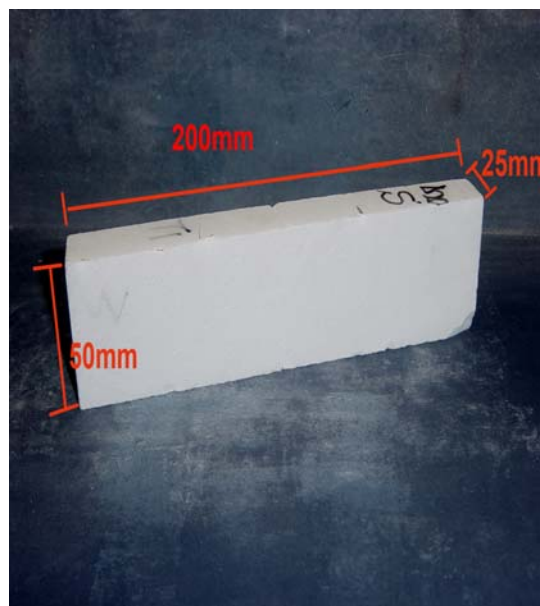
Σχήμα 4.6, δοκίμιο διαστάσεων 152*25*25mm



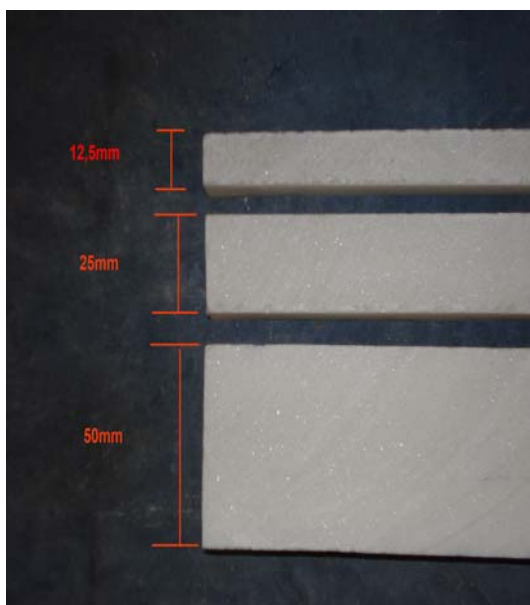
Σχήμα 4.7, δοκίμιο διαστάσεων 97*25*25mm



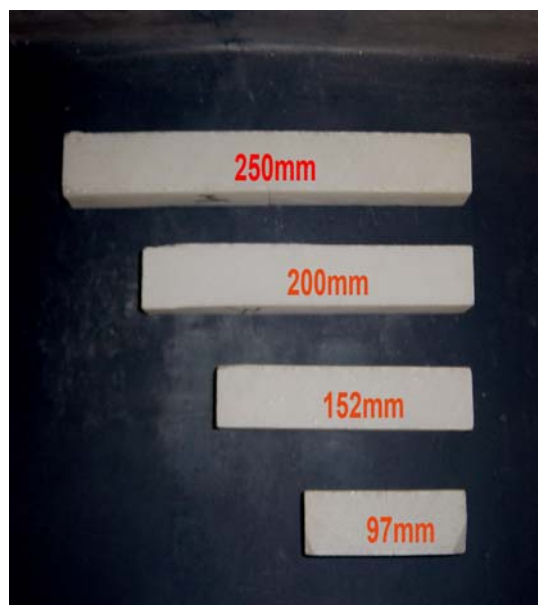
Σχήμα 4.8, δοκίμιο διαστάσεων 250*25*12,5mm



Σχήμα 4.9, δοκίμιο διαστάσεων 200*25*50mm



Σχήμα 4.10, δοκίμια διαφορετικού ύψους



Σχήμα 4.11, δοκίμια διαφορετικών μήκων

Αναλυτικά οι διαστάσεις των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές κάμψης, που η φόρτιση έγινε κάθετα ως προς το πρόσωπο, με σταθερό ύψος $h = 25mm$, φαίνονται στον πίνακα 4.1. Η στήλη l_s δείχνει το πλάτος ανοίγματος κεφαλών της μηχανής κάμψης που δοκιμάστηκε το κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 4.1, διαστάσεις δοκιμίων που η κάμψη έγινε κάθετα προς το πρόσωπο με $h=25mm$

Δοκίμιο	b (mm)	h (mm)	I (mm)	I _s (mm)
ΔΚ_Α	24,95	24,75	251,65	77,00
ΔΚ_Σ_Χ	24,15	24,95	96,55	77,00
Δ10_Ζ	24,75	23,55	97,55	77,00
Δ10_Η	25,55	24,00	97,55	77,00
Δ10_Σ	24,95	24,15	252,15	77,00
Δ10_Χ	24,75	24,75	94,05	77,00
Δ10_Υ	24,95	24,75	94,05	77,00
ΔΙ_Σ_Χ	24,85	24,75	96,05	77,00
Δ10_Β	24,75	23,55	251,15	133,00
ΔΙ_Β	24,95	23,95	251,15	133,00
ΔΚ_Υ	24,75	25,25	160,25	133,00
ΔΙ_Χ	24,95	25,35	160,15	133,00
ΔΙ_Σ_Υ	24,85	24,75	152,55	133,00
ΔΚ_Σ_Υ	24,15	24,95	152,55	133,00
ΔΚ_Β_Υ	24,95	25,15	152,55	133,00
Δ10_Α	24,95	24,25	252,15	187,00
ΔΙ_Α	25,15	24,25	251,15	187,00
Δ12_1	25,00	25,00	252,00	187,00
Δ12_2	25,00	26,35	252,00	187,00
ΔΚ_Ε	24,55	24,15	199,95	187,00
ΔΚ_Ν	25,55	25,05	201,25	187,00
Δ10_Ν	24,95	24,55	201,55	187,00
ΔΚ_Λ	24,95	24,95	199,55	187,00
ΔΚ_Ν	25,55	25,05	199,95	187,00
Δ12_3	25,15	25,55	251,00	235,00
Δ12_4	25,55	25,55	251,00	235,00
ΔΙ_Δ	24,85	24,75	251,00	235,00
ΔΚ_Δ	24,95	24,95	251,00	235,00
Δ10_Λ	25,25	24,95	252,15	235,00
ΔΙ_Λ	25,15	24,65	251,15	235,00
ΔΚ_Χ	24,95	25,05	250,75	235,00
ΔΙ_Υ	24,75	25,75	250,85	235,00

Οι διαστάσεις των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές κάμψης, που η φόρτιση έγινε κάθετα προς το μωρέλο, με σταθερό ύψος $h=25mm$, φαίνονται στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2, διαστάσεις δοκιμίων που η κάμψη έγινε κάθετα προς το μοντέλο με $h=25mm$

Δοκίμιο	b (mm)	h (mm)	I (mm)	I _s (mm)
Δ20_B	25,05	25,15	201,15	187,00
Δ20_D	24,55	24,85	201,15	187,00
Δ20_E	24,55	25,15	201,15	187,00
Δ20_A	25,05	25,15	201,15	187,00
Δ20_D	24,55	24,85	201,15	187,00
Δ20_Z	24,55	26,75	201,15	187,00

Οι διαστάσεις των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές κάμψης, που η μέτρηση έγινε κάθετα προς το πρόσωπο, με σταθερό ύψος $h = 50mm$, φαίνονται στον πίνακα 4.3.

πίνακας 4.3, διαστάσεις δοκιμίων που η κάμψη έγινε κάθετα προς το πρόσωπο με $h=50mm$

Δοκίμιο	b (mm)	h (mm)	I (mm)	I _s (mm)
Δ20_P	25,35	50,75	201,25	187,00
Δ20_O	24,75	50,75	201,25	187,00
Δ20_S	24,05	50,75	201,25	187,00
Δ20_X	25,25	49,75	201,25	187,00
Δ20_Y	25,35	49,75	201,25	187,00
Δ20_U	25,75	49,75	201,25	187,00

Οι διαστάσεις των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές κάμψης, που η μέτρηση έγινε κάθετα προς το πρόσωπο, με σταθερό ύψος $h = 12,5mm$, φαίνονται στον πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4, διαστάσεις δοκιμίων που η κάμψη έγινε κάθετα προς το πρόσωπο με $h=12,5mm$

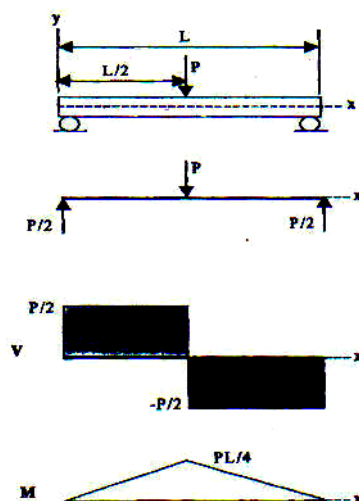
Δοκίμιο	b (mm)	h (mm)	I (mm)	I _s (mm)
Δ12_E	25,05	13,75	199,85	187,00
Δ12_L	25,05	13,05	199,05	187,00
Δ10_W	25,25	12,75	199,55	187,00
ΔΙ_1	25,10	11,75	199,85	187,00
ΔΙ_2	25,25	12,25	199,85	187,00
ΔΚ_1	25,15	13,15	199,65	187,00
ΔΚ_2	25,65	12,75	199,65	187,00
Δ10_1	24,85	12,25	199,75	187,00
Δ10_2	24,95	12,25	199,75	187,00

4.4. ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

Στην δοκιμή κάμψης τριών σημείων ελέγχεται το μαρμάρινο δοκίμιο μέχρι την θραύση του. Η μετατόπιση των σημείων, η καμπτική τάση και οι διαφορετικές μορφές θραύσης του δοκιμίου είναι οι βασικές παράμετροι που μελετώνται και εξετάζονται.

Τα δοκίμια που φορτίζονται σε κάμψη είναι μια από τις κοινές μορφές καταπόνησης στις κατασκευές αλλά γενικότερα στην φύση. Η περίπτωση αυτή της καταπόνησης αν και είναι απλή και συνηθισμένη, είναι περίπλοκη στην ανάλυσή της, ενώ εξαιτίας αυτής της καταπόνησης αναπτύσσονται τάσεις με ποικίλες κατανομές που έχει σαν συνέπεια την αστοχία του υλικού με διαφορετικούς τρόπους.

Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζεται ένα δοκίμιο απλά εδραζόμενο στα δυο του άκρα και φορτιζόμενο στο μέσο του μήκος του l .



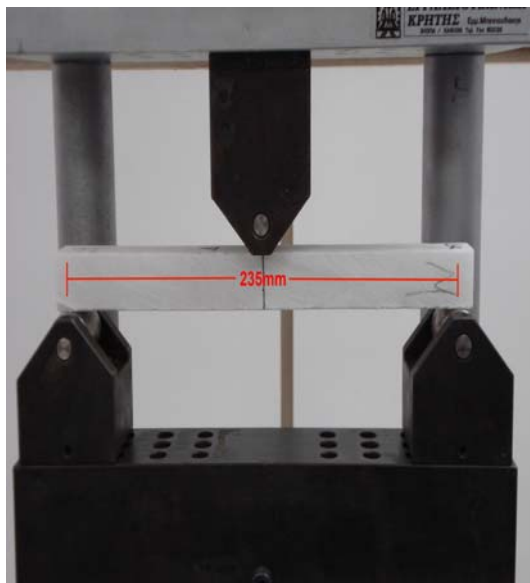
Σχήμα 4.12, δοκός υπό συνθήκες κάμψης (Προβιδάκης, 1998)

Στο ίδιο σχήμα φαίνεται το διάγραμμα ελεύθερου σώματος της δοκού και στην συνέχεια το διάγραμμα των εσωτερικών διατμητικών δυνάμεων V και των καμπτικών ροπών M , (Προβιδάκης, 1998).

4.5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΜΨΗΣ

Τα δοκίμια αφού κόβονταν στις κατάλληλες διαστάσεις τοποθετούνταν στην μηχανή κάμψης όπου φορτίζονταν μέχρι την θραύση τους.

Το μηχάνημα αυτό, όπως προαναφέρθηκε, διαθέτει μήκος ανοίγματος κεφαλών 77, 133, 187 και 235mm, σχήματα 4.13 και 4.14. Τα δοκίμια κόπηκαν κατά μήκος $l \approx l_s + 15\text{mm}$ ανά περίπτωση, ώστε να τοποθετούνται στη μηχανή κάμψης χωρίς να προεξέχουν πολύ από τις κεφαλές.



Σχήμα 4.13, άνοιγμα κεφαλών 235mm



Σχήμα 4.14, άνοιγμα κεφαλών 77mm

Το άνω στέλεχος κατέβαινε πολύ προσεχτικά στην αρχή με την βοήθεια ελαστικού σφυριού, έως ότου ακουμπήσει το δοκίμιο. Δοκίμια, τα οποία δεν είχαν επαφή σε όλο το μήκος των κεφαλών, λόγω κακής κοπής τους, δεν δοκιμάστηκαν, επειδή θα οδηγούσαν σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Αυτό γίνεται προφανές, και στα διαγράμματα του επομένου κεφαλαίου, που αντιστοιχούν σε δοκίμια που δεν εφάρμοζαν σωστά στη μηχανή.

Η μηχανή προγραμματιζόταν σε σταθερή μετατόπιση 0,06 mm/min. Τα αποτελέσματα καταγράφονταν με ειδικό πρόγραμμα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Την στιγμή της θραύσης του μαρμάρου σταματούσε η μηχανή και η καταγραφή των μετρήσεων. Το άνω στέλεχος θα έπρεπε να επανέλθει στην αρχική του θέση, να τοποθετηθεί καινούργιο δοκίμιο και να επανεκκινήσει το πείραμα. Τα δοκίμια όταν τοποθετούνταν στη μηχανή κάμψης, σηματοδούνταν το μέσο του μήκους τους l , σημείο όπου θα έβρισκε και εφαρμογή το άνω άκρο του στελέχους της μηχανής.

Τα σπασμένα δοκίμια συλλέγονταν σε ξεχωριστό χώρο και εξετάζονταν μακροσκοπικά ως προς το είδος και το λόγο της θραύσης τους καθώς και για την απόσταση που αστόχησαν από το μέσο του δοκιμίου.

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων υπήρξε μια σκέψη να μελετηθούν τα σημεία θραύσης των δοκιμίων μικροσκοπικά. Με την μελέτη αυτή, πιθανώς θα παρατηρούνταν διαφορές στους κρυστάλλους του μαρμάρου, πριν και μετά την θραύση τους, αλλά θα έβγαιναν και συμπεράσματα για διαφορές στην αντοχή των κρυστάλλων του.

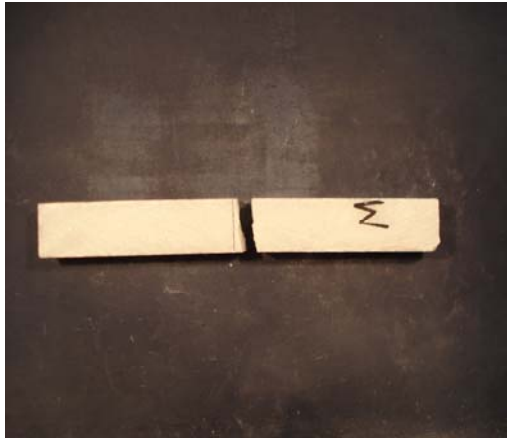
Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά δώδεκα χαρακτηριστικές περιπτώσεις θραύσης που εμφανίστηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων, σχήματα 4.15 έως 4.26. Στο σχήμα 4.15, οριστική θραύση δεν έχει γίνει στο δοκίμιο, φαίνεται ενιαίο, αλλά στην πραγματικότητα έχει αστοχήσει. Στα σχήματα 4.16-4.18, τα δοκίμια αστοχούν κάθετα στο μέσο τους, η συχνότερη περίπτωση που εμφανίστηκε, ενώ στα σχήματα 4.19-4.20, αστοχούν υπό γωνία. Στα υπόλοιπα σχήματα τα δοκίμια δεν αστοχούν στο μέσο της δοκού. Αυτό οφείλεται σε κακή κοπή του, την ύπαρξη μικροεγκοίλων και ρηγματώσεων του δοκιμίου. Όλες αυτές οι περιπτώσεις εξετάστηκαν για το αν θα μπορούσαν τα αποτελέσματα τους να είναι έγκυρα.



Σχήμα 4.15, θραύση χωρίς ρωγμή



Σχήμα 4.16, κάθετη θραύση



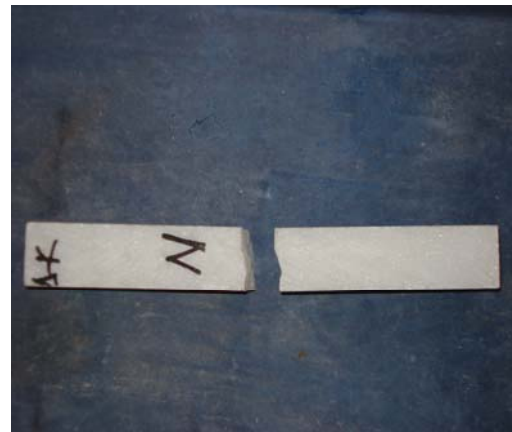
Σχήμα 4.17, κάθετη θραύση



Σχήμα 4.18, κάθετη θραύση



Σχήμα 4.19, θραύση υπό γωνία



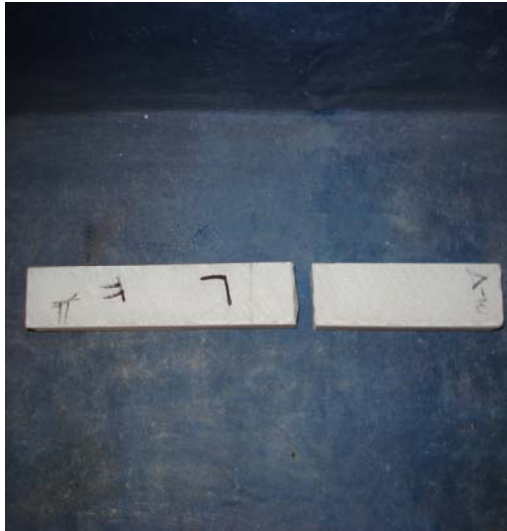
Σχήμα 4.20, θραύση υπό γωνία



Σχήμα 4.21, θραύση με μεγάλη απόκλιση από το κέντρο



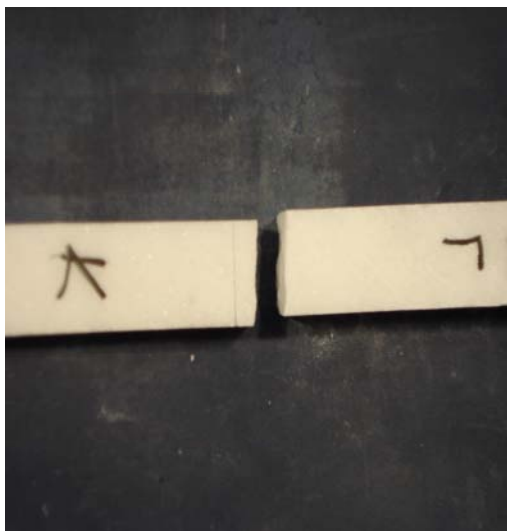
Σχήμα 4.22, θραύση με μεγάλη απόκλιση από το κέντρο



Σχήμα 4.23, θραύση με μεγάλη απόκλιση από το κέντρο



Σχήμα 4.24, θραύση με μεγάλη απόκλιση από το κέντρο



Σχήμα 4.25, θραύση με μεγάλη απόκλιση από το κέντρο



Σχήμα 4.26, θραύση με μεγάλη απόκλιση από το κέντρο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο**ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΜΨΗΣ**

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η επεξεργασία των μετρήσεων που λήφθηκαν από τις εργαστηριακές δοκιμές κάμψης τριών σημείων. Παρατίθενται πίνακες και διαγράμματα των τελικών αποτελεσμάτων, εξηγώντας παράλληλα την επεξεργασία των δεδομένων που πραγματοποιήθηκαν.

5.1. ΓΕΝΙΚΑ

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική μελέτη της δοκιμής, προέρχονταν από πρόσφατα εξορυσσόμενους όγκους μαρμάρου Διονύσου του ίδιου νταμαριού και της ίδιας βαθμίδας. Εξαιτίας αυτού, τα τελικά αποτελέσματα της επεξεργασίας, δεν θα πρέπει να έχουν διαφορά κατά 5%, ενώ τα ίδια δεν θα πρέπει να διαφέρουν περισσότερο από 12% από ανάλογα πειράματα σε άλλο νταμάρι ή άλλα πειράματα με τις ίδιες παραδοχές που θεωρήθηκαν σε αυτά τα πειράματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι όντως τα τελικά συμπεράσματα δεν έχουν απόκλιση μεγαλύτερη της τάξης του 5%.

Μια παραδοχή που έγινε και πρέπει να σημειωθεί είναι ότι στις μετρήσεις δεν συμπεριλήφθηκε η δύναμη και κατόπιν η τάση που ασκεί το άνω στέλεχος της μηχανής κάμψης στα δοκίμια. Η δύναμη που ασκείται στα δοκίμια οφείλεται στο βάρος του στελέχους, 9,750 kg. Το βάρος αυτό μετατράπηκε σε kN., επειδή όμως ήταν πολύ μικρό σε σχέση με τα φορτία που αναπτύσσονταν, τελικά απαλείφθηκε.

5.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ – ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Σε όλη την διάρκεια του πειράματος, ένας ειδικός καταγραφέας συνδεδεμένος με ηλεκτρονικό υπολογιστή, κατέγραφε την δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο από το άνω στέλεχος ανά μονάδα χρόνου.

Με τα στοιχεία αυτά που συλλέχτηκαν και με τη βοήθεια του προγράμματος Excel, κατασκευάζεται αναλυτικό δελτίο για κάθε δοκίμιο. Αρχικά, σημειώνονται οι διαστάσεις του συγκεκριμένου δοκιμίου και υπολογίζεται ο συντελεστής αδράνειας I_z (Lama & Vutukuri).

$$I_z = \frac{bh^3}{12}$$

όπου : b είναι το πλάτος και h το ύψος του δοκιμίου.

Στη συνέχεια, καταγράφεται ο χρόνος του πειράματος και υπολογίζεται η μετατόπιση του μαρμάρου, αφού είναι γνωστός ο ρυθμός καθόδου του στελέχους, 0,001 mm/sec.

Έπειτα, με τα δεδομένα της δύναμης που δίνονται, υπολογίζεται η τάση στο δοκίμιο από τον τύπο (Lama & Vutukuri) :

$$\sigma_t = \frac{3 P_f l_s}{2 b h^2} \quad (5.1)$$

όπου : b είναι το πλάτος, h το ύψος, l το μήκος του δοκιμίου και P η δύναμη που ασκείται.

Στο τέλος, κατασκευάζονται τα διαγράμματα μετατόπισης – δύναμης και μετατόπισης – τάσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι αρνητικές τιμές δυνάμεων, φανερώνουν ότι αυτές δεν εφαρμόζονται στο δοκίμιο. Μετά την θραύση του δοκιμίου, η δύναμη ελαττώνεται αισθητά.

Στην συνέχεια δίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων σε πέντε δοκίμια. Τα δοκίμια Δ_{10C} και Δ_KN αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα δοκιμίων που δεν είχαν καλή επαφή με τον άνω βραχίονα της μηχανής κάμψης.

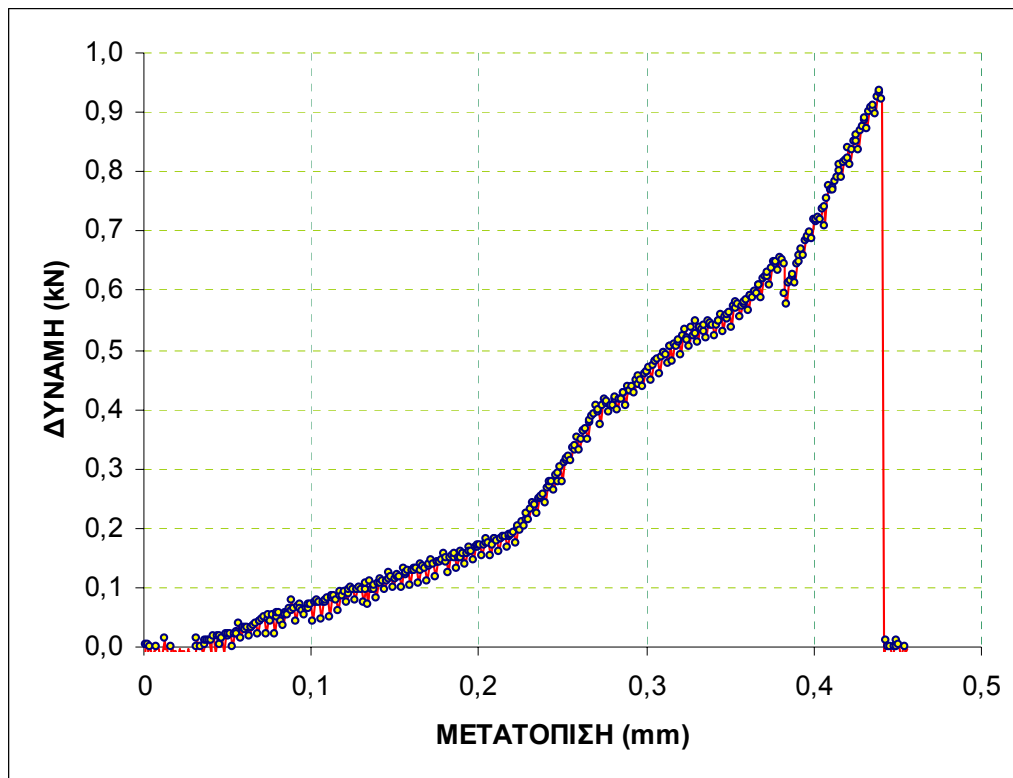
5.2.1. ΔΟΚΙΜΙΟ Δ₁₀ΑΠίνακας 5.1, Χαρακτηριστικά δοκιμίου Δ₁₀Α

Χαρακτηριστικά Δοκιμίου	
B	24,95mm
H	24,25mm
L	252,15mm
Ls	187mm
I_z	29649,98874mm³

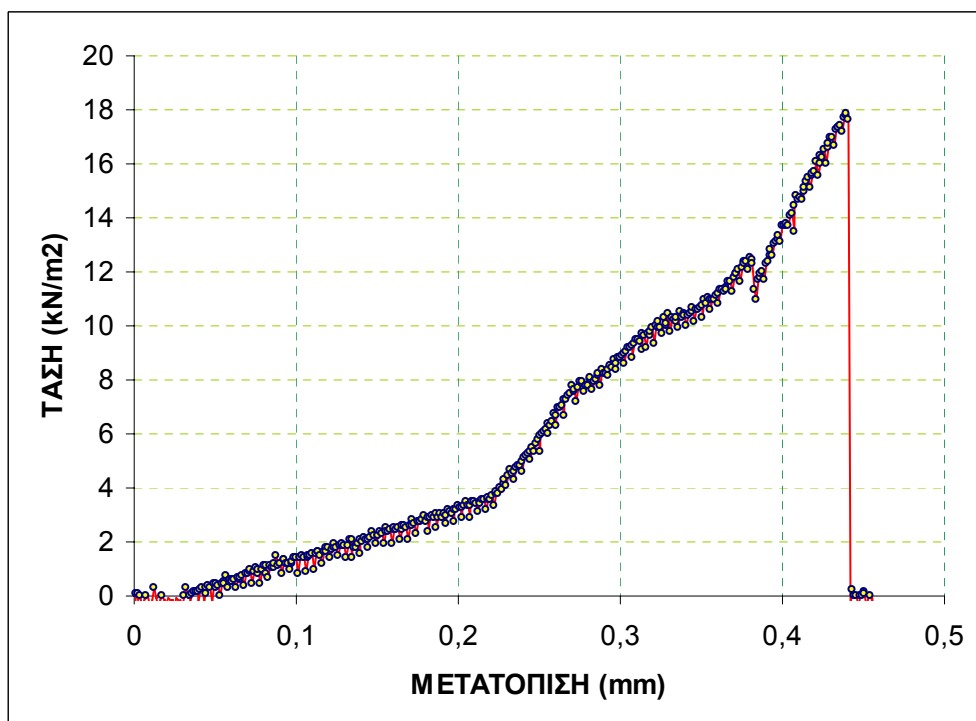
Πίνακας 5.2, Συνοπτικός πίνακας με τα αποτελέσματα της δοκιμής

Time	Displacement (mm)	Load (kN)	Stress (Pa)
0	0	-0,032043	-612,593
1	0,001	0,004578	87,521
2	0,002	0,004578	87,521
3	0,003	-0,006104	-116,695
4	0,004	0	0
5	0,005	-0,021362	-408,395
6	0,006	-0,007629	-145,850
7	0,007	-0,004578	-87,521
...	...	...	...
377	0,377	0,642395	12281,205
378	0,378	0,646973	12368,727
379	0,379	0,63324	12106,181
380	0,38	0,656128	12543,750
381	0,381	0,65155	12456,229
382	0,382	0,642395	12281,205
383	0,383	0,593567	11347,719
...	...	...	...
451	0,451	0,004578	87,521
452	0,452	-0,018311	-350,067
453	0,453	-0,004578	-87,521
454	0,454	-0,001526	-29,174
455	0,455	-0,012207	-233,371
456	0,456	-0,004578	-87,521

Με την χρωματιστή ένδειξη φαίνεται ο χρόνος και η συνολική μετατόπιση την στιγμή της θραύσης.



Διάγραμμα 5.1 δυνάμης – μετατόπισης



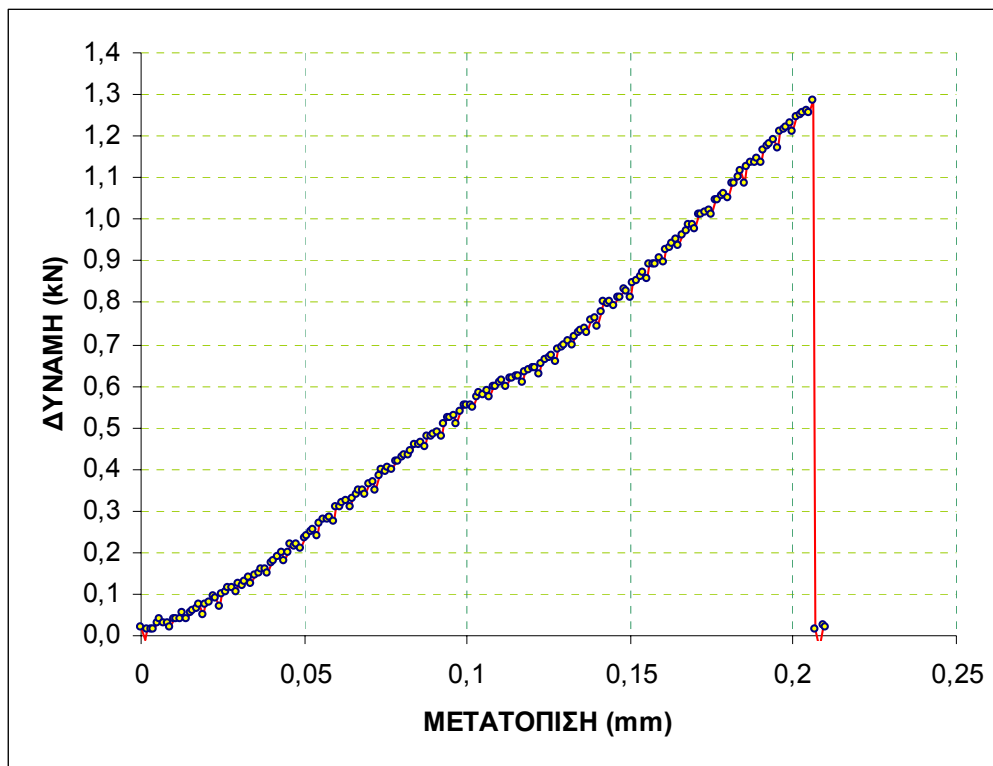
Διάγραμμα 5.2 τάσης - μετατόπισης

5.2.2. ΔΟΚΙΜΙΟ $\Delta_{10} B$ Πίνακας 5.3, Χαρακτηριστικά δοκιμίου $\Delta_{10} B$

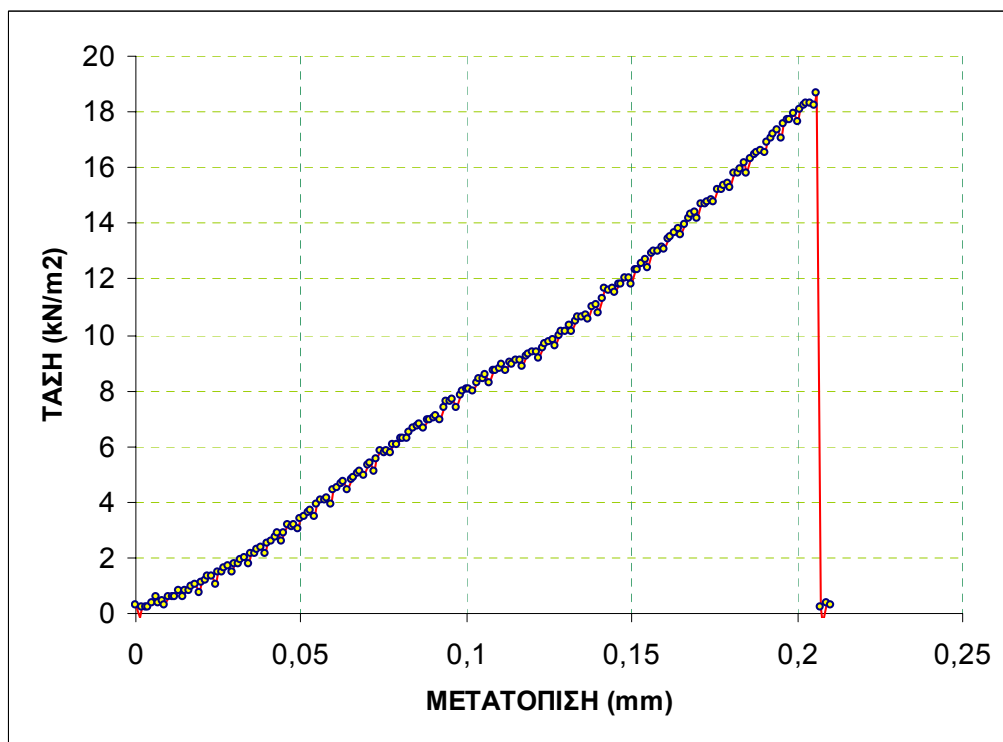
Χαρακτηριστικά Δοκιμίου	
b	24,75mm
h	23,55mm
l	251,15mm
l_s	133mm
I_z	26938,0833mm ²

Πίνακας 5.4, Συνοπτικός πίνακας με τα αποτελέσματα της δοκιμής

Time	Displacement (mm)	Load (kN)	Stress (Pa)
0	0	0,018311	266,132514
1	0,001	-0,009155	-133,05899
2	0,002	0,016785	243,9535933
3	0,003	0,016785	243,9535933
4	0,004	0,016785	243,9535933
5	0,005	0,027466	399,1915039
6	0,006	0,039673	576,6083352
7	0,007	0,027466	399,1915039
...	...	...	...
197	0,197	1,217651	17697,36889
198	0,198	1,219177	17719,54781
199	0,199	1,231384	17896,96464
200	0,2	1,213074	17630,84666
201	0,201	1,243591	18074,38147
202	0,202	1,252747	18207,455
203	0,203	1,257324	18273,97723
204	0,204	1,25885	18296,15615
205	0,205	1,255798	18251,79831
206	0,206	1,286316	18695,34765
207	0,207	0,016785	243,9535933
208	0,208	-0,027466	-399,1915039
209	0,209	0,022888	332,6547419
210	0,21	0,018311	266,132514



Διάγραμμα 5.3 δύναμης – μετατόπισης



Διάγραμμα 5.4 τάσης – μετατόπισης

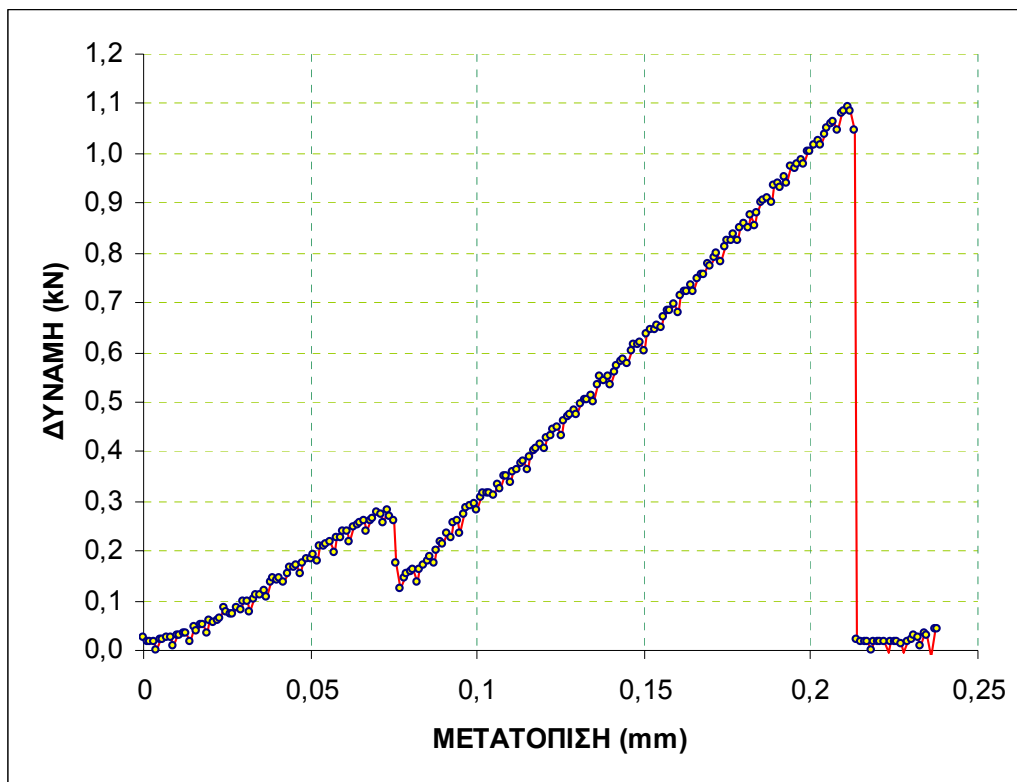
5.2.3. ΔΟΚΙΜΙΟ $\Delta_{10} C$ Πίνακας 5.5, Χαρακτηριστικά δοκιμίου $\Delta_{10} C$

Χαρακτηριστικά Δοκιμίου	
b	24,95mm
h	24,15mm
l	252,15mm
l_s	77mm
I_z	29284,69527mm ³

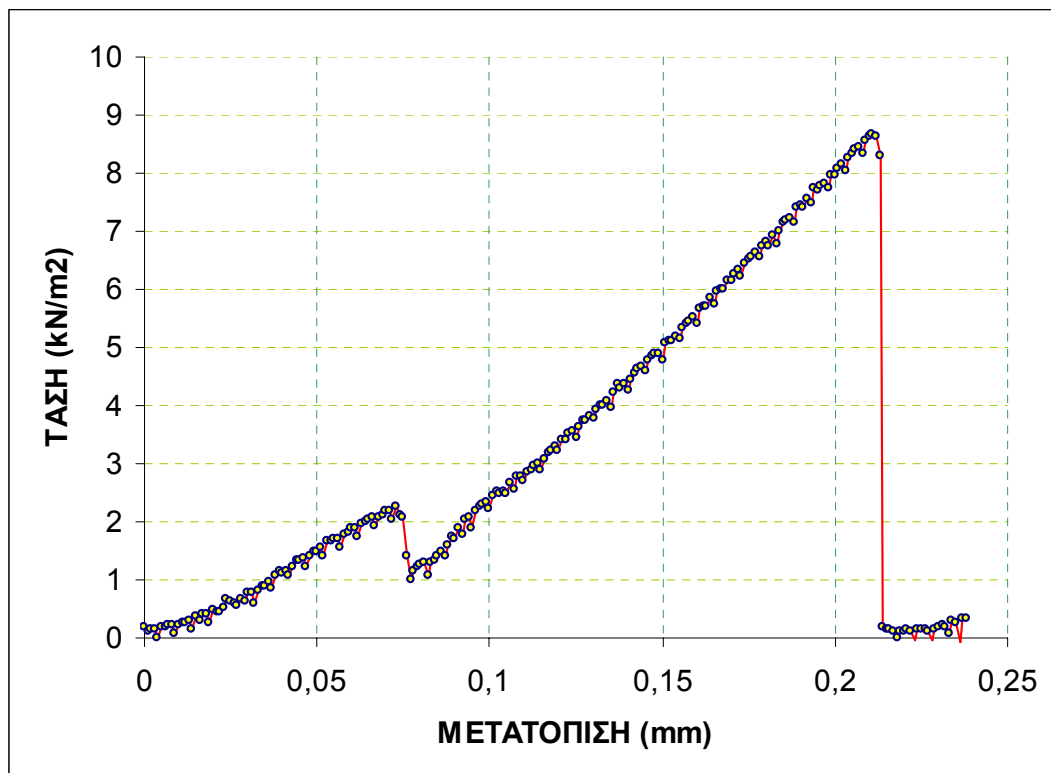
Πίνακας 5.6, Συνοπτικός πίνακας με τα αποτελέσματα της δοκιμής

Time	Displacement (mm)	Load (kN)	Stress (Pa)
0	0	0,024414	193,783
1	0,001	0,015259	121,116
2	0,002	0,018311	145,341
3	0,003	0,018311	145,341
4	0,004	-0,001526	-12,112
5	0,005	0,021362	169,558
6	0,006	0,021362	169,558
7	0,007	0,02594	205,896
...	...	...	...
73	0,073	0,283813	2252,732
74	0,074	0,267029	2119,511
75	0,075	0,259399	2058,948
76	0,076	0,175476	1392,820
77	0,077	0,125122	993,141
78	0,078	0,146484	1162,699
79	0,079	0,152588	1211,149
...	...	...	...
211	0,211	1,094055	8683,930
212	0,212	1,086426	8623,376
213	0,213	1,045227	8296,364
214	0,214	0,021362	169,558
215	0,215	0,018311	145,341
216	0,216	0,016785	133,229

Όπως φαίνεται στον πίνακα 5.6, αλλά και στα διαγράμματα, το δοκίμιο δεν παρουσιάζει ομαλή συμπεριφορά. Πιθανώς να μην είχε κοπεί σωστά και να μην είχε σωστή εφαρμογή στη μηχανή. Τα δεδομένα θα απορριφθούν.



Διάγραμμα 5.5 δύναμης – μετατόπισης



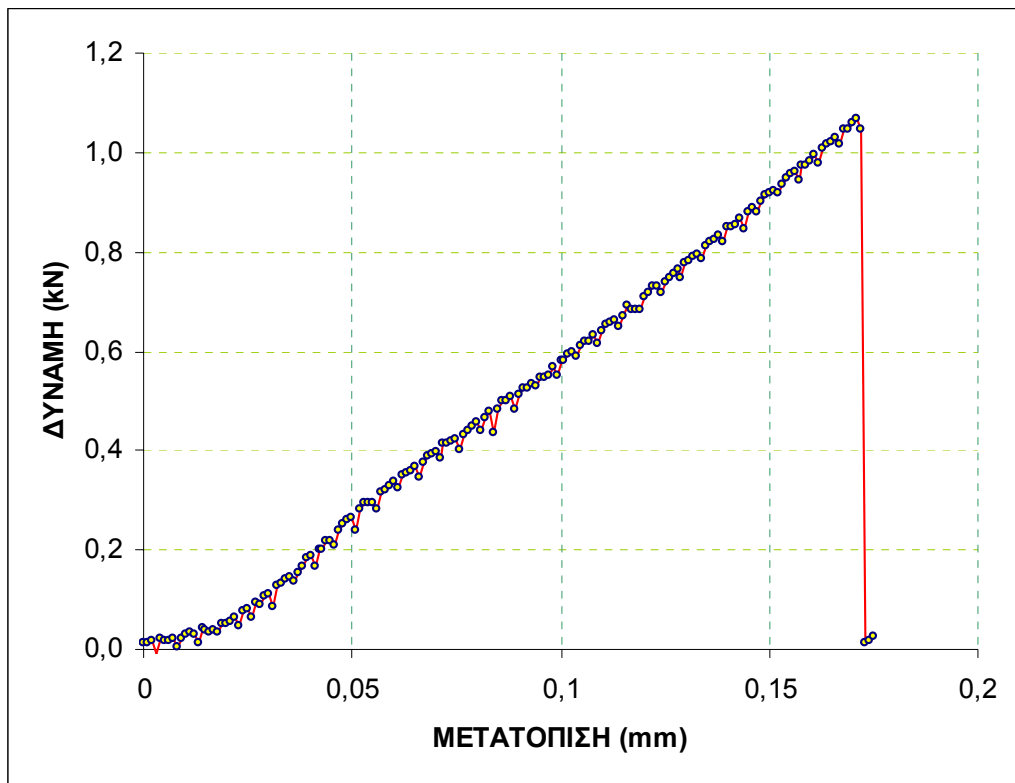
Διάγραμμα 5.6 τάσης – μετατόπισης

5.2.4. ΔΟΚΙΜΙΟ $\Delta_K E$ Πίνακας 5.7, Χαρακτηριστικά δοκιμίου $\Delta_K E$

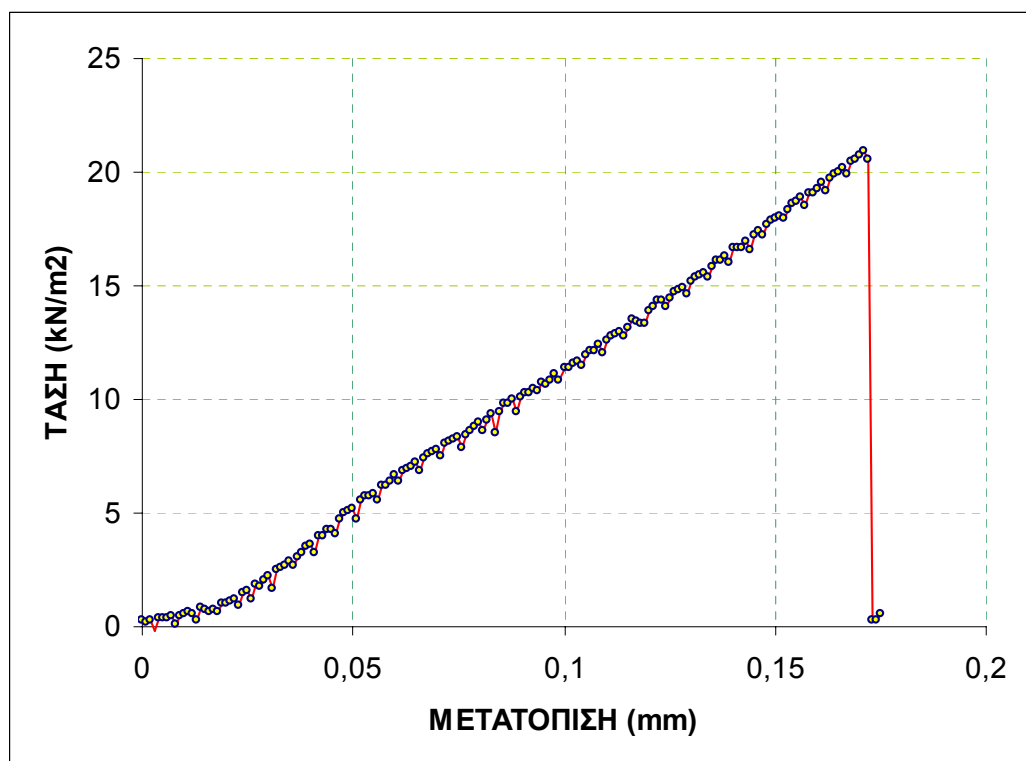
Χαρακτηριστικά Δοκιμίου	
b	24,55mm
h	24,15mm
l	199,95mm
l_s	187mm
I_z	28815,20115mm ³

Πίνακας 5.8, Συνοπτικός πίνακας με τα αποτελέσματα της δοκιμής

Time	Displacement (mm)	Load (kN)	Stress (Pa)
0	0	0,012207	239,1421
1	0,001	0,010681	209,2469
2	0,002	0,015259	298,9325
3	0,003	-0,009155	-179,3517
4	0,004	0,019836	388,5986
5	0,005	0,016785	328,8277
6	0,006	0,016785	328,8277
7	0,007	0,021362	418,4938
...	...	...	...
162	0,162	0,976563	19131,4270
163	0,163	1,00708	19729,2724
164	0,164	1,017761	19938,5193
165	0,165	1,019287	19968,4146
166	0,166	1,028442	20147,7662
167	0,167	1,014709	19878,7289
168	0,168	1,046753	20506,4892
169	0,169	1,048279	20536,3844
170	0,17	1,05896	20745,6313
171	0,171	1,066589	20895,0878
172	0,172	1,048279	20536,3844
173	0,173	0,012207	239,1421
174	0,174	0,015259	298,9325
175	0,175	0,027466	538,0746



Διάγραμμα 5.7 δύναμης – μετατόπισης



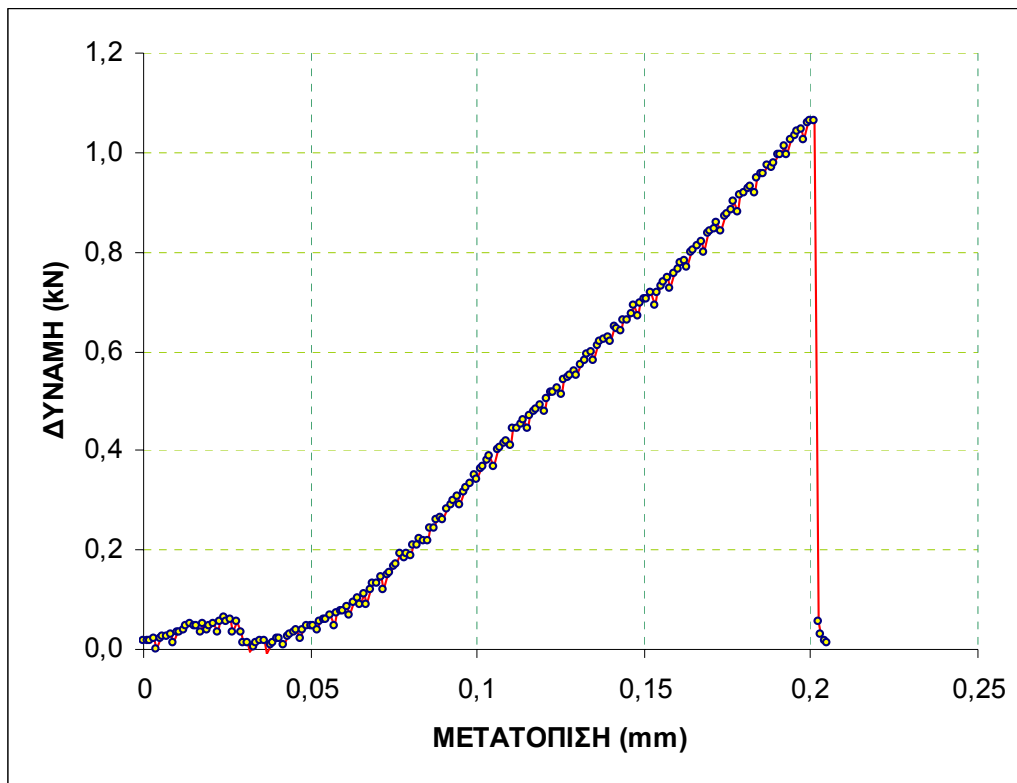
Διάγραμμα 5.8 τάσης – μετατόπισης

5.2.5. ΔΟΚΙΜΙΟ $\Delta_K N$ Πίνακας 5.9, Χαρακτηριστικά δοκιμίου $\Delta_K N$

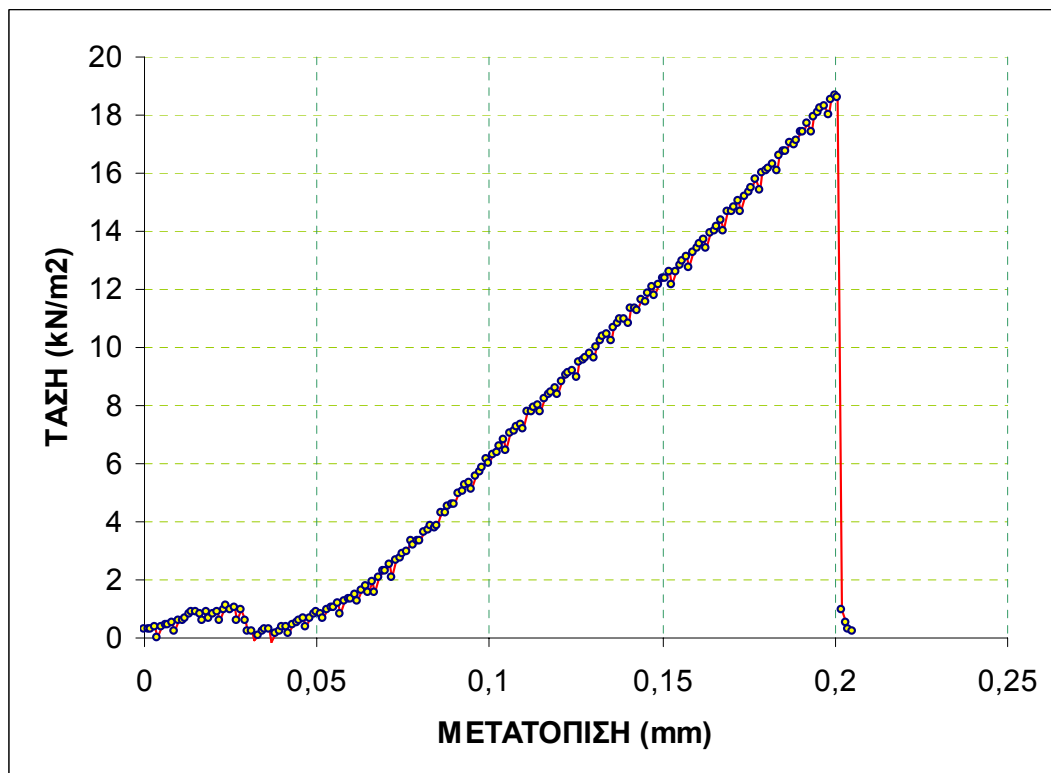
Χαρακτηριστικά Δοκιμίου	
b	25,55mm
h	25,05mm
l	201,15mm
l_s	187mm
I_z	33468,23803mm ³

Πίνακας 5.10, συνοπτικός πίνακας με τα αποτελέσματα της δοκιμής

Time	Displacement (mm)	Load (kN)	Stress (Pa)
0	0	0,016785	293,662
1	0,001	0,015259	266,964
2	0,002	0,018311	320,360
3	0,003	0,019836	347,041
4	0,004	0	0
5	0,005	0,022888	400,437
6	0,006	0,02594	453,833
7	0,007	0,02594	453,833
...	...	...	...
192	0,192	1,011658	17699,468
193	0,193	0,994873	17405,806
194	0,194	1,023865	17913,036
195	0,195	1,03302	18073,207
196	0,196	1,040649	18206,681
197	0,197	1,046753	18313,473
198	0,198	1,026917	17966,432
199	0,199	1,057434	18500,343
200	0,2	1,065063	18633,816
201	0,201	1,063538	18607,135
202	0,202	0,054932	961,063
203	0,203	0,030518	533,928
204	0,204	0,016785	293,662
205	0,205	0,013733	240,266



Διάγραμμα 5.9 δύναμης – μετατόπισης



Διάγραμμα 5.10 τάσης – μετατόπισης

5.3. ΜΕΛΕΤΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ.

Ο υπολογισμός των δυνάμεων και των τάσεων, όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα πραγματοποιήθηκε για όλα τα δοκίμια. Τα αποτελέσματα ελέγχθηκαν και όποια θεωρούνται ότι προέρχονται από προβληματικά δοκίμια δεν συμμετέχουν στους επόμενους υπολογισμούς.

Η ποσότητα και η ποιότητα των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν κρίθηκαν ικανές στην διεξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Στα εργαστήρια του τμήματος Μηχανικής Πετρωμάτων, παρόλο αυτά, υπάρχουν αρκετά δοκίμια για περαιτέρω έρευνα.

Στην συνέχεια της επεξεργασίας, ομαδοποιούνται τα δοκίμια, από τα οποία κατασκευάζονται οι παρακάτω πίνακες που περιλαμβάνονται :

- από το όνομα του δοκιμίου που εξετάζεται,
- από την μέγιστη δύναμη P_f που δέχτηκαν την στιγμή της θραύσης τους,
- την τάση που προκύπτει από τον τύπο 5.1,
- το μέσο όρο των δύο παραπάνω μεγεθών για όλα τα δοκίμια και
- την τυπική απόκλιση.

Πίνακας 5.11 αποτελεσμάτων για δοκίμια με $l_s = 77\text{mm}$

Δοκίμιο	Δύναμη (kN)	Τάση(MPa)
Δ Κ Α	2,49	18,82
Δ 10 Ζ	2,42	20,36
Δ 10 Η	2,65	20,80
Δ 10 Χ	2,99	22,78
Δ 10 Υ	3,19	24,11
Δ Ι C Χ	2,59	19,15
Μέσος Όρος	2,72	21,00
Τυπική Απόκλιση	0,30	2,07

Πίνακας 5.12 αποτελεσμάτων για δοκίμια με $l_s = 133\text{mm}$

Δοκίμιο	Δύναμη (kN)	Τάση (MPa)
Δ 10 B	1,29	18,75
Δ I B	1,43	19,93
Δ K Y	1,62	20,48
Δ I X	1,36	16,92
Δ K C Y	1,40	17,88
Δ K B Y	1,79	22,85
Μέσος Όρος	1,48	19,47
Τυπική Απόκλιση	0,19	2,11

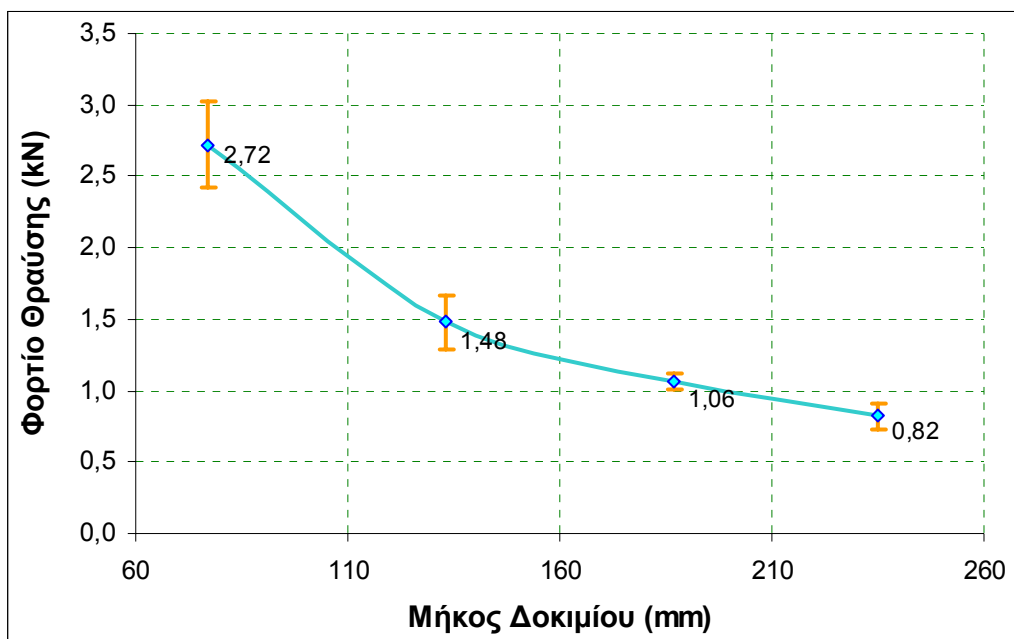
Πίνακας 5.13 αποτελεσμάτων για δοκίμια με $l_s = 187\text{mm}$

Δοκίμιο	Δύναμη (kN)	Τάση (MPa)
Δ 12 3	0,82	17,61
Δ K D	0,91	20,65
Δ 10 L	0,89	19,96
Δ I L	0,87	20,07
Δ K X	0,78	17,56
Δ I Y	0,65	13,96
Μέσος Όρος	0,82	18,30
Τυπική Απόκλιση	0,10	2,50

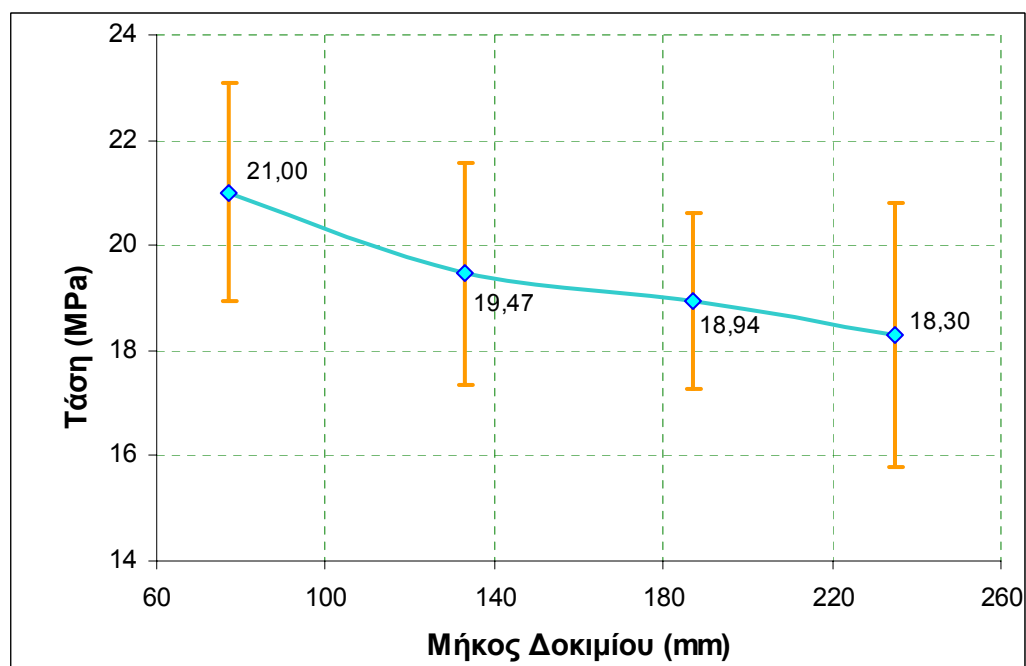
Πίνακας 5.14 αποτελεσμάτων για δοκίμια με $l_s = 235\text{mm}$

Δοκίμιο	Δύναμη (kN)	Τάση (MPa)
Δ 12 1	1,04	18,67
Δ 12 2	1,01	16,32
Δ K E	1,07	20,96
Δ K N	1,07	18,63
Δ K L	1,02	18,42
Δ K N	1,18	20,64
Μέσος Όρος	1,06	18,94
Τυπική Απόκλιση	0,06	1,69

Στη συνέχεια κατασκευάζονται τα διαγράμματα 5.11-5.12.



Διάγραμμα 5.11 Φορτίου Θραύσης – Μήκος Δοκιμίου



Διάγραμμα 5.12 Τάσης – Μήκος Δοκιμίου

Τα διαγράμματα 5.11 και 5.12 κατασκευάζονται από το μέσο όρο του Φορτίου θραύσης (kN) και της Τάσης (MPa) των δοκιμίων που φαίνονται στους πίνακες 5.11 έως 5.14 με τα αντίστοιχα μήκη l_s .

Σκοπός των διαγραμμάτων αυτών είναι η διεξαγωγή συμπερασμάτων, για το πώς μεταβάλλεται η αντοχή του μαρμάρου σε κάμψη τριών σημείων, διατηρώντας το ύψος h των δοκιμίων σταθερό και μεταβάλλοντας το μήκος του l .

Υπενθυμίζεται ότι το πλάτος b των δοκιμίων παραμένει σταθερό σε όλη την διάρκεια των πειραμάτων και ίσο με 25mm, όπως σταθερός παραμένει και ο ρυθμός φόρτισης τους, 0,001 mm/sec.

5.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.

Στα διαγράμματα 5.11 και 5.12 φαίνεται καθαρά η διαφοροποίηση που προκύπτει στην αντοχή του μαρμάρου σε κάμψη τριών σημείων, διατηρώντας το ύψος h των δοκιμίων σταθερό και μεταβάλλοντας το μήκος του l .

Η αντοχή του μαρμάρου σε κάμψη είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος του. Όσο αυξάνεται το μήκος l_s στα διαγράμματα τόσο μειώνεται το Φορτίο θραύσης και η τάση. Ούτε οι αποκλίσεις μπορούν να μεταβάλλουν τα αποτελέσματα αφού είναι ανάλογα σε όλες τις περιπτώσεις.

Τα συμπεράσματα αυτά ήταν μεν αναμενόμενα αλλά επιβεβαιώνονται και στα πειράματα. Οι λόγοι για τα παραπάνω είναι :

- όσο αυξάνεται το μήκος, αυξάνεται και η πιθανότητα να υπάρχουν μικρορωγμές και ατέλειες στο δοκίμιο που μειώνουν την αντοχή του σε μηχανικές δοκιμές,
- από τους τύπους της δύναμης και της τάσης, σχέση 5.1, το μήκος l βρίσκεται στον αριθμητή, κάτι που υποδηλώνει ότι και η δύναμεις που δέχεται το δοκίμιο είναι μεγαλύτερες με την αύξηση του μήκους του.

5.5. ΜΕΛΕΤΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΜΗΚΟΥΣ.

Στην συνέχεια της επεξεργασίας, δουλεύοντας ομοίως με το υποκεφάλαιο 5.3, ομαδοποιούνται τα δοκίμια, από τα οποία κατασκευάζονται οι παρακάτω πίνακες που περιλαμβάνονται :

- από το όνομα του δοκιμίου που εξετάζεται,
- από την μέγιστη δύναμη P_f που δέχτηκαν την στιγμή της θραύσης τους,
- την τάση που προκύπτει από τον τύπο 5.1,
- το μέσο όρο των δύο παραπάνω μεγεθών για όλα τα δοκίμια και την τυπική απόκλιση.

Μετά τους πίνακες κατασκευάζονται τα διαγράμματα Φορτίου θραύσης (kN) – μετατόπισης (mm) και Τάσης (MPa) – μετατόπισης (mm), διαγράμματα 5.13-5.14.

Τα διαγράμματα 5.13 και 5.14 κατασκευάζονται από το μέσο όρο του Φορτίου θραύσης (kN) και της Τάσης (MPa) των δοκιμίων που φαίνονται στους πίνακες 5.15 έως 5.17 με τους αντίστοιχους λόγους h/b .

Ο λόγος h/b είναι 12,5/25 στην πρώτη περίπτωση, 25/25 στην δεύτερη και 50/25 στην τρίτη περίπτωση.

Υπενθυμίζεται ότι το πλάτος b των δοκιμίων παραμένει σταθερό σε όλη την διάρκεια των πειραμάτων και ίσο με 25mm, όπως σταθερός παραμένει και ο ρυθμός φόρτισης τους, 0,001 mm/sec.

Σκοπός των διαγραμμάτων αυτών είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων, για το πως μεταβάλλεται η αντοχή του μαρμάρου σε κάμψη τριών σημείων, διατηρώντας το μήκος l των δοκιμίων σταθερό και μεταβάλλοντας το ύψος h .

πίνακας 5.15, πίνακας αποτελεσμάτων για δοκίμια με $h=12,5mm$

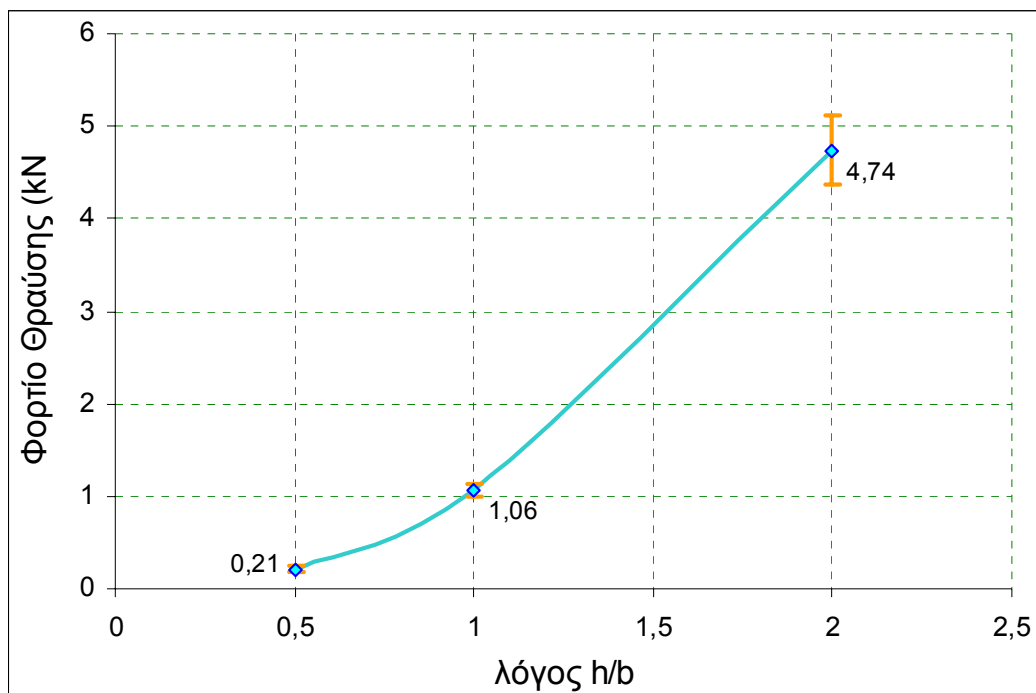
Δοκίμιο	Δύναμη (kN)	Τάση(MPa)
Δ12_E	0,27	15,99
Δ12_L	0,21	13,81
Δ10_W	0,23	15,72
ΔI_2	0,20	14,81
ΔK_1	0,21	13,54
Δ10_1	0,18	13,54
Δ10_2	0,20	14,98
Μέσος Όρος	0,21	14,63
Τοπική Απόκλιση	0,03	1,02

πίνακας 5.16, πίνακας αποτελεσμάτων για δοκίμια με $h=25mm$

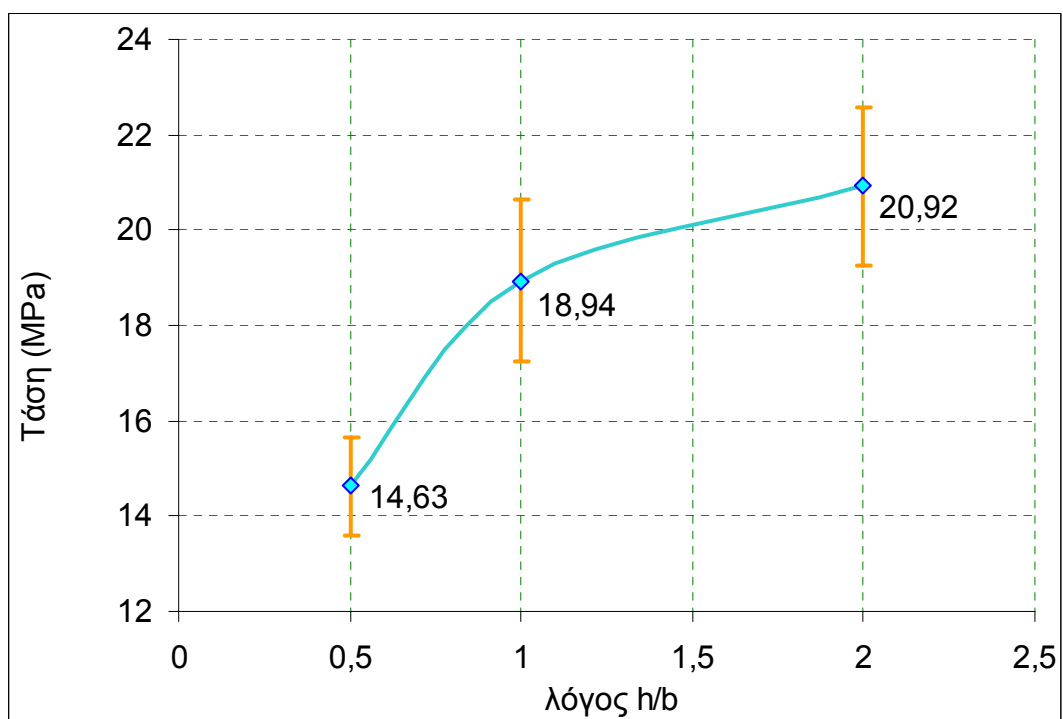
Δοκίμιο	Δύναμη (kN)	Τάση(MPa)
Δ12_1	1,04	18,67
Δ12_2	1,01	16,32
ΔK_E	1,07	20,96
ΔK_M	1,07	18,63
ΔK_L	1,02	18,42
ΔK_N	1,18	20,64
Μέσος Όρος	1,06	18,94
Τοπική Απόκλιση	0,06	1,69

πίνακας 5.17, πίνακας αποτελεσμάτων για δοκίμια με $h=50mm$

Δοκίμιο	Δύναμη (kN)	Τάση(MPa)
Δ20_P	5,09	21,87
Δ20_O	4,59	20,20
Δ20_X	5,18	23,25
Δ20_Y	4,55	20,34
Δ20_U	4,30	18,93
Μέσος Όρος	4,74	20,92
Τοπική Απόκλιση	0,38	1,67



Διάγραμμα 5.13 Φορτίο Θραύσης (kN) - λόγος h/b



Διάγραμμα 5.14 Τάσης (MPa) – λόγος h/b

5.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.

Στα διαγράμματα 5.13 και 5.14 φαίνεται καθαρά η διαφοροποίηση που προκύπτει στην αντοχή του μαρμάρου σε κάμψη τριών σημείων, διατηρώντας το μήκος του l σταθερό και μεταβάλλοντας το ύψος h των δοκιμίων.

Η αντοχή του μαρμάρου σε κάμψη είναι ανάλογη με το ύψος του. Όσο αυξάνεται το ύψος h στα διαγράμματα τόσο αυξάνεται το φορτίο θραύσης και η τάση. Ούτε οι αποκλίσεις μπορούν να μεταβάλλουν τα αποτελέσματα αφού είναι ανάλογα σε όλες τις περιπτώσεις.

Τα συμπεράσματα αυτά ήταν μεν αναμενόμενα αλλά επιβεβαιώνονται και στα πειράματα. Ο λόγος, είναι ότι :

- όσο αυξάνεται το ύψος, αυξάνεται και η επιφάνεια που θα αστοχήσει το δοκίμιο αλλά και η δύναμη που θα χρειαστεί για την θραύση του,
- από τους τύπους της δύναμης και της τάσης, σχέση 5.1, το ύψος h βρίσκεται στον παρονομαστή, κάτι που υποδηλώνει ότι και η δύναμεις που δέχεται το δοκίμιο είναι μικρότερες με την αύξηση του ύψους του.

5.7. ΜΕΛΕΤΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ.

Στην συνέχεια της επεξεργασίας, δουλεύοντας ομοίως με το υποκεφάλαιο 5.3, ομαδοποιούνται τα δοκίμια, από τα οποία κατασκευάζονται οι παρακάτω πίνακες που περιλαμβάνονται :

- από το όνομα του δοκιμίου που εξετάζεται,
- από την μέγιστη δύναμη P_f που δέχτηκαν την στιγμή της θραύσης τους,
- την τάση που προκύπτει από τον τύπο 5.1,
- το μέσο όρο των δύο παραπάνω μεγεθών για όλα τα δοκίμια και την τυπική απόκλιση.

Μετά τους πίνακες κατασκευάζονται τα διαγράμματα Φορτίου Θραύσης (kN) – προσανατολισμό και Τάσης (MPa) – προσανατολισμό, διαγράμματα 5.15-5.16.

Τα διαγράμματα 5.15 και 5.16 κατασκευάζονται από το μέσο όρο του Φορτίου Θραύσης (kN) και της Τάσης (MPa) των δοκιμίων που φαίνονται στους πίνακες 5.15 έως 5.17 με τους αντίστοιχους προσανατολισμούς.

Υπενθυμίζεται ότι το πλάτος b των δοκιμίων παραμένει σταθερό σε όλη την διάρκεια των πειραμάτων και ίσο με 25mm, όπως σταθερός παραμένει και ο ρυθμός φόρτισης τους, 0,001 mm/sec.

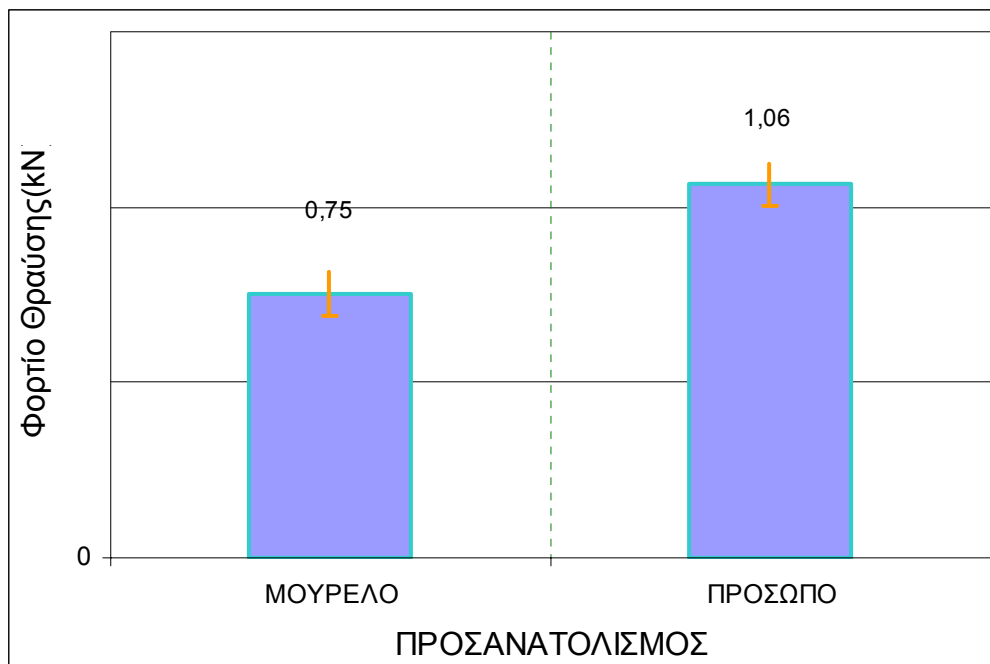
Σκοπός των διαγραμμάτων αυτών είναι η διεξαγωγή συμπερασμάτων, για το πως μεταβάλλεται η αντοχή του μαρμάρου σε κάμψη τριών σημείων, μεταβάλλοντας τον προσανατολισμό του δοκιμίου και διατηρώντας τα υπόλοιπα μεγέθη σταθερά.

Πίνακας 5.18 αποτελεσμάτων με προσανατολισμό προσώπου

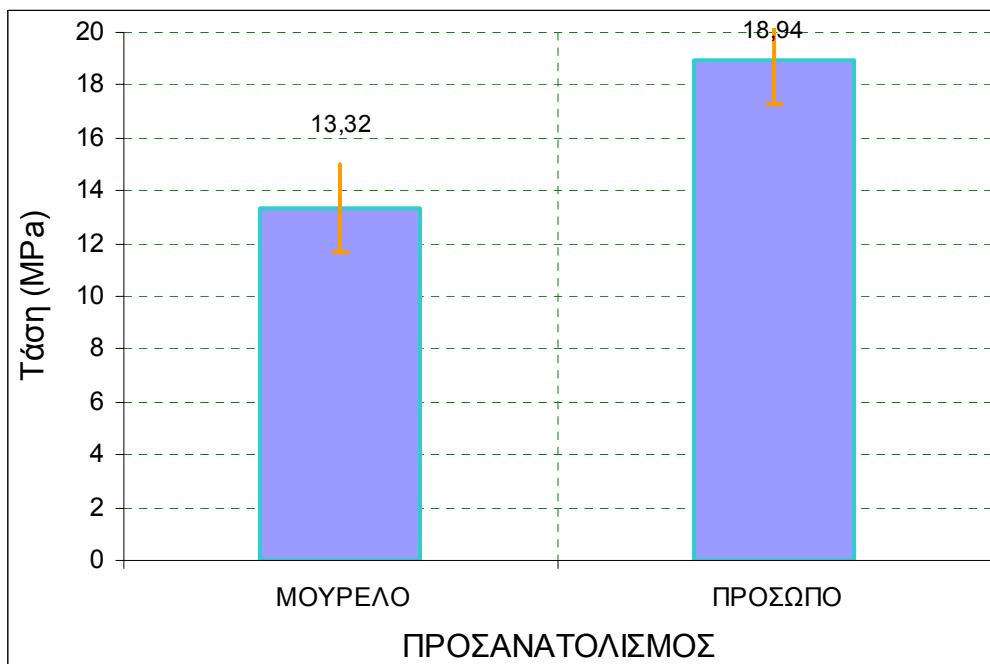
Δοκίμιο	Δύναμη (kN)	Τάση(MPa)
Δ12_1	1,04	18,67
Δ12_2	1,01	16,32
ΔΚ_Ε	1,07	20,96
ΔΚ_Μ	1,07	18,63
ΔΚ_Λ	1,02	18,42
ΔΚ_Ν	1,18	20,64
Μέσος Όρος	1,06	18,94
Τυπική Απόκλιση	0,06	1,69

Πίνακας 5.19, πίνακας αποτελεσμάτων με προσανατολισμό μουρέλου

Δοκίμιο	Δύναμη (kN)	Τάση(MPa)
Δ20_Β	0,77	13,63
Δ20_Δ	0,73	13,51
Δ20_Ε	0,70	12,64
Δ20_Α	0,75	13,28
Δ20_Δ	0,78	14,43
Δ20_Ζ	0,78	12,45
Μέσος Όρος	0,75	13,32
Τυπική Απόκλιση	0,03	0,72



Διάγραμμα 5.15 Φορτίου Θραύσης (kN) – προσανατολισμό



Διάγραμμα 5.16 Τάσης (MPa) – προσανατολισμό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκαν δοκίμια και έγιναν πειράματα κάμψης στο εργαστήριο του τμήματος Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Προγενέστερες διπλωματικές εργασίες και μεταπτυχιακές διατριβές με θέμα κάμψης τριών σημείων βασίζονταν σε μετρήσεις και πειράματα που γίνονταν σε άλλα τμήματα.

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική μελέτη της δοκιμής, προέρχονταν από πρόσφατα εξορυσσόμενους όγκους μαρμάρου Διονύσου του ίδιου νταμαριού και της ίδιας βαθμίδας. Εξαιτίας αυτού, τα τελικά αποτελέσματα της επεξεργασίας δεν έχουν διαφορά μεγαλύτερη του 5%.

Στόχος των πειραμάτων ήταν να κατασκευαστούν δοκίμια έτσι ώστε :

- Να συγκριθεί η αντοχή σε κάμψη τριών σημείων σε δοκίμια μαρμάρου, διατηρώντας τον ίδιο προσανατολισμό και μεταβάλλοντας το μήκος l του δοκιμίου,
- Να συγκριθεί η αντοχή, διατηρώντας τον ίδιο προσανατολισμό και μεταβάλλοντας το ύψος h του δοκιμίου,
- Να συγκριθεί η αντοχή, μεταβάλλοντας τον προσανατολισμό του δοκιμίου από το πρόσωπο στο μουρέλο και διατηρώντας τις διαστάσεις ίδιες.

Στα διαγράμματα 5.11 και 5.12 φαίνεται καθαρά η διαφοροποίηση που προκύπτει στην αντοχή του μαρμάρου σε κάμψη τριών σημείων, διατηρώντας το ύψος h των δοκιμίων σταθερό και μεταβάλλοντας το μήκος του l .

Η αντοχή του μαρμάρου σε κάμψη είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος του. Όσο αυξάνεται το μήκος l στα διαγράμματα τόσο μειώνεται το Φορτίο Θραύσης και η Τάση.

Τα συμπεράσματα αυτά ήταν μεν αναμενόμενα αλλά επιβεβαιώνονται και στα πειράματα, διότι :

- όσο αυξάνεται το μήκος, αυξάνεται και η πιθανότητα να υπάρχουν μικρορωγμές και ατέλειες στο δοκίμιο που μειώνουν την αντοχή του σε μηχανικές δοκιμές,
- από τους τύπους της δύναμης και της τάσης, σχέση 5.1, το μήκος l βρίσκεται στον αριθμητή, κάτι που υποδηλώνει ότι και η δυνάμεις που δέχεται το δοκίμιο είναι μεγαλύτερες με την αύξηση του μήκους του.

Στα διαγράμματα 5.13 και 5.14 φαίνεται καθαρά η διαφοροποίηση που προκύπτει στην αντοχή του μαρμάρου σε κάμψη τριών σημείων, διατηρώντας το μήκος του l σταθερό και μεταβάλλοντας το ύψος h των δοκιμίων.

Η αντοχή του μαρμάρου σε κάμψη είναι ανάλογη με το ύψος του. Όσο αυξάνεται το ύψος h στα διαγράμματα τόσο αυξάνεται το Φορτίο Θραύσης και η Τάση. Τα συμπεράσματα αυτά ήταν μεν αναμενόμενα αλλά επιβεβαιώνονται και στα πειράματα, διότι :

- όσο αυξάνεται το ύψος, αυξάνεται και η επιφάνεια που θα αστοχήσει το δοκίμιο αλλά και η δύναμη που θα χρειαστεί για την θραύση του,
- από τους τύπους της δύναμης και της τάσης, σχέση 5.1, το ύψος h βρίσκεται στον παρονομαστή, κάτι που υποδηλώνει ότι και η δυνάμεις που δέχεται το δοκίμιο είναι μικρότερες με την αύξηση του ύψους του.

Στα διαγράμματα 5.15 και 5.16 φαίνεται καθαρά η διαφοροποίηση που προκύπτει στην αντοχή του μαρμάρου σε κάμψη τριών σημείων, διατηρώντας τις διαστάσεις του δοκιμίου σταθερές και μεταβάλλοντας τον προσανατολισμό τους.

Η αντοχή του μαρμάρου σε κάμψη είναι τείνει να είναι μεγαλύτερη ως προς την διεύθυνση του προσώπου παρά του μουρέλου. Το Φορτίο Θραύσης και η Τάση είναι μεγαλύτερα στην διεύθυνση του προσώπου για να επιτευχθεί η θραύση του δοκιμίου. Τα συμπεράσματα αυτά ήταν μεν αναμενόμενα αλλά επιβεβαιώνονται και στα πειράματα.

Τα δεδομένα που προκύπτουν είναι συγκρίσιμα με αποτελέσματα πειραμάτων άλλων σχολών και εργαστηρίων. Το ευρύτερο αποτέλεσμα των δοκιμών αυτών είναι η δυνατότητα περιγραφής της συμπεριφοράς του

μαρμάρου σε διαφορετικές μορφές καταπόνησης.

Τέλος θα μπορούσε να γίνει και ορυκτολογική μελέτη στα δοκίμια κάμψης μικροσκοπικά. Με την μελέτη αυτή, πιθανώς θα παρατηρούνταν διαφορές στους κρυστάλλους του μαρμάρου, πριν και μετά την θραύση τους, αλλά θα διεξάγονταν και συμπεράσματα για διαφορές στην αντοχή των κρυστάλλων του. Κυρίως όμως θα μπορούσε να απαντηθεί με μεγαλύτερη σιγουριά το τρίτο κομμάτι των πειραμάτων που θα εξηγεί την μεγαλύτερη αντοχή του προσώπου από το μουρέλο.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ASTM, “**Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third Point Loading)**”, designation C 78-02
- ASTM, “**Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens,**” designation C215-02
- Carpinteri A.(1989), “**Decrease of apparent tensile and Bending Strength with specimen size**”, International Journal of Solids and Structures
- Černý, Martin, “**Measurement of elasticity of composite materials reinforced by long fibres or fabric** ”Institute of Rock Structure and Mechanics, ASCR, V Holešovičkách 41, 189 09 Prague 8, Czech Republic
- Exadaktylos, G.E. and Kourkoulis, S.K., (2002). “**Three-Point Bending of Transversely Isotropic Rock-Type Materials: An Analytical, Numerical and Experimental Study**”, 4th GRACM, Patra, Hellas.
- Gere, J.M. and Timoshenko, S.P., (1997). “**Mechanics of Materials**”, 4th Edition, PWS Publishing Company, Boston, USA.
- Kourkoulis, S.K., Exadaktylos, G.E. and Vardoulakis, I., (1999). “**U-Notched Dionysos-Pentelicon Marble Beams in Three Point Bending: The Effect of Nonlinearity, Anisotropy and Microstructure**”, International Journal of Fracture 98:
- Lama R.D & Vutukuri V.S., (1974) “**Handbook on Mechanical Properties of Rocks**”, Testing Techniques and Results
- ONAL, “**Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete**”, designation C 1399-04
- Timoshenko, S., (1986). “**Strength of Materials: Part 1, Elementary Theory and Problems**”, 3rd Edition, CBS Publishers and Distributors, Delhi, India.
- Timoshenko, S., (1986). “**Strength of Materials: Part 2, Advanced Theory and Problems**”, 3rd Edition, CBS Publishers and Distributors, Delhi, India.
- Timoshenko, S.P., Goodier, J.N., (1970). “**Theory of Elasticity**”, 3rd Edition, McGraw-Hill International Editions.

- Vardoulakis, I., Exadaktylos, G.E., Kourkoulis, S.K., (2001). **“Size Effect on Failure Load of Marble Beams Under Three Point Bending”**, 6th Congress of Mechanics, Vol. II (Aifantis & Kounadis Eds.), Thessaloniki, July 19-21, pp. 140-148.
- Yavuz a,*, N. Turk b, M.Y. Koca b **“Material properties of the Menderes Massif Marbles from SW Turkey a Torbalı”** Vocational School of Higher Education, Dokuz Eylü l University, 35860, Torbalı/I zmir, Turkey

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Εξαδάκτυλος, Ε. Γεώργιος, (2006). **Σχεδιασμός Γεωτεχνικών και Λατομικών Έργων**, Σημειώσεις Διδασκαλίας, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Πρασιανάκης Ι.Ν. (1985). **Μηχανική ΙΙ : Κινηματική και Δυναμική του υλικού σημείου και του απόλυτα στερεού σώματος**
- Πρασιανάκης Ι.Ν. (1986). **Μηχανική ΙΙΙ : μηχανική παραμορφωσίμων σωμάτων αντοχή των υλικών**
- Πρασιανάκης Ι.Ν., Μηλιός Ι.Γ. (1987). **Εργαστήρια πειραματικής αντοχής των υλικών**
- Πρασιανάκης Ι.Ν., Μηλιός Ι.Γ. (1987). **Σημειώσεις πειραματική αντοχή των υλικών**
- Πρασιανάκης Ι.Ν., Μηλιός Ι.Γ., Κωνσταντέλλος Β. (1988). **Πειραματική αντοχή των υλικών.**