

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΠΟΠΤΗΣ : Σ. ΚΟΛΙΑΣ

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ
ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΑΠΟ
ΘΡΥΜΜΑΤΙΣΜΕΝΟ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑ
ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΟ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΑΒΡΙΗΛ ΒΑΓΔΑΤΛΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 1992

Στους Γονείς μου

Ευχαριστούμε την Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος στο εργαστήριο της οποίας πραγματοποιήθηκε το μεγαλύτερο μέρος της πειραματικής εργασίας.

Επίσης το Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος στο οποίο εκτελέστηκαν τα πειράματα του ηλεκτροδυναμικού μέτρου ελαστικότητας και των υπερήχων.

Απεριόριστες ευχαριστίες εκφράζονται στον κύριο Στέλιο Κόλια , Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για τη συνεχή καθοδήγηση και την απεριόριστη συμπαράστασή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Επίσης εκφράζονται ευχαριστίες στην Πολιτικό Μηχανικό Αργυρώ Φίλιου για τη σημαντική της βοήθεια στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Σ Υ Ν Ο Ψ Η

Στην εργασία αυτή εξετάζονται οι μηχανικές ιδιότητες μιγμάτων θρυμματισμένου ασφαλτομίγματος και θραυστού αμμοχάλικου, κατεργασμένων με τσιμέντο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανακατασκευή και ενίσχυση παλαιών οδοστρωμάτων. Ερευνάται η αντοχή σε θλίψη, η αντοχή σε διάρρηξη, η αντοχή σε κάμψη, το στατικό και δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, ο στατικός λόγος τους Poisson και η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων. Η εργασία συμπληρώνεται με ανάλυση οδοστρώματος με τη βοήθεια H/Y, κατά την οποία εξετάστηκαν διάφορες τιμές του πάχους και του μέτρου ελαστικότητας της σταθεροποιημένης με τσιμέντο στρώσης.

Τα αποτελέσματα είναι πολύ ενθαρρυντικά και δείχνουν ότι μπορεί να παραχθεί ένα καινούργιο υλικό με πολύ αξιόλογες μηχανικές ιδιότητες από το θρυμματισμένο ασφατικό υλικό των οδοστρωμάτων μαζί με αμμοχάλικο.

A B S T R A C T

The present diploma thesis examines the mechanical properties of mixtures with milled bituminous mixes and crushed aggregates bound with cement that can be used in reconstruction and improvement of old pavements. Therefore compressive strength, splitting strength, bending strength, static and dynamic moduli of elasticity, static Poisson's ratio and ultrasonic pulse velocity are measured. This experimental work is supplemented by analysis of the pavement stresses using a linear multi elastic layer computer Program and various values of modulus of Elasticity and Strength in accordance with the values determined in the experimental port.

The results are promising and show that a new material with very interesting mechanical properties is produced by treating with cement old milled bituminous pavement layers, together with aggregates.

Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μια προσπάθεια να ερευνηθούν οι μηχανικές ιδιότητες των μιγμάτων θρυμματισμένου ασφαλτομίγματος και αμμοχάλικου θραυστού όταν κατεργαστούν με τσιμέντο.

Στα πρώτα κεφάλαια γίνεται εκτενής αναφορά στη σταθεροποίηση των υλικών και στις εφαρμογές της στην κατασκευή των οδοστρωμάτων.

Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται για το μέτρο ελαστικότητας, που θεωρείται το θεμελιώδες μηχανικό χαρακτηριστικό των σταθεροποιημένων με τσιμέντο υλικών. Γίνεται επίσης μια προσπάθεια προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας σύμφωνα με τις θεωρίες που δέχονται την ύπαρξη δύο ή τριών φάσεων στην συμπεριφορά τέτοιου είδους υλικών.

Στο πειραματικό μέρος πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές για να εξεταστεί η συμπεριφορά των μιγμάτων θρυμματισμένου ασφαλτομίγματος και αμμοχάλικου κάτω από διάφορες καταπονήσεις.

Στην Ελλάδα το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων κυμαίνεται από 4 έως 15 cm συνήθως. Επομένως η κατασκευή σταθεροποιημένων στρώσεων μόνο από το υλικό της ασφαλτικής στρώσης δεν είναι δυνατή, διότι το πάχος τους είναι περιορισμένο. Συνεπώς η ανακύκλωση πρέπει να επεκταθεί και στις υποκείμενες στρώσεις από ασύνδετο αμμοχάλικο σε τέτοιο βάθος που μπορεί να γίνει αναμόχλευση από τα κατάλληλα μηχανήματα (έως 30cm). Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή σε πολλές χώρες του εξωτερικού και ελπίζεται ότι θα αναπτυχθεί σύντομα και στην Ελλάδα. Στην εργασία αυτή, έγινε προσπάθεια προσομοίωσης των διαφόρων μιγμάτων που αντιστοιχούν σε διάφορα βάθη ανακύκλωσης

παλαιών οδοστρωμάτων.

Οι μηχανικές ιδιότητες που ερευνήθηκαν κατά κύριο λόγο ήταν η αντοχή σε θλίψη, η αντοχή σε διάρρηξη, η αντοχή σε κάμψη, το στατικό και δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, ο στατικός λόγος του Poisson και η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων.

Η έρευνα έδειξε ότι οι αντοχές μειώνονται όσο αυξάνεται το περιεχόμενο ασφαλικό υλικό, αλλά ικανοποιητικές αντοχές υπήρξαν και στην περίπτωση του καθαρού ασφαλικού υλικού.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων, στα οποία εμφανίζονται χαρακτηριστικά σημεία όπου παρουσιάζεται αλλαγή κλίσης της καμπύλης, φαινόμενο που συναντάται σε όλα τα αναμίγματα που περιέχουν ασφαλικό υλικό.

Πραγματοποιήθηκε επίσης σε H/Y ανάλυση οδοστρώματος που περιλαμβάνει σταθεροποιημένη με τσιμέντο στρώση και προσδιορίστηκε η αναπτυσσόμενη εφελκυστική τάση στον πυθμένα της σταθεροποιημένης στρώσης για διάφορες τιμές του πάχους και του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης αυτής και για δύο κατηγορίες εδαφών έδρασης.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος της κατεργασίας με τσιμέντο μιγμάτων θρυμματισμένου ασφατομίγματος και θραυστού αμμοχάλικου μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή στρώσεων οδοστρωμάτων με ικανοποιητικά αποτελέσματα και μεγάλη οικονομία, αλλά απαιτείται συμπληρωματική έρευνα σε μεγαλύτερο βάθος για την πληρέστερη θεωρητική αξιολόγηση των υλικών αυτών σαν υλικών οδοποιίας.

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

σελίδα

1. ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ	1
1.2. ΕΙΔΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ	2
1.2.1. Σταθεροποίηση με ασβέστη	2
1.2.2. Σταθεροποίηση με άσφαλτο	4
1.2.3. Σταθεροποίηση με υδραυλικές κονίες	5
1.2.3.1. Σταθεροποίησης με ιπτάμενη τέφρα-ασβέστη	5
1.3. ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ	
1.3.1. Γενικά	7
1.3.2. Εδάφη που σταθεροποιούνται με τσιμέντο	9
1.3.3. Πεδίο εφαρμογής των σταθεροποιημένων με τσιμέντο υλικών	10
1.3.4. Κριτήρια για την επιλογή σταθεροποιημένων με τσιμέντο στρώσεων στην κατασκευή οδοστρωμάτων	11

2. Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΛΙΚΩΝ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ	14
2.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ	18
2.3. ΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΛΙΚΩΝ	
2.3.1. Η αντοχή σε θλίψη	25
2.3.2. Η αντοχή σε εφελκυσμό	27
2.3.2.1. Η δοκιμή της κάμψης	27
2.3.3. Μέτρο ελαστικότητας	30
2.3.4. Λόγος του Poisson	30
2.3.5. Αντοχή σε κόπωση	30

3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

32

4. ΠΕΡΙ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΛΙΚΩΝ

4.1. ΓΕΝΙΚΑ	41
4.2. ΟΡΙΣΜΟΙ	42
4.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ	43
4.4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	44
4.5. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	47

4.5.1. Μέθοδος της ιδιοσυχνότητας	47
4.5.1.1. Εξοπλισμός και διαδικασία της δοκιμής	50
4.5.2. Μέθοδος των υπερήχων	52
4.6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΩΝ ΟΠΟΙΩΝ Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΤΑΙ ΑΠΟ ΔΥΟ Η ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΕΣ ΦΑΣΕΙΣ	
4.6.1. Γενικά	53
4.6.2. Τα βασικά μοντέλα δύο φάσεων	55
4.6.2.1. Μοντέλο Reuss	55
4.6.2.2. Μοντέλο Voigt	56
4.6.3. Σύγκριση μοντέλων Reuss-Voigt	57
4.6.4. Επιπρόσθετα μοντέλα υλικών δύο φάσεων	59
4.6.4.1. Μοντέλο Hirsch	59
4.6.4.2. Μοντέλο Counto	60
4.6.4.3. Μοντέλο Hashin	61
4.6.5. Δεσμοί μεταξύ αδρανών και τσιμεντοπολτού	62
4.6.6. Συμπεράσματα	64
4.7. ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΡΙΩΝ ΦΑΣΕΩΝ	66

5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

5.1. ΓΕΝΙΚΑ	71
5.2. ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ	72
5.3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ	73
5.3.1. Ηλεκτρικά μηχανοσυστοιχίες με επαγωγή (L.V.D.T.) ...	73
5.3.2. Ηλεκτρικά μηχανοσυστοιχίες με χωρητικότητα	74
5.3.3. Πιεζοηλεκτρικά ηλεκτρομηχανοσυστοιχίες	74
5.4. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ ΜΕ ΩΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Strain- gauges)	
5.4.1. Γενικά	75
5.4.2. Είδη ηλεκτρομηχανοσυστοιχιών με ωμική αντίσταση ...	76
5.4.3. Υλικά εσχάρας	77
5.4.4. Υλικά στήριξης εσχάρας και συνδέσμου εσχάρας-στήριξης. Περίβλημα ηλεκτρομηχανοσυστοιχίας	78
5.4.5. Διαμορφώσεις ηλεκτρομηχανοσυστοιχιών	80
5.4.6. Σχέσεις που ισχύουν στο ηλεκτρομηχανοσυστοιχία ...	82
5.4.7. Βαθμονόμηση του ηλεκτρομηχανοσυστοιχίας	84
5.5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	
5.5.1. Γενικά	86
5.5.2. Στοιχεία των ηλεκτρομηχανοσυστοιχιών που χρησιμοποιήθηκαν	87
5.5.3. Βαθμονόμηση των ηλεκτρομηχανοσυστοιχιών I, II	88

6. ΥΛΙΚΑ - ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ - ΔΟΚΙΜΕΣ

6.1. ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	91
6.2. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΝΑΛΟΓΙΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ..	92
6.3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΗΣΗΣ	92

6.4. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ-ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΕΩΣ	99
6.4.1. Πειραματική διαδικασία	100
6.5. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	
6.5.1. Ανάμιξη	102
6.5.2. Συμπύκνωση	103
6.5.3. Συντήρηση	104
6.6. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	
6.6.1. Δοκιμή θλίψης	104
6.6.2. Δοκιμή διάρρηξης	105
6.6.3. Δοκιμή κάμψης	108
6.6.4. Δοκιμή σε θλίψη ισοδύναμων κύβων (equivalent cube test)	110
6.7. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ POISSON ΣΕ ΘΛΙΨΗ	111
6.8. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΡΠΥΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ	113
6.9. ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ	114
 7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	
7.1. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΑΝΑΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	118
7.2. ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΕΩΣ	119
7.3. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ	123
7.3.1. Σχολιασμός αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης. Σύγκριση με άλλες έρευνες	126
7.4. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗ ΘΛΙΨΗ (Διάρρηξη)	127
7.4.1. Σχόλια	132
7.5. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΚΑΙ ΘΛΙΨΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΩΝ ΚΥΒΩΝ	133
7.5.1. Σχόλια	139
7.6. ΣΤΑΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΛΟΓΟΣ POISSON	142
7.6.1. Σχόλια	144
7.7. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ, ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ-ΤΑΣΕΩΣ, ΛΟΓΟΥ POISSON - ΤΑΣΕΩΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΕΡΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ	146
7.7.1. Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων	146
7.7.1.1. Κατηγορία 100% Αμμοχάλικο	146
7.7.1.2. Κατηγορία 100% Ασφαλτικό Υλικό	152
7.7.1.3. Κατηγορία 25% Ασφαλτικό Υλικό-75% Αμμοχάλικο	158
7.7.1.4. Κατηγορία 50% Ασφαλτικό Υλικό-50% Αμμοχάλικο	162
7.7.1.5. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων μέχρι θραύσεως	166
7.7.1.6. Σύγκριση - Συμπεράσματα	171
7.7.2. Μέτρο ελαστικότητας	172
7.7.2.1. Κατηγορία 100% Αμμοχάλικο	172
7.7.2.2. Κατηγορία 100% Ασφαλτικό Υλικό	177
7.7.2.3. Κατηγορία 25% Ασφαλτικό Υλικό-75% Αμμοχάλικο	182
7.7.2.4. Σύγκριση - Συμπεράσματα	186
7.7.3. Λόγος Poisson	188
7.8. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΤΡΟ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	193

7.9. ΗΛΕΚΤΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ	196
7.10. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΤΩΝ ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	199
7.11. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΡΗΥΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	205
7.12. ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ	208
 8. ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	 210
 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	
9.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	215
9.2. ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΣΥΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	217

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

Σταθεροποίηση εδαφικών υλικών

1. ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Με τον όρο σταθεροποίηση εδαφικού υλικού, εννοούμε κάθε μηχανική ή χημική διεργασία που έχει σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους.

Τα κυριότερα είδη της σταθεροποίησης είναι τα ακόλουθα :

- Σταθεροποίηση με συμύκνωση
- Μηχανική σταθεροποίηση με ανάμιξη δύο ή περισσότερων υλικών
- Χημική σταθεροποίηση με πρόσθετα υλικά, τα οποία ονομάζονται σταθεροποιητές.

Από τα πρώτα ιστορικά χρόνια είναι γνωστές οι προσπάθειες του ανθρώπου για να βελτιώσει τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Βλέπουμε παραδείγματα χημικής σταθεροποίησης με τη χρήση προσθέτων, όπως είναι η άσβεστος και οι ποζολάνες. Παρά το γεγονός όμως ότι ήταν γνωστές οι βασικές αρχές του χημικού τρόπου σταθεροποίησης, μόνο τα τελευταία 50 χρόνια έγινε ευρεία ανάπτυξη και συστηματική εφαρμογή της.

Η χημική σταθεροποίηση έχει ευρύ πεδίο εφαρμογής. Ιδιαίτερα μεγάλη αξιοποίηση έχει στον τομέα της οδοποιίας. Σταθεροποιημένο φυσικό υλικό, χρησιμοποιείται για βελτίωση οδοστρωμάτων. Για οδούς όχι βαρειάς κυκλοφορίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως στρώση βάσης.

Σταθεροποιημένο θραυστό υλικό (αμμοχάλικο) χρησιμοποιείται ως βάση σε οδούς υψηλής κυκλοφορίας.

Ο χημικός τρόπος σταθεροποίησης εφαρμόζεται ακόμα στην προστασία των πρανών των φραγμάτων και των επιχωμάτων, στους ανοικτούς αγωγούς μεταφοράς νερού και στη θεμελίωση πολύ μεγάλων κατασκευών.

1.2. ΕΙΔΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

1.2.1. Σταθεροποίηση με ασβέστη

Η χρήση της ασβέστου ως χημικού σταθεροποιητή είναι γνωστή από την εποχή της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας από την οποία έχουμε παραδείγματα εφαρμογής της στην κατασκευή οδών.

Η σταθεροποίηση με ασβέστη χρησιμοποιείται σε λεπτόκοικα αργιλικά εδάφη με μέτρια ή μεγάλη πλαστικότητα και σε διογκούμενα αργιλικά εδάφη. Είναι επιθυμητό να υπάρχει περιεκτικότητα σε άργιλο μεγαλύτερη από 10% και δείκτης πλαστικότητας μεγαλύτερος από 10.

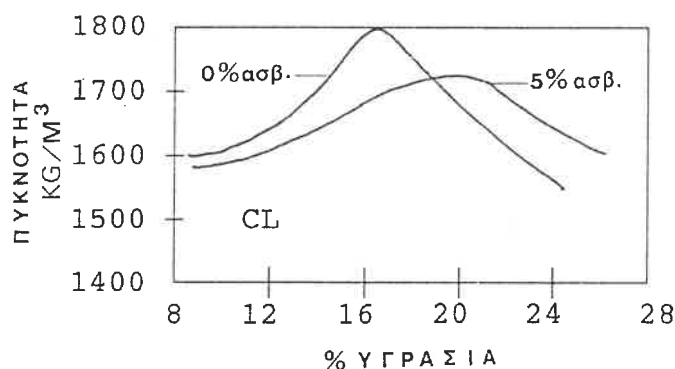
Τα εδάφη που σταθεροποιούνται με ασβέστη σύμφωνα με την κατάταξη AASHTO ανήκουν στις κατηγορίες A-4, A-5, A-6, A-7 και μερικά από τις A-2-6 και A-2-7. Σύμφωνα με το ενοποιημένο σύστημα κατάταξης εδαφών τα εδάφη που μπορούν να σταθεροποιηθούν με αυτή τη μέθοδο είναι :

CH, CL, MH, ML, SC, SM, GC, GM, SW-SC, SP-SC, SM-SC, GW-GC, GP-GC ή GM-GC.

Η χημική σταθεροποίηση με ασβέστη χρησιμοποιείται περισσότερο για την κατασκευή στρώσεων έδρασης ή στρώσεων επιχωμάτων και λιγότερο για στρώσεις βάσεων και υποβάσεων σε δρόμους με μικρή κυκλοφορία.

Τα αποτελέσματα της χημικής κατεργασίας των εδαφών με το υδροξείδιο του ασβεστίου $[Ca(OH)_2]$ σε μορφή σκόνης, που είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιήσιμο είδος ασβέστου, είναι : (5)

- α) Αύξηση της βέλτιστης υγρασίας για τη συμπύκνωση. Μπορούν δηλ. να συμπυκνωθούν εδάφη, στα οποία η φυσική τους υγρασία είναι μεγαλύτερη από τη βέλτιστη.



- β) Αύξηση του ορίου πλαστικότητας PL, που σημαίνει αύξηση του ορίου υγρασίας, μέχρι το οποίο το υλικό έχει σχετικά μικρή παραμορφωσιμότητα, δηλ. αυξημένη φέρουσα ικανότητα.
- γ) Σε πολλές περιπτώσεις μείωση του δείκτη πλαστικότητας PI.
- δ) Βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους όπως CBR, αντοχή, μέτρο ελαστικότητας.

1.2.2. Σταθεροποίηση με ασφάλτο

Η χρησιμοποίηση της ασφάλτου ως συνδετικό υλικό είναι γνωστή από την 3η π.Χ. χιλιετηρίδα από την οποία έχουμε παραδείγματα χρησιμοποίησης της σε οικοδομικές κατασκευές και κατασκευές οδοποιίας.⁽³⁾

Με την προσθήκη ασφάλτου σε εδαφικά υλικά πετυχαίνουμε :

- ενίσχυση μη συνεκτικών κοκκίων εδαφών, με την σύνδεση των εδαφικών κόκκων μεταξύ τους.
- στα συνεκτικά υλικά εξασφαλίζουμε την μη διαπερότητα με την μερική ή ολική κάλυψη των κόκκων του υλικού από ασφάλτο.

Για να είναι επιτυχής η σταθεροποίηση με ασφάλτο θα πρέπει τα εδάφη να έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- ποσοστό εδαφικού υλικού που διέρχεται από το κόσκινο No 200 μικρότερο από 25%
- δείκτης πλαστικότητας μικρότερος από 6 ($PI < 6$)
- ισοδύναμο άμμου μικρότερο από 30

Τα εδάφη στα οποία είναι δυνατή η σταθεροποίηση με ασφάλτο κατά το σύστημα AASHTO είναι τα εξής : A-1-2, A-I-b, A-2-4, A-2-6, A-3, A-4 και A-6 με χαμηλή πλαστικότητα. Κατά το ενοποιημένο σύστημα είναι τα SW, SP, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SM, SC, SM-SC, GW, GP, GW-GM, GP-SM, GW-GB, GP-GC, GC, CM-GC.

1.2.3. Σταθεροποίηση με υδραυλικές κονίες

Η κατεργασία του εδαφικού υλικού με υδραυλικές κονίες βελτιώνει τα μηχανικά του χαρακτηριστικά και το καθιστά ικανό να χρησιμοποιηθεί σε στρώσεις οδοστρωμάτων. Τα αποτελέσματα της κατεργασίας αυτής ποικίλουν και εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του υλικού, τον τύπο της χρησιμοποιούμενης κονίας, τις αναλογίες σύνθεσης και τις μεθόδους κατασκευής.

Οι υδραυλικές κονίες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι : το τσιμέντο , η ιπτάμενη τέφρα σε συνδυασμό με ασβέστη και οι σκωρίες.

Όσον αφορά τις σκωρίες, επειδή στη χώρα μας δεν υπάρχουν τρόποι παραγωγής τους σε μεγάλες ποσότητες, η χρήση τους ως υδραυλικές κονίες είναι ανύπαρκτη, και δεν εξετάζεται η δράση τους παρακάτω.

1.2.3.1. Σταθεροποίηση με ιπτάμενη τέφρα-ασβέστη

Η ιπτάμενη τέφρα προέρχεται από την καύση του άνθρακα λιγνίτη και παρόμοιων υλικών και συλλέγεται υπό μορφή σκόνης από τις καπνοδόχους των εργοστασίων με διάφορα μηχανικά μέσα. Η ιπτάμενη τέφρα είναι πολύ λεπτόκοκκο υλικό και μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί και ως παιπάλη, με σκοπό τη μείωση των κενών του αέρα μέσα στο φυσικό έδαφος.

Το κυριώτερο παράγωγο που προκύπτει κατά την προσθήκη ασβέστη-ιπτάμενης τέφρας στο έδαφος είναι το ένυδρο πυριτικό ασβέστιο.

Οι αντιδράσεις εδάφους-ασβέστη-ιπτάμενης τέφρας είναι :

- ανταλλαγή κατιόντων
- κροκίδωση-συσσωμάτωση
- ποζολανική αντίδραση

Οι δύο πρώτες αντιδράσεις γίνονται πολύ γρήγορα και μειώνουν την πλαστικότητα των λεπτόκοκκων υλικών, με αποτέλεσμα την βελτίωση της εργασιμότητάς τους. Η ποζολανική αντίδραση επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως είναι : οι αναλογίες των υλικών, η περιεχόμενη υγρασία, η πυκνότητα και η θερμοκρασία συντήρησης.

Για να είναι επιτυχής η χημική αντίδραση μεταξύ εδάφους-ασβέστη-ιπτάμενης τέφρας και νερού, θα πρέπει το έδαφος να μην περιέχει οργανικές προσμίξεις, αλλά να αποτελείται από σκληρά, ανθεκτικά, μη αποσυντιθεμένα μόρια.

Η σταθεροποίηση των εδαφών με την χρήση ασβέστη-ιπτάμενης τέφρας είναι οικονομική και εφαρμόσιμη στις παρακάτω περιπτώσεις :

- για βάσεις σε δευτερεύοντες δρόμους, χώρους στάθμευσης, όπου δεν προβλέπεται βαριά κυκλοφορία.
- για υποβάσεις και συμβατικά οδοστρώματα
- για βελτίωση υπεδάφους.

Οι κατάλληλες ποσότητες ασβέστη και ιπτάμενης τέφρας καθορίζονται έτσι ώστε το μίγμα να έχει επαρκή αντοχή και ανθεκτικότητα στις διάφορες κλιματολογικές συνθήκες, να μπορεί να διαστρώνεται και να συμπυκνώνεται εύκολα και να είναι οικονομικό.

Τυπικές αναλογίες είναι :

- ασβέστης 2÷4%
- ιπτάμενη τέφρα 10÷15%

Οποσδήποτε είναι απαραίτητες οι εργαστηριακές δοκιμές για τον καθορισμό των τυπικών αναλογιών. Πολλές φορές για την επιτάχυνση της αντίδρασης ασβέστη-ιπτάμενης τέφρας-εδάφους, χρησιμοποιούνται διάφορα χημικά πρόσθετα όπως : ενώσεις νατρίου (NaOH) 1÷2% και τσιμέντο Portland 0,5÷1,5%.

1.3. ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

1.3.1. Γενικά

Το τσιμέντο στη σημερινή εποχή είναι ο πλέον διαδεδομένος και κατάλληλος σταθεροποιητής και μπορεί να δράσει και στα συνεκτικά και στα κοκκώδη εδάφη. (3)

Στα συνεκτικά εδάφη η ενυδάτωση του τσιμέντου δημιουργεί ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των κόκκων του υλικού, υπό μορφή δικτυώματος στο χώρο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του εδάφους και τη μείωση της πλαστικότητας του.

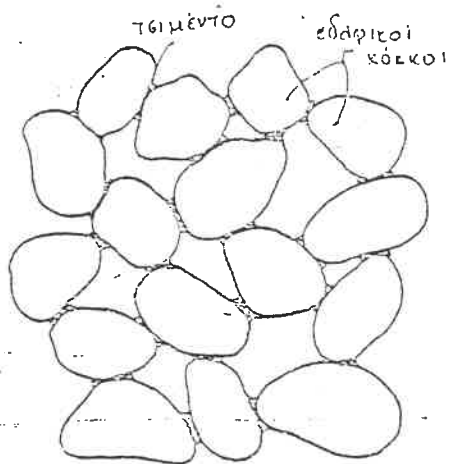
Επίσης το γεγονός του εγκλεισμού ενός μεγάλου μέρους των κόκκων μέσα στο κυψελωτό αυτό οικοδόμημα έχει σαν συνέπεια την παρεμπόδιση της διαστολής και την αύξηση της ανθεκτικότητας του εδάφους έναντι της δράσεως του παγετού.

Κατά τη σταθεροποίηση με τσιμέντο, πραγματοποιείται ποζολανική αντίδραση μεταξύ της ασβέστου που ελευθερώνεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου και της περιεχόμενης στο έδαφος αργίλλου, σχηματίζοντας έτσι ένυδρο πυριτικό ασβέστιο.

Από τη χημική αυτή αντίδραση προκύπτει :

- μείωση της υδροφιλίας των κόκκων της αργίλλου , δηλ. της τάσης που έχουν οι κόκκοι να έλκουν νερό
- δημιουργία συσσωματωμάτων
- ανάπτυξη δεσμών μεταξύ των κόκκων του εδαφικού υλικού.

Στα κοκκώδη εδάφη η δράση του τσιμέντου είναι παρόμοια



μ' αυτή στο σκυρόδεμα, μόνο που εδώ το τσιμέντο δεν γεμίζει τα κενά που υπάρχουν μεταξύ των κόκκων, αλλά συγκεντρώνεται στα σημεία επαφής των κόκκων, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα. (16)

Επομένως όσο πιο καλά διαβαθμισμένο είναι το υλικό, τόσο λιγότερα κενά μεταξύ των κόκκων παρουσιάζει και τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των σημείων επαφής, με αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση της σταθεροποίησης.

1.3.2. Εδάφη που σταθεροποιούνται με τσιμέντο

Ενα ευρύ φάσμα εδαφών μπορούν να σταθεροποιηθούν με τη χρήση τσιμέντου. Για τα κοκκώδη εδάφη ο δείκτης πλαστικότητας πρέπει να είναι μικρότερος από 30 ($PI < 30$), ενώ για τα εδάφη με μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού πρέπει ο δείκτης πλαστικότητας να είναι μικρότερος από 20 ($PI < 20$) και το όριο υδαρότητας μικρότερο από 40 ($LL < 40$).

Αν έχουμε μεγάλες τιμές του δείκτη πλαστικότητας τότε προηγείται κατεργασία με ασβέστη για να ελαττωθεί η πλαστικότητα και να αυξηθεί η εργασιμότητα και στη συνέχεια ακολουθεί η κατεργασία με τσιμέντο.

Η παρουσία θειικών αλάτων γενικώς επιδρά δυσμενώς στην ποιότητα του σταθεροποιημένου με τσιμέντο υλικού. Στα λεπτόκοκκα εδάφη η παρουσία θειικών αλάτων σε ποσοστό μεγαλύτερο από 1% καθιστά απαγορευτική την χρήση τσιμέντου ως σταθεροποιητή.

Τα εδάφη που έχουν τα καλύτερα αποτελέσματα όταν σταθεροποιούνται με τσιμέντο σύμφωνα με το σύστημα AASHTO είναι τα A-1, A-2, A-3 και σύμφωνα με το ενοποιημένο σύστημα τα (G-), (S-).

1.3.3. Πεδίο εφαρμογής των σταθεροποιημένων με τσιμέντο υλικών

Το πεδίο εφαρμογής στην τεχνολογία κατασκευής οδοστρωμάτων είναι συνοπτικά το εξής : (2)

- κατασκευή επιχωμάτων : η κατεργασία με τσιμέντο γίνεται ώστε εδάφη με χαμηλή φέρουσα ικανότητα, όπως είναι τα ευαίσθητα σε υγρασία εδάφη, να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή επιχωμάτων.
- κατασκευή στρώσεως εδράσεως : όταν τα χαρακτηριστικά των εδαφών ή κλιματολογικές ή τοπικές συνθήκες το απαιτούν, τότε η αναβάθμιση και η σταθεροποίηση της επάνω στρώσης του εδαφικού υλικού είναι απαραίτητη, ώστε να επιτευχθεί ομογενοποίηση , βελτίωση της αντίστασης σε υγρασία και παγετό και να περιορισθεί στο ελάχιστο η επιρροή της κυκλοφορίας στη φάση κατασκευής και αργότερα στη φάση λειτουργίας.
- κατασκευή στρώσεων βάσεως και υποβάσεως οδοστρωμάτων : η σταθεροποίηση με τσιμέντο υψηλής ή χαμηλής ποιότητας αδρανών χρησιμοποιείται κάθε φορά αναλόγως των τοπικών περιβαλλοντικών συνθηκών, των οικονομικών δυνατοτήτων και των απαιτήσεων σε αυξημένη φέρουσα ικανότητα.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις η εκλογή της μελέτης συνθέσεως εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους ή του υλικού που είναι διαθέσιμο, την περιεκτικότητα σε υγρασία και την περίοδο του έτους που γίνεται η κατασκευή.

1.3.4. Κριτήρια για την επιλογή σταθεροποιημένων με τσιμέντο στρώσεων στην κατασκευή οδοστρωμάτων

Οι παράγοντες που παίζουν ρόλο στην επιλογή σταθεροποιημένων με τσιμέντο στρώσεων είναι οι τεχνικές και οικονομικές απαιτήσεις με παραμέτρους, τις τοπικές συνθήκες (κλίμα, φορτία κυκλοφορίας), τη φύση του υπεδάφους, την προσφορά σε υλικά, τις οικολογικές ανησυχίες κ.α.

Οι σταθεροποιημένες στρώσεις, που είναι κατασκευασμένες από αδρανή υψηλής ποιότητας, παρουσιάζουν σημαντική αύξηση στη φέρουσα ικανότητα, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του φορτίου κυκλοφορίας, υπό την προϋπόθεση της ορθής διαστασιολόγησης. Μιά μικρή αύξηση στο πάχος μιάς τέτοιας στρώσης προκαλεί πάρα πολύ μεγάλη αύξηση στην φέρουσα ικανότητα κυκλοφοριακού φορτίου. Αυτό αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα, αλλά απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και φροντίδα στη φάση κατασκευής.

Οι υψηλές μηχανικές ικανότητες των σταθεροποιημένων με τσιμέντο υλικών για μιά δεδομένη κυκλοφορία επιτρέπουν τη μείωση της ποσότητας των ασφαλικών υλικών, τα οποία

χρησιμοποιούνται στα εύκαμπτα οδοστρώματα. Σε διάφορες χώρες έχουν καθοριστεί όρια στην χρήση ασφαλικών υλικών για στρώσεις οδοστρωμάτων, ώστε να περιοριστεί η εισαγωγή των παραγώγων του πετρελαίου που επιβαρύνει την οικονομία της χώρας. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε ευρύτερη εφαρμογή των σταθεροποιημένων με τσιμέντο στρώσεων. (4)

Ενα άλλο πλεονέκτημα που προσφέρει η ακαμψία των σταθεροποιημένων με τσιμέντο υλικών είναι το γεγονός ότι διαδίδουν τα κυκλοφοριακά φορτία σε ένα ευρύτερο πεδίο, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι κατακόρυφες τάσεις και παραμορφώσεις που καταπονούν τη στρώση έδρασης σε όλες τις εποχές του έτους. Αυτό επιτρέπει σε πολύ φτωχά εδαφικά υλικά να μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μεγαλύτερη επιτυχία, με την προϋπόθεση ότι αποφεύγεται η υπερβολική καταπόνηση των σταθεροποιημένων στρώσεων και η συμπύκνωσή τους δεν επηρεάζεται από τη χαμηλή φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους.

Για μεγάλο όγκο κυκλοφορίας, που παραδοσιακά χρησιμοποιούνται αδρανή υψηλής ποιότητας, η απόφαση της χρησιμοποίησης σταθεροποιημένων υλικών στη θέση των ασύνδετων αδρανών, για την κατασκευή υποβάσεων και βάσεων, εξαρτάται από το πόσο χαμηλή είναι η ακαμψία της βάσεως. Ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων βαριάς κυκλοφορίας απαιτεί σχετικά μεγάλο πάχος στρώσεων ασύνδετων υλικών και ασφαλικών στρώσεων, ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια κόπωσης της ασφαλικής στρώσης και της στρώσης έδρασης. Επιπλέον οι στρώσεις των ασύνδετων

υλικών απαιτούν αδρανή υψηλής ποιότητας, τα οποία δεν είναι πάντοτε διαθέσιμα. Η χρήση λοιπόν υλικών που είναι συνδεδεμένα με τσιμέντο, είναι πολύ συχνά απαραίτητη σε τέτοιες περιπτώσεις.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε ορισμένα προβλήματα που συνοδεύουν την επιλογή των σταθεροποιημένων με τσιμέντο στρώσεων. Το σημαντικότερο είναι η εμφάνιση των ρωγμών, η οποία οφείλεται στη συστολή ξηράνσεως και στην ανάπτυξη θερμοκρασιακών τάσεων και γίνεται εντονότερη σε υγρά κλίματα. Το νερό της βροχής που περνά μέσα από τις ρωγμές της επιφανειακής στρώσης θα επιταχύνει τον μηχανισμό καταστροφής του οδοστρώματος, αν σωστές εργασίες συντηρήσεως δεν γίνονται τακτικά και αν δεν έχει κατασκευαστεί σωστό υπόγειο σύστημα αποστράγγισης.

Η επιλογή χαμηλής ποιότητας αδρανών στα όρια των προδιαγραφών (marginal aggregates), στη θέση των αδρανών υψηλής ποιότητας, για την κατασκευή σταθεροποιημένων με τσιμέντο στρώσεων βάσεως και υποβάσεως, οφείλεται σε οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια τα οποία είναι :

- Η έλλειψη των παραδοσιακών αδρανών υψηλής ποιότητας, ή το αυξημένο κόστος μεταφοράς από μακρινές περιοχές που προκύπτει από την έλλειψη ή τον περιορισμό της εξόρυξης μεγάλων ποσοτήτων για την προστασία του περιβάλλοντος.
- η παρουσία αδρανών χαμηλής ποιότητας πολύ κοντά στο μέρος κατασκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

Η συμπεριφορά και οι ιδιότητες των
κατεργασμένων με τσιμέντο υλικών

2. Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΛΙΚΩΝ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Οι σταθεροποιημένες με τσιμέντο στρώσεις που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή οδοστρωμάτων μπορούν να χωριστούν γενικά σε τρεις μεγάλες κατηγορίες : (1)

- έδαφος - τσιμέντο (*soil cement*)
- χονδρόκοκκα υλικά - τσιμέντο (*cement bound granular material*)
- ισχνό σκυρόδεμα (*lean-concrete*)

Ο όρος έδαφος-τσιμέντο (*soil-cement*) χρησιμοποιείται για υλικά που έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής διότι παρέχονται σε αφθονία από τη φύση και, όπως είναι φυσικό, έχουν μέτριες ιδιότητες. Το υλικό αυτό προκύπτει από ανάμιξη, συμπύκνωση και συντήρηση εδάφους με τσιμέντο τύπου Portland και νερό ώστε να γίνει ένα συμπαγές μίγμα με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Τα εδαφικά στοιχεία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με τσιμέντο, αλλά, σε αντίθεση με το σκυρόδεμα, ο κάθε κόκκος δεν είναι πλήρως περιβεβλημένος από αυτό. (2)

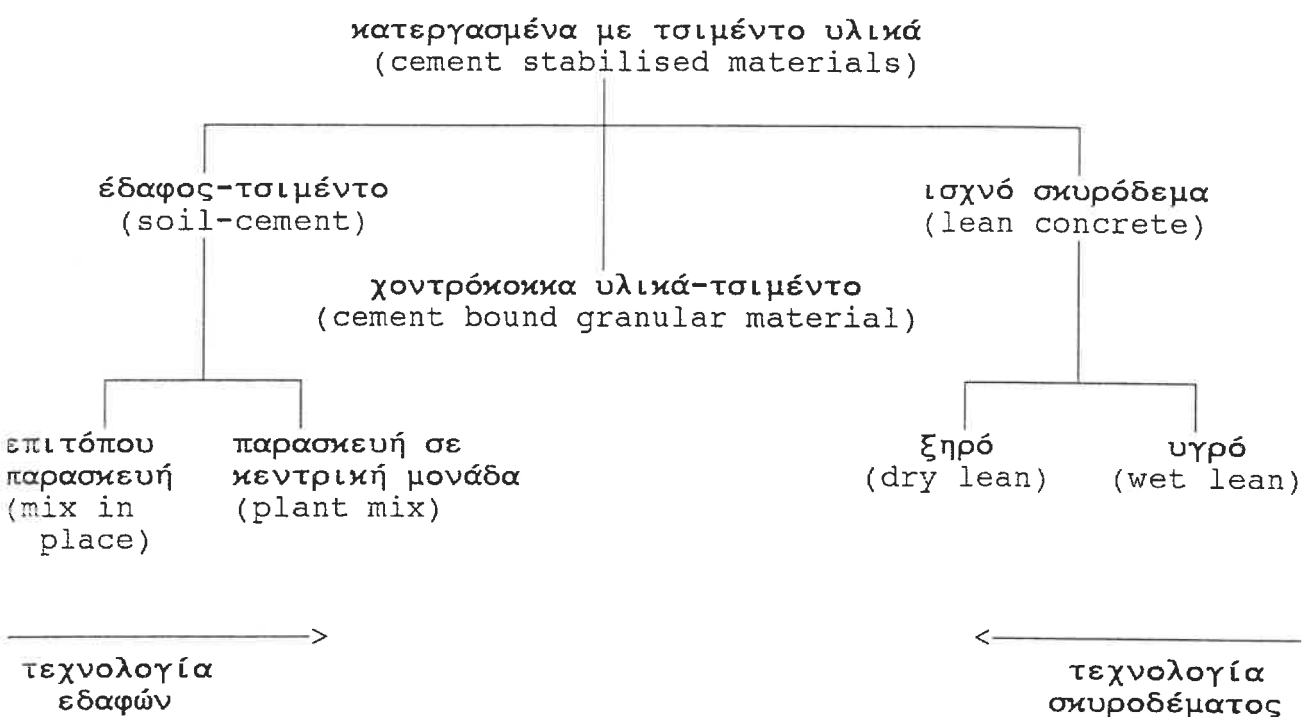
Το ισχνό σκυρόδεμα (*lean concrete*), παρουσιάζει έναν ενδιάμεσο χαρακτήρα μεταξύ του εδάφους-τσιμέντου (*soil-cement*) και του σκυροδέματος. Τα αδρανή που περιέχει είναι υψηλής ποιότητας και είναι παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή σκυροδέματος. Κύριο

χαρακτηριστικό του είναι η εξαιρετικά χαμηλή εργασιμότητα του, που σημαίνει ότι για τη συμπύκνωση του απαιτείται δονητικός οδοστρωτήρας. Λόγω αυτής του της ιδιότητας το υλικό αυτό ονομάζεται ξηρό-ισχνό σκυρόδεμα (dry-lean concrete). Τελευταία έχει γίνει συστηματική και η παραγωγή υγρού-ισχνού σκυροδέματος (wet-lean concrete), του οποίου η συμπύκνωση πραγματοποιείται και με διαστρωτικά μηχανήματα σκυροδέματος.

Όταν τα υλικά που πρόκειται να κατεργαστούν με τσιμέντο ανήκουν στο όρια των προδιαγραφών που περιγράφουν το έδαφος-τσιμέντο (soil-cement) , είναι δηλαδή χοντρόκοκκα φυσικά αδρανή με άμμο, ή μεγάλα κομμάτια θραυσμένων βράχων κ.α. τότε χρησιμοποιείται ο όρος χοντρόκοκκα υλικά-τσιμέντο (cement bound granular material).

Η οικογένεια των κατεργασμένων με τσιμέντο υλικών και ο διαχωρισμός τους φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί : (1)

ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΛΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥΣ



Σχ. 2.1.

ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΕΛΑΦΩΝ		
Κατάταξη εδαφών κατά AASHTO	Κατάταξη εδαφών κατά ASTM	Απαιτούμενη ποσότητα τσιμέντου % κατά βάρος
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	3 - 5
A-1-b	GM, GP, SM, SP	5 - 8
A-2	GM, GC, SM, SC	5 - 9
A-3	SP	7 - 11
A-4	CL, ML	7 - 12
A-5	ML, MH, CH	8 - 13
A-6	CL, CH	9 - 15
A-7	MH, CH	10 - 16

Πιν. 2.1.

2.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ

Για την κατασκευή βάσεων κυρίων οδών και αυτοκινητοδρόμων μπορούν να χρησιμοποιηθούν φυσικά αδρανή που ικανοποιούν αυστηρές προδιαγραφές διαβάθμισης, καθαρότητας και σκληρότητας. Τα αδρανή αυτά μπορεί να προέρχονται από αλλουβιακές αποθέσεις ή από κοίτες ποταμών και μαζί με τα θραυστά αδρανή λέγονται παραδοσιακά, υψηλής ποιότητας αδρανή.

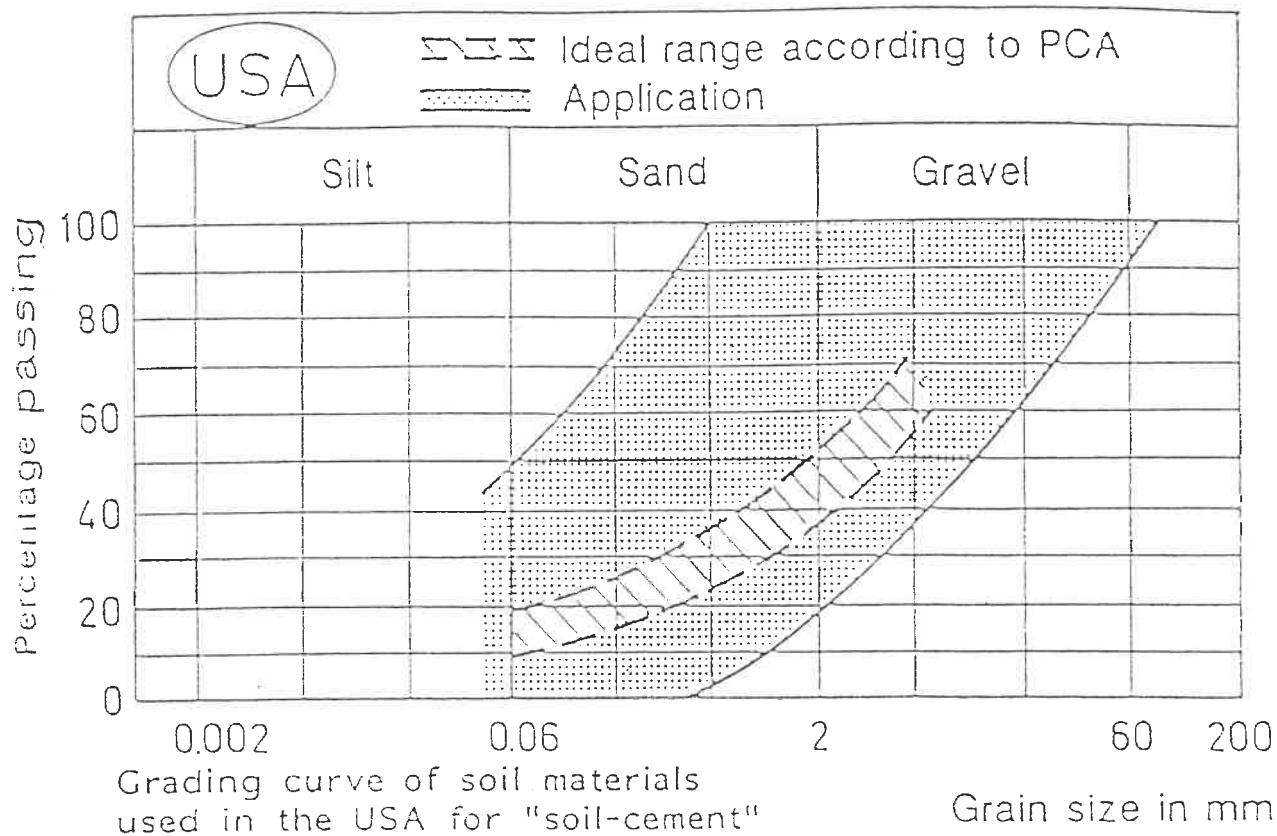
Υπάρχουν όμως και φυσικά αδρανή που δεν ικανοποιούν τις αυστηρές προδιαγραφές των κανονισμών και από μόνα τους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή οδοστρωμάτων. Αυτά ονομάζονται περιθωριακά (marginal) αδρανή. Η διαβάθμιση τους συνήθως ποικίλει και μπορεί να διορθωθεί προσθέτοντας θραυστή άμμο ή λεπτόκοκκα σκύρα, ώστε να μπορούν χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή βάσεων σε δευτερεύουσες οδούς με χαμηλή κυκλοφορία.

Επίσης για την κατασκευή σταθεροποιημένων στρώσεων βάσεων και υποβάσεων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα υλικά παλιών οδοστρωμάτων, των οποίων η φυσική τους ζωή έχει λήξει. Γίνεται λοιπόν αποξίλωση και θρυμματισμός (φρεζάρισμα) του παλιού οδοστρώματος και, αν χρειάζεται, διορθώνεται η διαβάθμιση του με την προσθήκη νέων υλικών. Στη συνέχεια τα υλικά αυτά αναμιγνύονται με τσιμέντο και νερό για να κατασκευαστεί η σταθεροποιημένη στρώση.

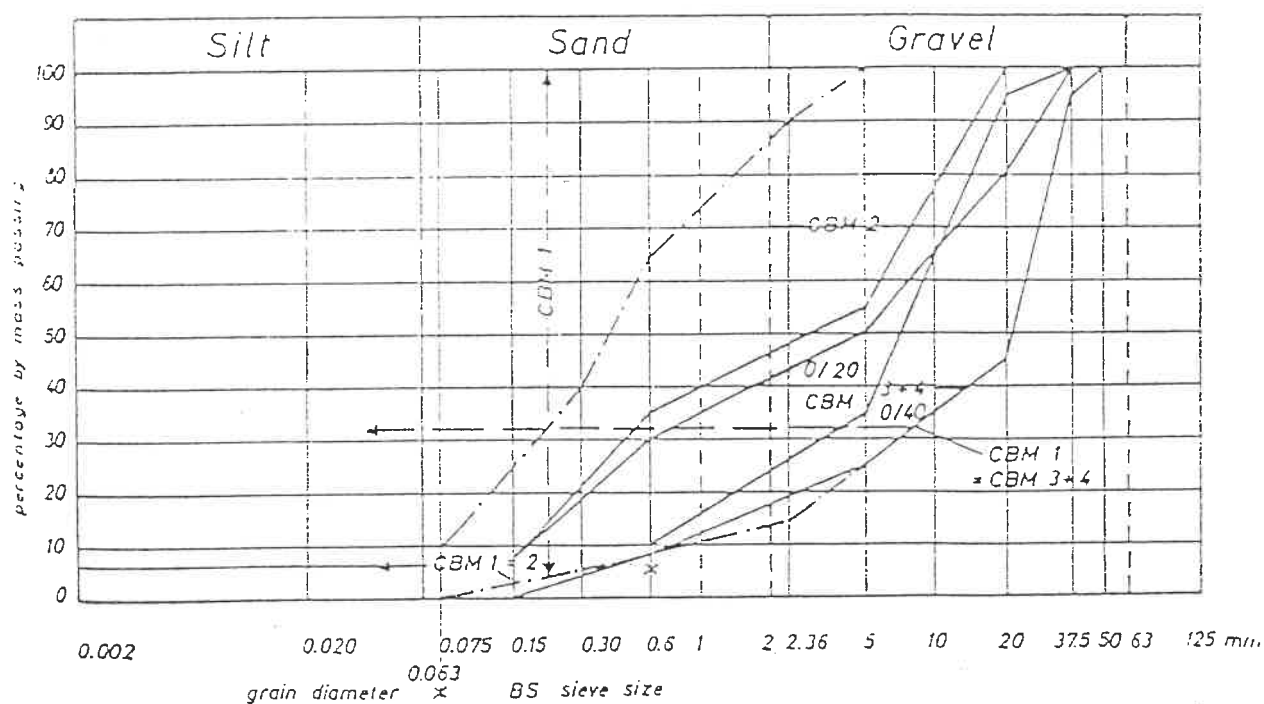
Ακολουθούν οι κανονισμοί, που ισχύουν σε διάφορες χώρες.

USA

strategy b)



UNITED KINGDOM strategy (a) + (b)

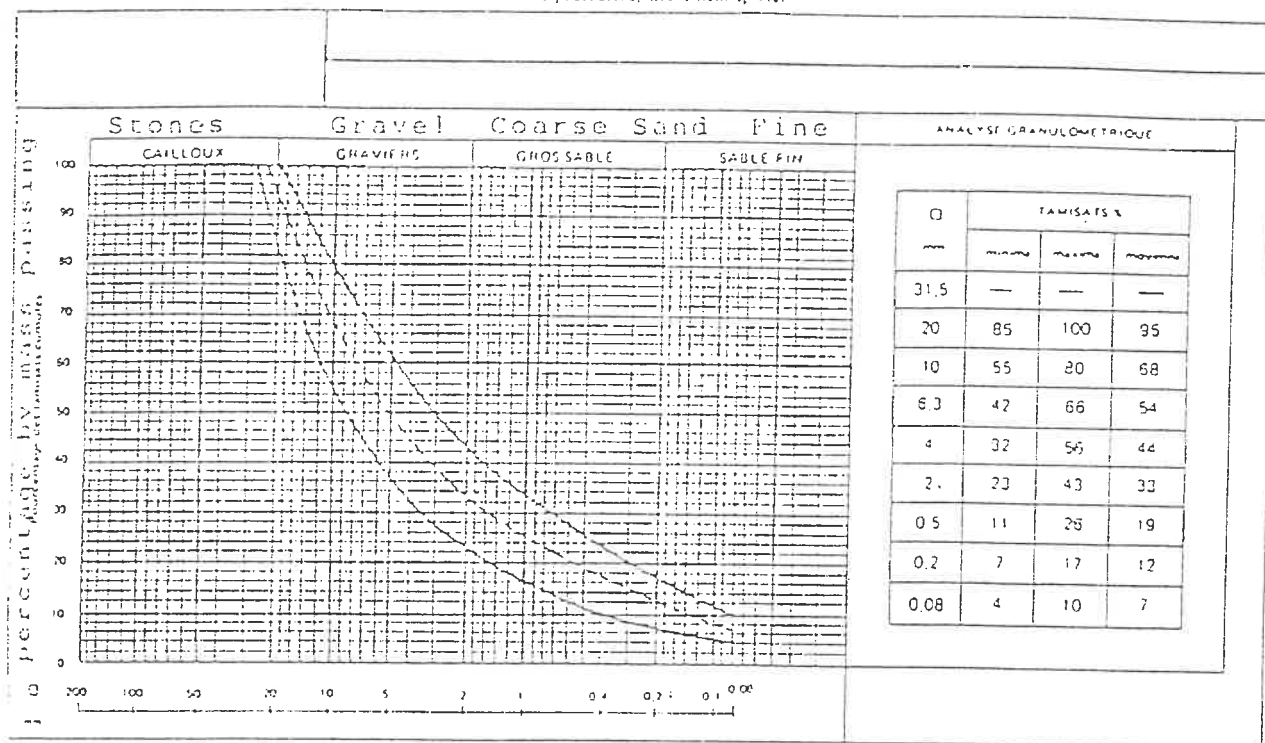


ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΛΙΚΩΝ

FRANCE

strategy a)

Figure 1
GRAVEL II 20
Niveau de spécification (étant compris pour Gravel-laitier, Gravel-ciment, Gravel-cendres hydrauliques, Gravel-pozzolané, Gravel-laitier spécial)



SWITZERLAND

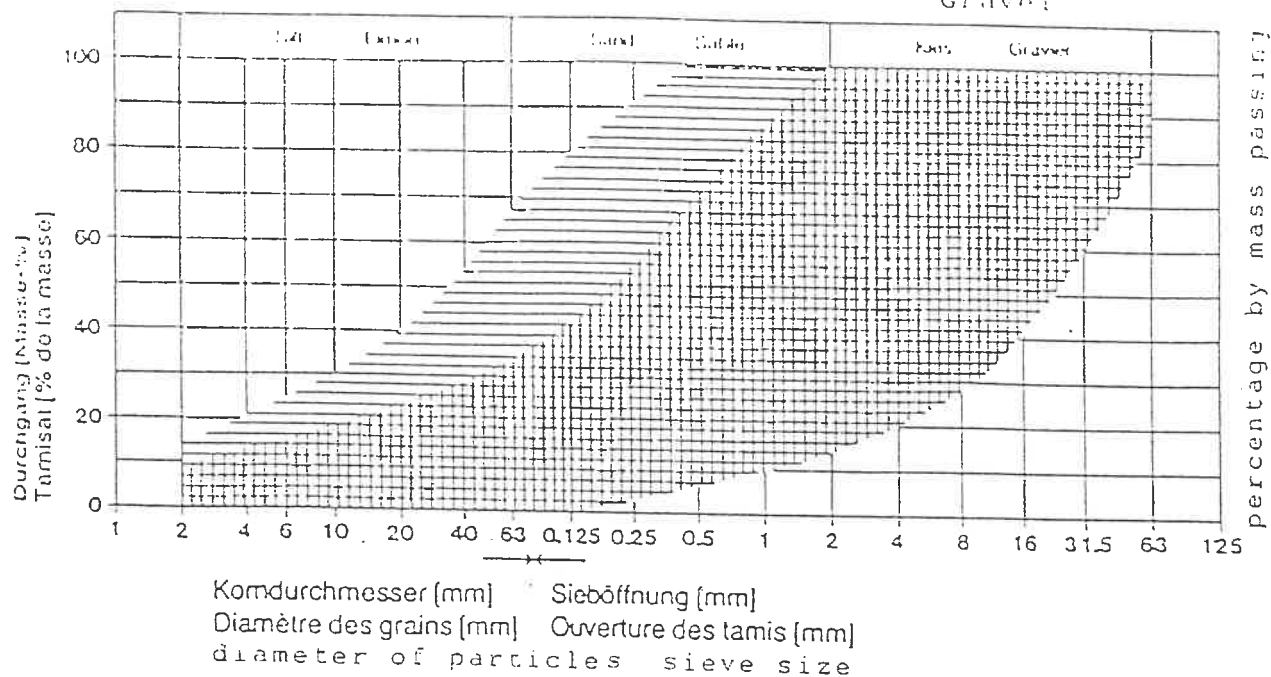
strategy b)

Hydraulische Bindemittel

Liants hydrauliques

Hydraulic binders

Gravel



Χώρα	Χοντρόκοκκα αδρανή (graded gravel/ coarse aggregate)		Ισχνό σκυρόδεμα (lean concrete)		Αμμος-τσιμέντο (sand-cement)		ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	
	Ποσοστό τσιμέντου %	Αντοχή σε θλίψη MPa	Ποσοστό τσιμέντου %	Αντοχή σε θλίψη MPa	Ποσοστό τσιμέντου %	Αντοχή σε θλίψη MPa	για το ποσοστό του τσιμέντου	ηλικία σε ημέρες για την αντοχή σε θλίψη
Αυστραλία	3 - 4	1 - 2	6	3 7	4 - 7	2 - 3 7	7 28	υπάρχουν διαφορές μεταξύ των πολιτειών και των χρησιμοποι- ούμενων αδρανών.
Αυστρία	≥ 4,5	≥ 3-4/≥ 2,5 (≥ 5-8/ ≥ 5)			5 - 7 μόνο για τη στρώση έδρασης δεν χρησιμο- ποιείται σε βάσεις και υποβάσεις (≥ 1,2)		τοπική εμπειρία ≥ 5 εξαρτάται από την αντοχή και την αντίσταση στον παγετό (28)	
Βέλγιο	2,5 - 4 υποβάσεις		4 - 6 βάσεις	≥ 6 + 2Sw			90	Sw : τυπική απόκλιση
Βραζιλία			4 - 9					
Καναδάς	7		3,5		5 - 7,5	1,7-2,4 3,4	7 28	είναι συχνές αποκλίσεις 2 - 4 MPa

Χώρα	Χοντρόκοκκα αδρανή (graded gravel/ coarse aggregate)		Ισχνό σκυρόδεμα (lean concrete)		Αμμος-τσιμέντο (sand-cement)		ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	
	Ποσοστό τσιμέντου %	Αντοχή σε θλίψη MPa	Ποσοστό τσιμέντου %	Αντοχή σε θλίψη MPa	Ποσοστό τσιμέντου %	Αντοχή σε θλίψη MPa	για το ποσοστό του τσιμέντου σε ημερές θλίψη	ηλικία σε ημέρες
Νορβηγία	5 - 8	3 - 4						Προτείνεται min 5 MPa
Πολωνία	2 - 4	1,6-2,2 2,5-5,0		3,5-5,5 6,0-9,0	8 - 10	1,0-1,6 1,5-2,5		7 28
Ισπανία	3,4-5,0	6 9			3 - 6	2,5		7 90
Σουηδία			4 - 6	> 10			κατά μέσο όρο 5%	Proctor φ 0,10m
Ελβετία	2,5 - 5	2				2	αρκετές φορές υψηλό λόγω των απαιτήσεων σε αντίστασης σε παγετό	7 AASHTO φ 0,102m h = 0,11m Stand.Proctor
Σοβ. Ένωση						4 - 10		
Γιουγκο- σλαβία	3 - 4 3 - 4	2,0-5,5 3,0-6,5						7 28 0,15m φ, h=0,15 τιμή στόχος 5,0 MPa

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΛΙΚΩΝ

Χώρα	Χοντροκόκκια αδρανή (graded gravel/ coarse aggregate)		Ισχνό σκυρόδεμα (lean concrete)		Αμμος-τσιμέντο (sand-cement)		ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	
	Ποσοστό τσιμέντου %	Αντοχή σε θλίψη MPa	Ποσοστό τσιμέντου %	Αντοχή σε θλίψη MPa	Ποσοστό τσιμέντου %	Αντοχή σε θλίψη MPa	για το ποσοστό του τσιμέντου σε ημέρες ηλικία για την αντοχή σε θλίψη	
Μεγάλη Βρετ- τανία		≥4,5/2,5 ≥7,0/4,5		≥10,0/6,5 ≥15,0/10,0			7 7 7 7	μ.ο ανεξαρτή- των αντοχών 5 κύβων 0,15m CB1 για υπό- CBM2 βάσεις CBM3 για CBM4 βάσεις
Ιταλία	2,5-3,5 3,5-5,0	2,5-4,5 7,5				παρασκευή σε κεντρική μονάδα Επιτόπου παρασκευή Ανακύκλωση	7 7	αυτοκινητό- δρομοι και άλλοι δρόμοι ειδικές περι- πτώσεις μ.ο 3 δοκιμίων CBR
Ιαπωνία	3,5	3 1			≤ 6	3 1	7 7	Βάσεις υποβάσεις
Ολλανδία					8	5 1,5	90	Proctor 0,10φ μέση τιμή, εξαρτάται από την άμμο

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΛΙΚΩΝ

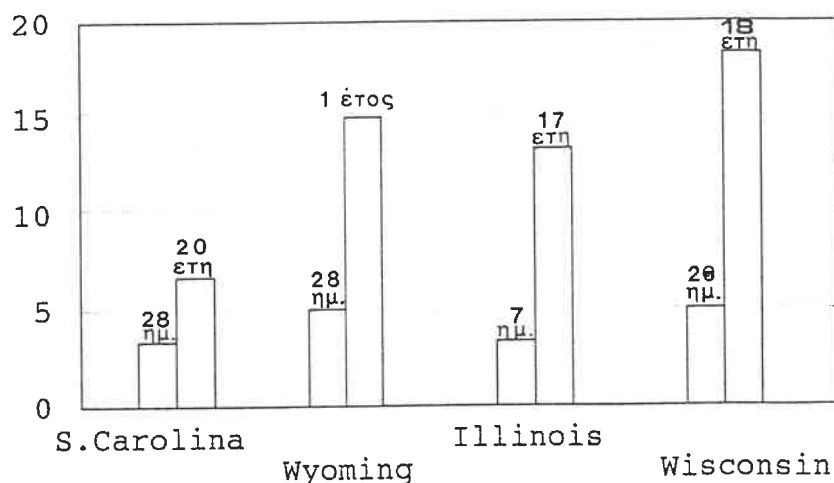
Χώρα	Χοντρόκοκκα αδρανή (graded gravel/ coarse aggregate)		Ισχνό σκυρόδεμα (lean concrete)		Αμμος-τσιμέντο (sand-cement)		ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	
	Ποσοστό τσιμέντου %	Αντοχή σε θλίψη MPa	Ποσοστό τσιμέντου %	Αντοχή σε θλίψη MPa	Ποσοστό τσιμέντου %	Αντοχή σε θλίψη MPa	για το ποσοστό του τσιμέντου	ηλικία σε ημέρες για την αντοχή σε θλίψη
Κίνα	5 - 6	3 - 4						7
Τσεχο- σλοβακία	5 - 7 (έδαφος- τσιμέντο) (soil- cement)	2,5 - 3,5 1,8 - 2,5	4,5 - 6	7 - 12 6 - 11	6 - 8		για την άργιλλο 8% - 9%	7 7 Αυτοκινητό- δρομοί , άλλοι δρόμοι
Δανία	4	5	10	10	6,5	3		
Γερμανία	≥ 3%	7 - 12 ≥ 4 ≥ 6	≥ 3	≥ 12		≥ 6		28 7 28 δοκίμια 0.15φ h=0.125 m Δοκιμή Proctor μέσος όρος 3 δοκιμίων
Γαλλία	3,5 4 - 5		7,5 - 8	≥ 10	5 - 7			7

2.3. ΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΛΙΚΩΝ

2.3.1. Η αντοχή σε θλίψη

Λόγω του ότι είναι πολύ εύκολη η μέθοδος υπολογισμού της αντοχής σε θλίψη, η τιμή της είναι το πρώτο χαρακτηριστικό που λαμβάνεται υπόψη για την αξιολόγηση της μηχανικής καταστάσεως του σταθεροποιημένου υλικού. Η θλιπτική αντοχή λοιπόν του σταθεροποιημένου εδάφους (soil-cement) είναι σημαντικά βελτιωμένη σε σχέση με την αντοχή του μηχανικά σταθεροποιημένου εδάφους, έχει δε το πλεονέκτημα ότι συνεχώς αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου όπως στο σκυρόδεμα. Αυτό εξάλλου φαίνεται στο σχήμα 2.2., που δείχνει την αύξηση της αντοχής σε δοκίμια, που ελήφθησαν από διάφορους δρόμους των ΗΠΑ, σε σχέση με αυτά που δοκιμάστηκαν σε 7 και 28 μέρες.⁽³⁾

ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΕ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΕ ΣΕ ΥΠΑΡΧΟΝΤΕΣ ΔΡΟΜΟΥΣ



Σχ. 2.2.

Από το σχήμα 2.2. γίνεται φανερό ότι είναι συνήθης η αύξηση της θλιπτικής αντοχής στο διπλάσιο της αντίστοιχης των 28 ημερών. Λόγω αυτής ακριβώς της ιδιότητας έγινε πρόταση να λαμβάνεται υπ' όψη , κατά τον υπολογισμό του πάχους των οδοστρωμάτων, αυτό το χαρακτηριστικό, με αποτέλεσμα την επίτευξη μεγάλης οικονομίας.

Εχοντας άμεση εξάρτηση από τη φύση του εδαφικού υλικού, η αντοχή σε θλίψη δοκιμίων ηλικίας 28 ημερών μπορούμε να πούμε ότι είναι μεταξύ 2 και 6 MPa. (3)

Στον πίνακα 2.2. φαίνεται το πεδίο τιμών των αντοχών σε θλίψη, δοκιμίων από έδαφος-τσιμέντο (soil-cement) ηλικίας 7 και 28 ημερών. (2)

ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΕΔΑΦΩΝ		
Τύπος εδάφους	αντοχή σε θλίψη (MPa)	
	7 ημερ.	28 ημερ.
κατά AASHTO A-1,A-2,A-3 κατά ενοποιημένο σύστημα : GW, GC, GP,GM, SW, SC, SP, SM	2- 4,1	2,7-6,9
κατά AASHTO : A-4, A-5 κατά ενοποιημένο σύστημα ML, CL	1,7-3,5	2 - 6,2
κατά AASHTO : A-6, A-7 κατά ενοποιημένο σύστημα MH, CH	1,35-2,7	1,7-4,1

Πιν. 2.2.

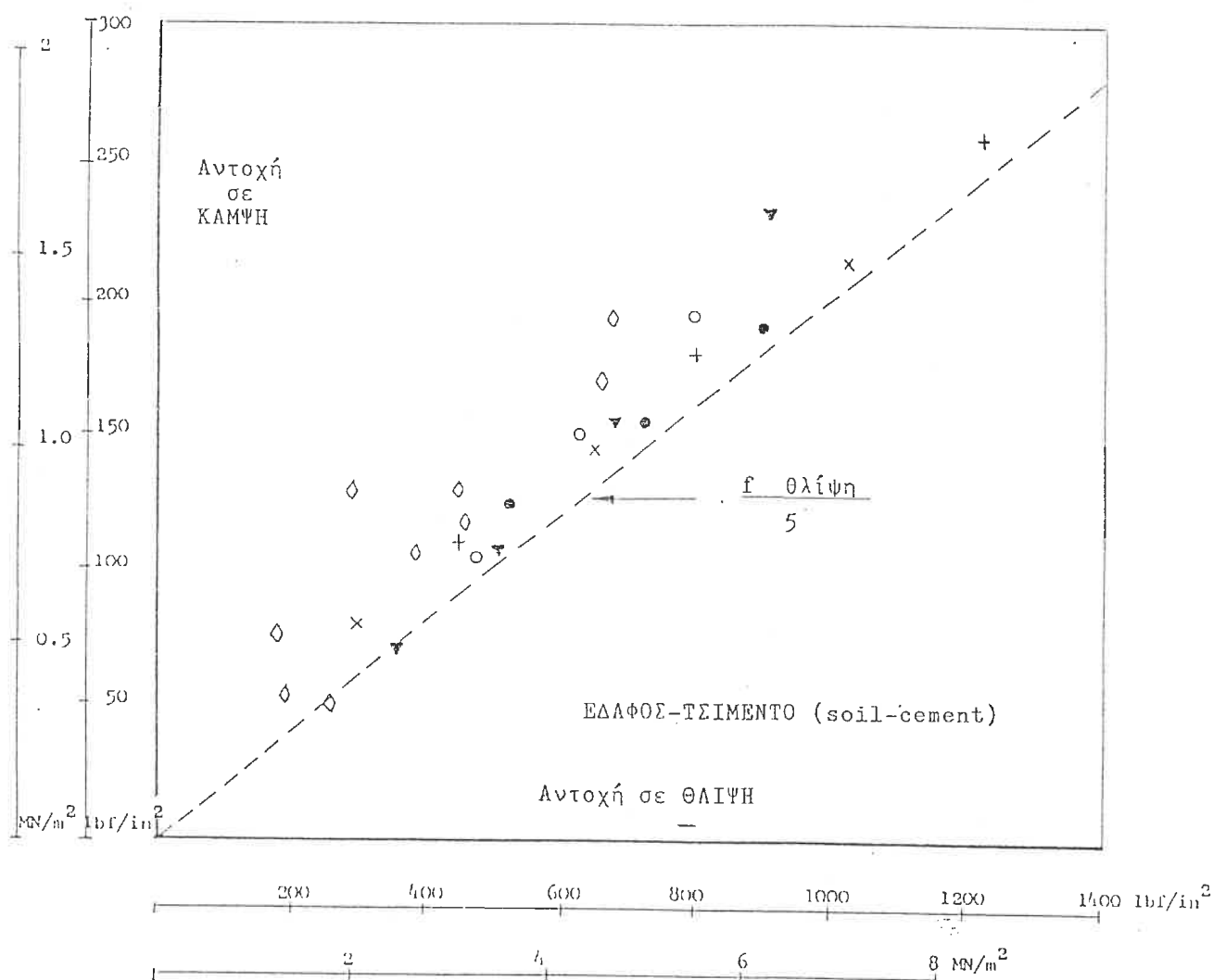
2.3.2. Η αντοχή σε εφελκυσμό

Ο υπολογισμός της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος και γενικώς των σταθεροποιημένων με τσιμέντο υλικών παρουσίασε εξαιρετικές δυσκολίες τα προηγούμενα χρόνια.

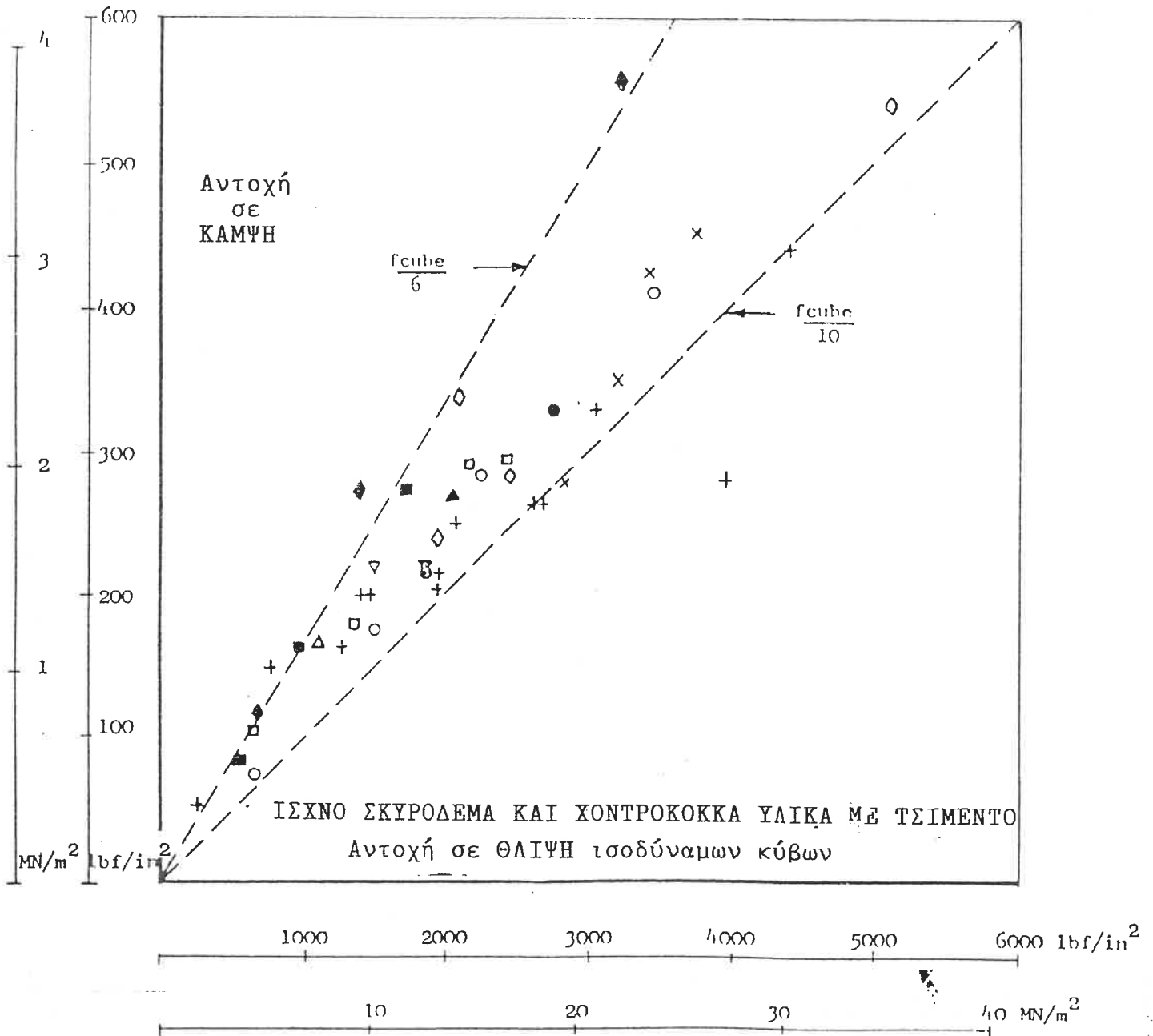
2.3.2.1. Η δοκιμή της κάμψης

Χρησιμοποιείται εκτενώς , αντί για την δοκιμή του καθαρού εφελκυσμού, αλλά ο υπολογισμός της εφελκυστικής αντοχής έχει άμεση εξάρτηση από την ελαστική συμπεριφορά του υλικού. Η δοκιμή της κάμψης προϋποθέτει την κατασκευή πολύ μεγάλων δοκιμών (για παράδειγμα 100mm*100mm*500mm δοκάρια). Το γεγονός αυτό παρουσιάζει και αρκετά πλεονεκτήματα, γιατί με την δοκιμή αυτή προσομοιάζεται σε μεγάλο βαθμό η φόρτιση που ασκεί ο τροχός στις σταθεροποιημένες στρώσεις στα οδοστρώματα. Τα μεγάλα αυτά δοκίμια επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν, πρίν από τη δοκιμή της κάμψης , για τον υπολογισμό του ηλεκτροδυναμικού μέτρου ελαστικότητας και μετά την δοκιμή της κάμψης, για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής των ισοδύναμων κύβων.

Στα σχήματα 2.3 και 2.4 φαίνονται οι τιμές της αντοχής σε κάμψη σε σχέση με την αντοχή σε θλίψη κύβων. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι η αντοχή έχει τιμές από το 1/6 ως το 1/10 της αντοχής σε θλίψη. (1)



Σχ. 23



Σχ. 2.4

2.3.3. Μέτρο ελαστικότητας

Το στατικό μέτρο ελαστικότητας που μετρήθηκε σε δοκίμια 28 ημερών ήταν της τάξεως των 7.000 MPa για τα μίγματα εδάφους-τσιμέντου (soil-cement). (3)

Για τα μίγματα ισχνού σκυροδέματος (lean concrete) η τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι πολύ μεγαλύτερη και μπορεί να φτάνει και τα 30.000 MPa.

2.3.4. Λόγος του Poisson

Η συνήθης τιμή του λόγου του Poisson, που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των οδοστρωμάτων, για τις στρώσεις που δεν είναι ρηγματωμένες κυμαίνεται μεταξύ 0,2 και 0,3 και για τις στρώσεις που είναι πολύ ρηγματωμένες, από 0,3 ως 0,35. (4)

2.3.5. Αντοχή σε κόπωση

Η αντοχή σε κόπωση των σταθεροποιημένων με τσιμέντο υλικών δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφορές από εκείνη του σκυροδέματος. Η σχέση που εκφράζει την αντοχή σε κόπωση των κατεργασμένων υλικών είναι : (5)

$$\frac{\sigma}{f} = 1 - a \cdot \log N$$

σ : επιβαλλόμενη τάση

f : η αντοχή σε μονοτονική φόρτιση

(f : $0,8 \div 1,7$ MPa σε κάμψη σε 90 ημέρες)

a : η κλίση της γραμμής της κόπωσης σε ημιλογαριθμική κλίμακα

($a = 1/12$ για κατεργασμένα με τσιμέντο αμμοχάλικα)

Τα κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά, έχουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα από τα ασφαλτομίγματα. Επίσης μία μικρή μεταβολή στην επιβαλλόμενη παραμόρφωση, δηλ. μικρή μεταβολή του πάχους της σταθεροποιημένης στρώσης, επιφέρει σημαντική μεταβολή στις επιτρεπόμενες διελεύσεις. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη φάση διαστρώσεως των κατεργασμένων υλικών, ώστε να πραγματοποιείται παντού ένα ελάχιστο προβλεπόμενο πάχος και να μη υπάρχουν ανομοιομορφίες στη διάστρωση, οι οποίες θα οδηγήσουν σε αστοχία σε σύντομο χρονικό διάστημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

Σχεδιασμός οδοστρωμάτων που περιλαμβάνουν
στρώσεις σταθεροποιημένες με τσιμέντο

3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

Κατά το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων ο μελετητής πρέπει να λαμβάνει σοβαρά υπόψη του αν δέχεται ή όχι την ύπαρξη ρωγμών στις κατεργασμένες με τσιμέντο στρώσεις, η ύπαρξη των οποίων διαφοροποιεί τον υπολογισμό των οδοστρωμάτων.

Υπάρχουν δύο αντικρουόμενες απόψεις σχετικά με τη λειτουργία των σταθεροποιημένων στρώσεων.

Η πρώτη δέχεται ότι οι κατεργασμένες με τσιμέντο στρώσεις εμφανίζουν ένα πλήθος εγκαρσίως και κατά μήκος ρωγμών, οι οποίες ονομάζονται μικρορωγμές. Αυτές οι μικρορωγμές, μπορούν να αναπτυχθούν νωρίτερα από την έναρξη χρησιμοποίησης του οδοστρώματος εξαιτίας της συστολής ξήρανσης, των θερμοκρασιακών μεταβολών και της κυκλοφορίας των οχημάτων στη φάση κατασκευής. Μπορούν επίσης να δημιουργηθούν αργότερα στη φάση λειτουργίας, από τον συνδυασμό της επιρροής της κυκλοφορίας και της θερμοκρασίας. Στην τελευταία περίπτωση οι στρώσεις του οδοστρώματος πλησιάζουν στο τέλος της ζωής τους, και έχουν εντελώς διαφορετική φύση και συνέπειες από τις συνήθεις μικρορωγμές.

Ο σχεδιασμός του πάχους των μικρορηγματωμένων σταθεροποιημένων με τσιμέντο στρώσεων, δεν λαμβάνει υπόψη του την αντοχή σε κόπωση λόγω κάμψης αυτών των στρώσεων, επειδή δεν είναι ικανές να αναλάβουν εφελκυστικές τάσεις και έχουν

μηχανικά χαρακτηριστικά (παρόλο που είναι καλύτερα) παρόμοια με τις στρώσεις από ασύνδετα υλικά (μέτρο ελαστικότητας τάξεως 1000-2000 MPa). Ο σχεδιασμός του οδοστρώματος σ' αυτή την περίπτωση βασίζεται στην αντοχή σε κόπωση λόγω κάμψης της υπερκείμενης ασφαλτικής στρώσης και στις κατακόρυφες θλιπτικές τάσεις της στρώσης έδρασης.

Αυτός ο συλλογισμός οδήγησε στην κατασκευή οδοστρωμάτων με μεγάλα πάχη ασφαλτικών στρώσεων οι οποίες βρίσκονται επάνω από κατεργασμένες με τσιμέντο στρώσεις με μικρό πάχος. Σε τέτοιες κατασκευές η ύπαρξη μικρορωγμών στις σταθεροποιημένες στρώσεις δεν είναι σοβαρό πρόβλημα για τις ρωγμές εξ ανακλάσεως των ασφαλτικών στρώσεων.

Η δεύτερη συλλογιστική θεωρεί τις σταθεροποιημένες με τσιμέντο στρώσεις ως συμπαγείς, άκαμπτες, μονολιθικές στρώσεις, στις οποίες ο μηχανισμός ρηγμάτωσης λόγω συστολής ξήρανσης και θερμοκρασίας δημιουργεί μεγάλες, ανοικτές ρωγμές σε κανονικά διαστήματα, οι οποίες διαχωρίζουν τις στρώσεις σε μεγάλα τμήματα, η συνεργασία μεταξύ των οποίων εξαρτάται από το εύρος των τμημάτων αυτών και των ρωγμών. Τέτοιες σταθεροποιημένες στρώσεις αναπτύσσουν καμπτικές τάσεις και έχουν μέτρα ελαστικότητας της τάξεως 15.000-30.000 MPa, τα οποία μειώνουν τις κατακόρυφες τάσεις στη στρώση έδρασης και αναπτύσσουν καμπτική αντοχή σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις. Αυτές οι στρώσεις σχεδιάζονται έναντι κοπώσεως και ο υπολογισμός καταλήγει σε μεγάλα πάχη τα οποία υπόκεινται

λεπτών ασφαλτικών στρώσεων, ο ρόλος των οποίων περιορίζεται μόνο στην επιφανειακή λειτουργικότητα του οδοστρώματος (ομαλότητα, αντιολισθηρότητα, χαμηλά επίπεδα θορύβου).

Τέτοιες κατασκευές, που συνοδεύονται με την ύπαρξη ενεργών ρωγμών στις σταθεροποιημένες με τσιμέντο στρώσεις, αναδεικνύουν τις ρωγμές εξ ανακλάσεως σε σημαντικό πρόβλημα, των οποίων ο έλεγχος θα πρέπει να γίνεται από το στάδιο σχεδιασμού.

Εκτός όμως από τις δύο αυτές κατευθύνσεις σχετικά με το σχεδιασμό και τη λειτουργία των σταθεροποιημένων με τσιμέντο στρώσεων, υπάρχει και μιά τρίτη, η οποία κινείται μεταξύ των δύο παραπάνω και στηρίζεται σε αποτελέσματα ερευνών που έγιναν σε οδοστρώματα που βρίσκονται στη φάση λειτουργίας. Οι σταθεροποιημένες με τσιμέντο στρώσεις έχουν την τάση να ρηγματώνονται σε σχετικά πυκνά διαστήματα (100-150 cm), αλλά τα ανοίγματα των ρωγμών είναι πολύ περιορισμένα, ώστε να εξασφαλίζεται υψηλός βαθμός συνεργασίας μεταξύ των τμημάτων που έχουν διαχωριστεί από τις ρωγμές, και η στρώση ενεργεί ως ελαστική και ομογενής με μέτρο ελαστικότητας τάξεως 7.000-10.000 MPa

Αυτή η διαφορετική συλλογιστική οδηγεί στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων, που λαμβάνει υπόψη του την αντοχή σε κόπωση και της ασφαλτικής και της σταθεροποιημένης στρώσεως, με αποτέλεσμα αυτές οι στρώσεις να έχουν παραπλήσια πάχη. Για

τέτοιες κατασκευές οι ρωγμές εξ ανακλάσεως εξακολουθούν να αποτελούν πρόβλημα, αλλά αυτό είναι λιγότερο σοβαρό και κυριώτερα εξαρτάται από την κυκλοφορία, τις κλιματολογικές συνθήκες και λιγότερο από το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων.

Ολες οι προαναφερθείσες απόψεις αντιμετωπίζουν το ίδιο πρόβλημα, αλλά το βλέπουν από διαφορετική σκοπιά. Η τάση που έχουν οι σταθεροποιημένες με τσιμέντο στρώσεις να ρηγματώνονται είναι ένα αναπόφευκτο φαινόμενο που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες :

- τα διαθέσιμα αδρανή (έδαφος, άμμος, χαλίκι)
- τη μελέτη σύνθεσης (περιεκτικότητα τσιμέντου, ποσότητα νερού, τύπος και διαβάθμιση αδρανών)
- τρόπος κατασκευής και κλιματολογικές συνθήκες (θερμοκρασιακές μεταβολές και διαφοροποιήσεις της κατεργασίας των στρώσεων)
- μέθοδοι και μέσα κατασκευής (τύπος μηχανημάτων κατασκευής, ρύθμιση της κυκλοφορίας κατασκευής πάνω στην σταθεροποιημένη στρώση, χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της κατασκευής της σταθεροποιημένης στρώσης και της υπερκείμενης ασφαλτικής στρώσης)
- χρόνος διάστρωσης (καλοκαίρι, χειμώνας, ενδιάμεση εποχή)

- η ανοχή της ύπαρξης επιφανειακών ρωγμών εξ ανακλάσεως μέχρι ενός σημείου που το πρόβλημα δεν είναι πολύ σοβαρό και οι κυκλοφοριακές δυσχέρειες που προκαλούνται στη φάση λειτουργίας από τις εργασίες συντηρήσεως και σφραγίσεως των ρωγμών.

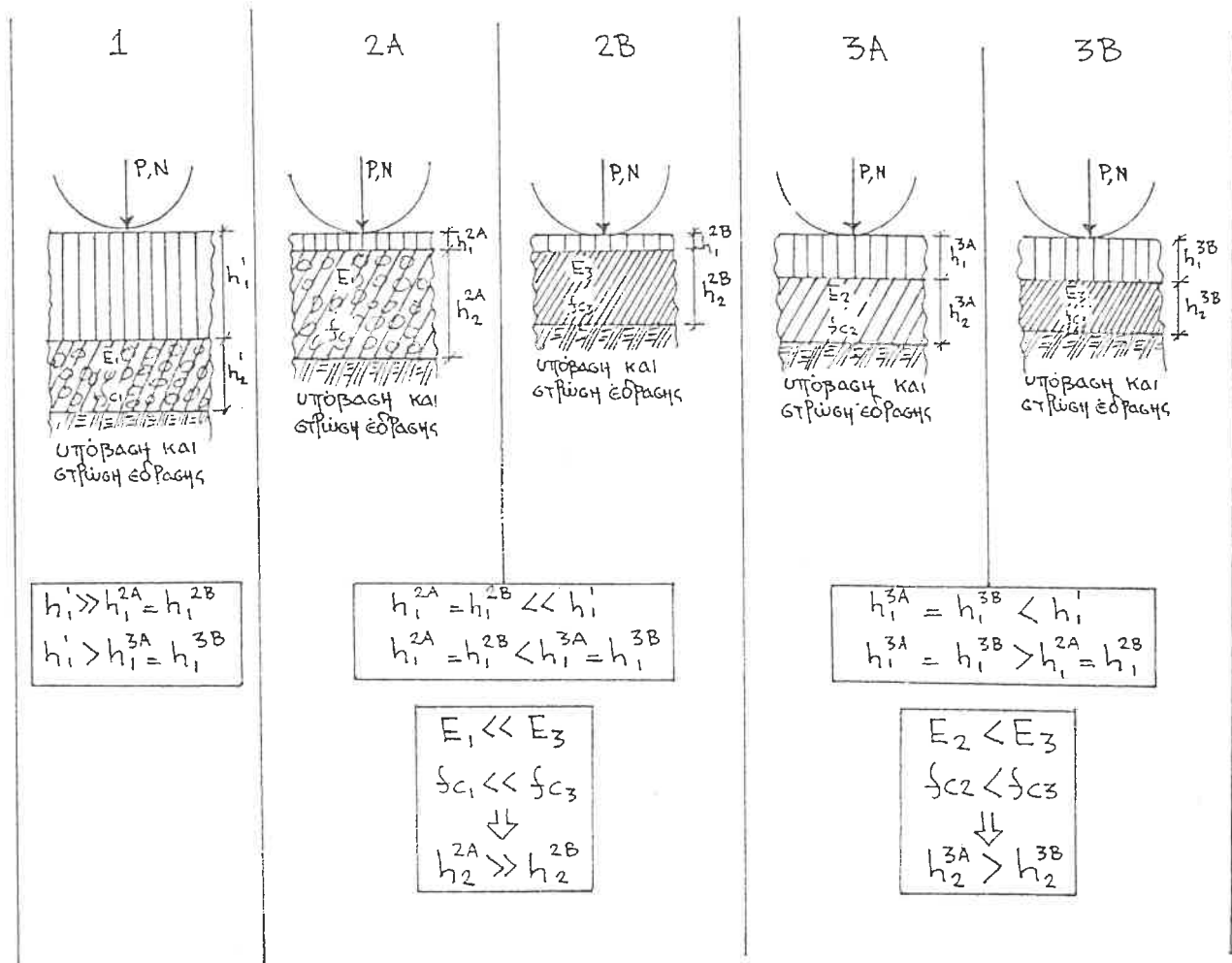
Η κύρια διαφοροποίηση μεταξύ των τριών διαφορετικών αντιλήψεων έγκειται στο κατά πόσο η σταθεροποιημένη με τσιμέντο στρώση μπορεί να αναπτύξει καμπτική αντοχή. Τα αποτελέσματα της κατασκευής των οδοστρωμάτων με τις τρεις διαφορετικές μεθόδους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Στη συνέχεια, στο σχήμα 3.1. ακολουθούν τυπικές τομές οδοστρωμάτων που κατασκευάζονται με τα παρακάτω κριτήρια στα οποία φαίνονται οι ομοιότητες και οι διαφορές των μηχανικών χαρακτηριστικών τους.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΣΤΡΩΣΕΙΣ

Δομικός ρόλος που αναλαμβάνουν οι σταθεροποιημένες με τσιμέντο στρώσεις	Εμφάνιση ρωγμών στις σταθεροποιημένες με τσιμέντο στρώσεις	Μέτρο ελαστικότητας MPa	Κριτήρια σχεδίου	Τυπικά πάχη στρώσεων σε συνάρτηση με την κυκλοφορία και την κατάσταση του υποδάφους (CM)	Κίνδυνος ρωγμών εξ ανακλάσεως	Κίνδυνος αστοχιών εξαιτίας της έλλειψης συνεργασίας των ασφαλτ. σταθεροπ. λόγω της διείσδυσης νερού	Επιπτώσεις των ασφράγιστων ρωγμών	Απαιτούμενο σφράγισμα ρωγμών	Ανοχή των ρωγμών εξ ανακλάσεως	Πρέπει να παίρνονται μέτρα για την αποφυγή ρωγμών εξ ανακλάσεως
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Δεν συμμετέχουν 1. στην ανάπτυξη καμπτικής αντοχής	Μικρορωγμές	1000-2000	Αντοχή σε κόπωση των ασφαλτικών στρώσεων	Ασφαλτ. στρωσ. 20-32 σταθεροπ. στρ. 15-20	Χαμηλός	Χαμηλός	Ασφμαντες	Ευνήδης συντήρηση	Γενικά δεν υπάρχει πρόβλημα	Οχι
Σχεδόν όλη η καμπτική αντοχή αναπτύσσεται 2. από τις σταθεροποιημένες με τσιμέντο στρώσεις	Α. Μικρορωγμές	1000-2000	Αντοχή σε κόπωση των κατεργασμένων υλικών	Ασφαλτ. στρωσ. 4-14 σταθεροπ. στρ. 25-50	Χαμηλός	Χαμηλός	Ασφμαντες	Ευνήδης συντήρηση	Γενικά δεν υπάρχει πρόβλημα	Οχι
	Β. Ανοικτές ρωγμές σε μεγάλα διαστήματα	15000-30000	Αντοχή σε κόπωση των κατεργασμένων υλικών	Ασφαλτ. στρωσ. 4-8 σταθεροπ. στρ. 25-50	Υψηλός	Υψηλός	Προβληματικές σε υγρά κλίματα αν δεν υπάρχει υπογ. αποστραγγιστικό σύστημα	Ευνήδης συντήρηση	Σε υψηλές κυκλοφορίες : δεν γίνεται ανεκτή. Σε χαμηλές κυκλοφορίες : είναι ανεκτή	Ναι Οχι
Και οι ασφαλτικές και οι σταθεροποιημένες με τσιμέντο στρώσ. συμμετέχουν στην ανάπτυξη καμπτικής αντοχής. 3. τσιμέντο στρώσ.	Α. Κλειστές ρωγμές σε μικρά διαστήματα	7000-10000	Αντοχή σε κόπωση της ασφαλτικής στρώσης & των κατεργασμένων υλικών	Ασφαλτ. στρωσ. 12-27 σταθεροπ. στρ. 20-22	Χαμηλός-Μεσαίος	Υψηλός	Πρέπει να παίρνονται μέτρα σε υγρά κλίματα αν δεν υπάρχει σύστημα αποστράγγισης	Μέτρια συντήρηση	Γίνονται ανεκτές οι ρωγμές	Οχι
	Β. Ανοικτές ρωγμές σε μεγάλα διαστήματα	15000-30000	Αντοχή σε κόπωση της ασφαλτικής στρώσης & των κατεργασμένων υλικών	Ασφαλτ. στρωσ. 12-27 σταθεροπ. στρ. 20-22	Μεσαίος-Υψηλός	Υψηλός	Ιδιαίτερη προσοχή σε υγρά κλίματα όταν λείπει αυτό το αποστραγγιστικό σύστημα	Αρχικά επιμελ - λημένη συντήρηση	Σε υψηλή κυκλοφορία : δεν υπάρχει ανοχή. Σε χαμηλή κυκλοφορία : υπάρχει ανοχή	Ναι Οχι

Πιν. 3.1



υπόμνημα:

ασφαλτικό σκυρόδεμα

μικρορηνισματωμένο
κατεργασμένο με
τσιμέντο υλικό
 $E_1 = 1000-2000 \text{ MPa}$
 $f_{c1} \leq 2 \text{ MPa}$

κατεργασμένο με
τσιμέντο υλικό με
πυκνές, κλειστές ρυτίδες
 $E_2 = 7000-10000 \text{ MPa}$
 $2.5 \text{ MPa} < f_{c2} < 4.5 \text{ MPa}$

κατεργασμένο με
τσιμέντο υλικό με
αραιές, ανοικτές ρυτίδες
 $E_3 = 15.000-30.000 \text{ MPa}$
 $f_{c3} \geq 10 \text{ MPa}$

$E_{1,2,3}$: Μέτρο ελαστικότητας

σημείωση: $f_{c1,2,3}$: Αντοχή σε θλίψη δοκιμίων 7 ημερών

Σχ. 3.1.

Το σχέδιο Νο 1 απαιτεί πολύ μεγάλο πάχος ασφαλτικής στρώσης και εξουδετερώνεται το φαινόμενο των ρωγμών εξ ανακλίσσεως.

Το σχέδιο Νο 2 δίνει την πιο λεπτή στρώση ασφαλτοσκυροδέματος, και το πάχος της κατεργασμένης στρώσης εξαρτάται από τα μηχανικά της χαρακτηριστικά.

Στη λύση 2Α η σταθεροποιημένη στρώση έχει μικρότερη αντοχή αλλά είναι μεγαλύτερου πάχους. Ο σχεδιασμός της βασίζεται στα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού και από το γεγονός ότι αυτά έχουν χαμηλές τιμές (στην Ελβετία ο κανονισμός αναφέρει απαιτούμενη θλιπτική αντοχή μέχρι 2 MPa), λάμβάνει χώρα το φαινόμενο της μικρορηγματώσεως, το οποίο όμως δεν οδηγεί στη δημιουργία ρωγμών εξ ανακλίσσεως στην ασφαλτική στρώση.

Η λύση 2Β αντιθέτως περιλαμβάνει μια σταθεροποιημένη στρώση με υψηλότερη αντοχή και μικρότερο πάχος, η οποία παρουσιάζει συμπεριφορά ανάλογη με των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα. Σ' αυτή την περίπτωση είναι πολύ έντονη η εμφάνιση ρωγμών εξ ανακλίσσεως και αν αυτές δεν μπορούν να γίνουν αποδεκτές σε σχέση με τις κυκλοφοριακές συνθήκες, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για τον περιορισμό του φαινομένου.

Το σχέδιο Νο 3 δίνει μια ενδιάμεση λύση, που πιθανώς είναι η ευρύτερα υιοθετημένη. Η βάση μπορεί να αποτελείται

από κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά (μικρότερης αντοχής και μεγαλύτερου πάχους) ή από ισχνό σκυρόδεμα. Στην πρώτη περίπτωση οι ρωγμές εξ ανακλάσεως μπορεί να μην είναι τόσο σοβαρές ή και να μην αποτελούν καθόλου πρόβλημα, αν στην σταθεροποιημένη στρώση έχουν αναπτυχθεί μικρές, κλειστές ρωγμές. Σ' αυτή την κατηγορία ανήκει η Ιταλική σχολή για τα ημι-άκαμπτα οδοστρώματα.

Στη δεύτερη περίπτωση κατασκευάζονται λεπτότερες στρώσεις βάσεως, οι οποίες όμως έχουν πολύ υψηλότερες αντοχές, αλλά όμως οι ρωγμές εξ ανακλάσεως κάνουν την εμφάνισή τους αλλού περισσότερο και αλλού λιγότερο και κρίνονται υποχρεωτικά τα μέτρα για τον περιορισμό τους. Αυτός ο σχεδιασμός εφαρμόζεται σε δρόμους με υψηλή κυκλοφορία και έχει δοκιμαστεί ευρύτατα στο Βέλγιο, την Γερμανία και τη Γαλλία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

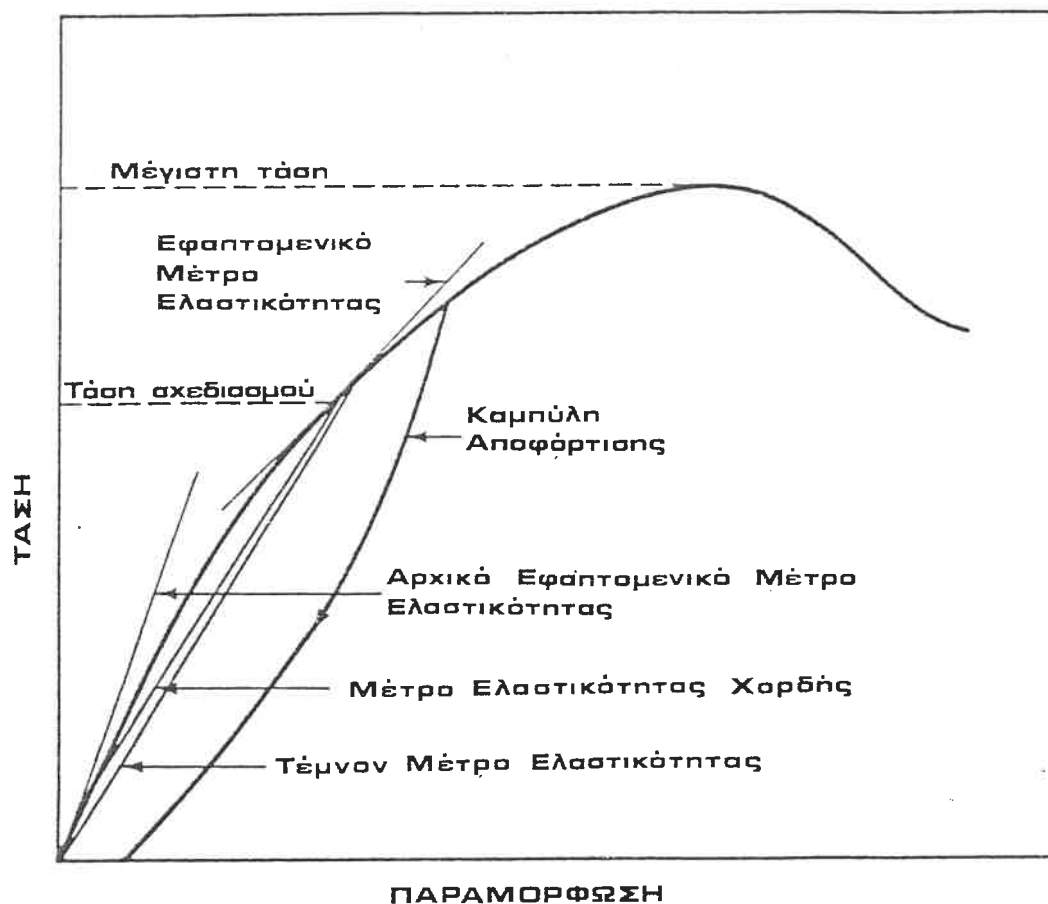
Περὶ τοῦ μέτρου ελαστικότητος τῶν
κατεργασμένων με τσιμέντο υλικῶν

4. ΠΕΡΙ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΛΙΚΩΝ

4.1. ΓΕΝΙΚΑ

Τα σταθεροποιημένα με τσιμέντο υλικά, παρουσιάζουν όχι απολύτως ελαστική συμπεριφορά και έχουν ψαθυρές ιδιότητες. Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων δεν είναι γραμμική και επομένως δεν υπάρχει σαφής ορισμός του μέτρου ελαστικότητας.

ΤΥΠΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΦΑΙΝΟΝΤΑΙ ΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΤΡΑ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.



Σχ. 4.1.

Στο σχήμα 4.1. (7) φαίνεται η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων και οι διάφοροι ορισμοί που δίνονται στα μέτρα ελαστικότητας.

4.2. ΟΡΙΣΜΟΙ

Το αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας, το οποίο παριστάνεται από την εφαπτομένη του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων εις την αρχή των αξόνων. Αυτή είναι η πλησιέστερη προσέγγιση στο μέτρο ελαστικότητας της ελαστικής περιοχής, αλλά έχει πολύ μικρή πρακτική σημασία, γιατί αντιπροσωπεύει πολύ μικρές τιμές τάσεων-παραμορφώσεων. Η μέθοδος των ταλαντώσεων (resonance), με την οποία υπολογίζεται το ηλεκτροδυναμικό μέτρο ελαστικότητας, είναι η πιο διαδεδομένη για τον προσδιορισμό του αρχικού εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας διότι η διαταραχή που προκαλεί στο υλικό είναι πολύ μικρή.

Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας, εκφράζεται από την εφαπτομένη του πιο πάνω διαγράμματος σε κάποιο σημείο αυτού, συνήθως στην τάση εργασίας.

Το μέτρο ελαστικότητας που είναι πιο πρακτικό στο υπολογισμό του είναι το τέμνον. Εκφράζεται από την κλίση της ευθείας που ενώνει την αρχή των αξόνων και κάποιο σημείο αυτού, συνήθως του σημείου που αντιστοιχεί στην τάση εργασίας. Μ' αυτόν τον τρόπο, όλη η παραμόρφωση που παρουσιάζεται για μιά δεδομένη τάση, θεωρείται ελαστική.

Το αρχικό εφαπτομενικό, καθώς και το τέμνον μέτρο

ελαστικότητας δεν είναι πάντα εύκολο να υπολογιστεί στη δοκιμή της θλίψης. Εισάγεται ο ορισμός του μέτρου ελαστικότητας χορδής, το οποίο εκφράζεται από την κλίση της ευθείας που ενώνει δύο σημεία του διαγράμματος, συνήθως το άνω και κάτω όριο της τάσεως εργασίας.⁽⁶⁾ Το μέτρο ελαστικότητας χορδής χρησιμοποιείται, διότι παρατηρείται πολύ συχνά μιά μεγάλη τιμή παραμόρφωσης, ακριβώς στην εκκίνηση της θλιπτικής δοκιμής, η οποία οφείλεται στην ύπαρξη μικρορωγμών, οι οποίες κλείνουν αμέσως με την επιβολή του φορτίου και δίνουν μια πολύ απότομη κλίση στην αρχή του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων. Το μέτρο ελαστικότητας χορδής είναι πολύ πιο συντηρητικό σε σχέση με το αρχικό εφαπτομενικό μέτρο και είναι και πιο εύκολα προσδιορίσιμο πειραματικά. Αντιθέτως μπορεί να υποεκτιμήσει την πρόσθετη τάση αν εφαρμοστεί στην σταθεροποιημένη στρώση. Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας, το οποίο μετράται στο σημείο που μας ενδιαφέρει, είναι περισσότερο αξιόπιστο κατά την επιβολή μικρών πρόσθετων τάσεων. ⁽⁷⁾

4.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Όπως είδαμε και προηγουμένως το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών που είναι κατεργασμένα με τσιμέντο δεν είναι γραμμικό. Ωστόσο στην περιοχή μέχρι περίπου το $1/3$ του φορτίου θράυσεως παρουσιάζει σχεδόν ελαστική συμπεριφορά. Με την χρησιμοποίηση μηχανισιομέτρων μηχανικών, ηλεκτρικών ή

οπτικών μπορεί να πραγματοποιηθεί η μέτρηση των παραμορφώσεων ϵ . Επίσης η μηχανή της θλίψης παρέχει τη δυνατότητα της συνεχούς αναγνώσεως της επιβαλλόμενης δύναμης P . Το μέτρο ελαστικότητας σ' αυτή την περίπτωση μπορεί να προκύψει από τη σχέση :

$$E = \frac{P}{A * \epsilon}$$

P : η επιβαλλόμενη δύναμη

ϵ : η προκληθείσα παραμόρφωση

A : η επιφάνεια διατομής του δοκιμίου

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής πρέπει να λαμβάνεται πρόνοια ώστε η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η υγρασία να διατηρούνται σταθερές. Παρόλες όμως τις προφυλάξεις που παίρνονται, είναι αδύνατος ο αποκλεισμός του ερπυσμού, ο οποίος αλλοιώνει την τιμή του μέτρου ελαστικότητας. Για τον περιορισμό ερπυστικών φαινομένων είναι σκόπιμη η φόρτιση με πολύ μικρές τάσεις.

4.4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

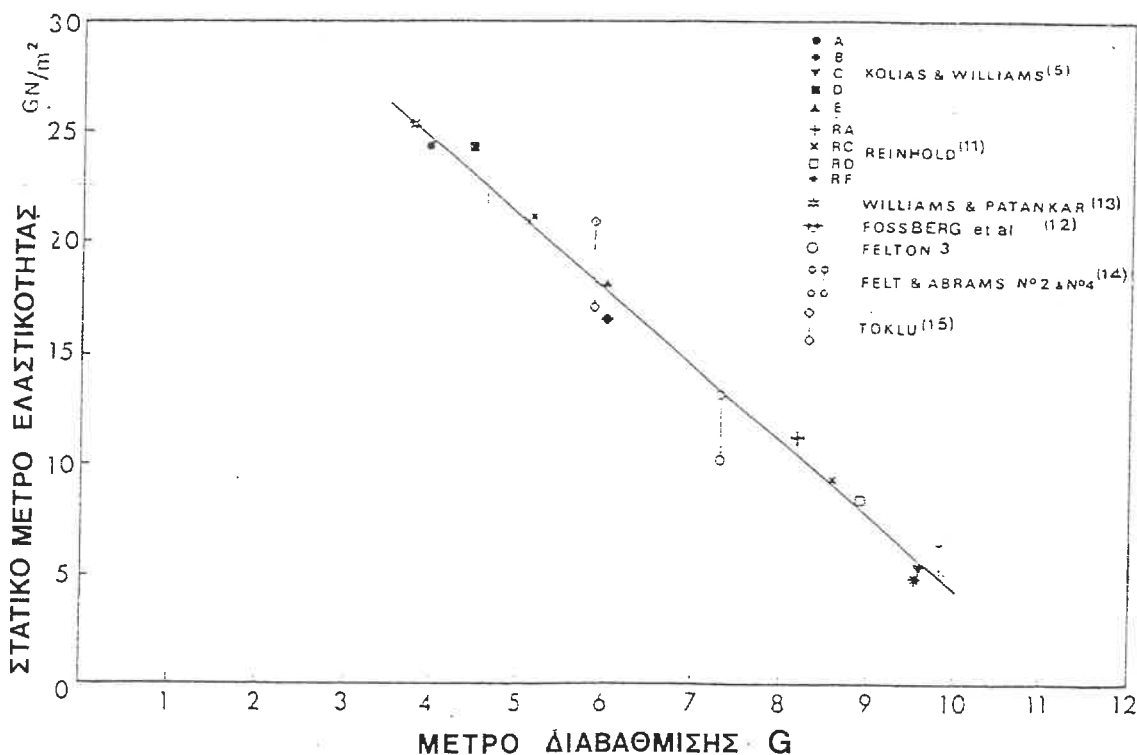
Ενας γρήγορος υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας υλικών σταθεροποιημένων με τσιμέντο, ο οποίος δεν απαιτεί εκτεταμένες πειραματικές, εργαστηριακές δοκιμές, μπορεί να γίνει από το μέτρο διαβάθμισης (G) του υλικού, αν είναι γνωστή η κοκκομετρική του καμπύλη. (35)

Η πορεία που ακολουθούμε για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας είναι η ακόλουθη :

α) Από την κοκκομετρική ανάλυση του υλικού, προσδιορίζεται το μέτρο διαβάθμισης G , το οποίο υπολογίζεται αθροίζοντας τα ποσοστά που διέρχονται από τα κόσκινα, που καθορίζονται από την ASTM :

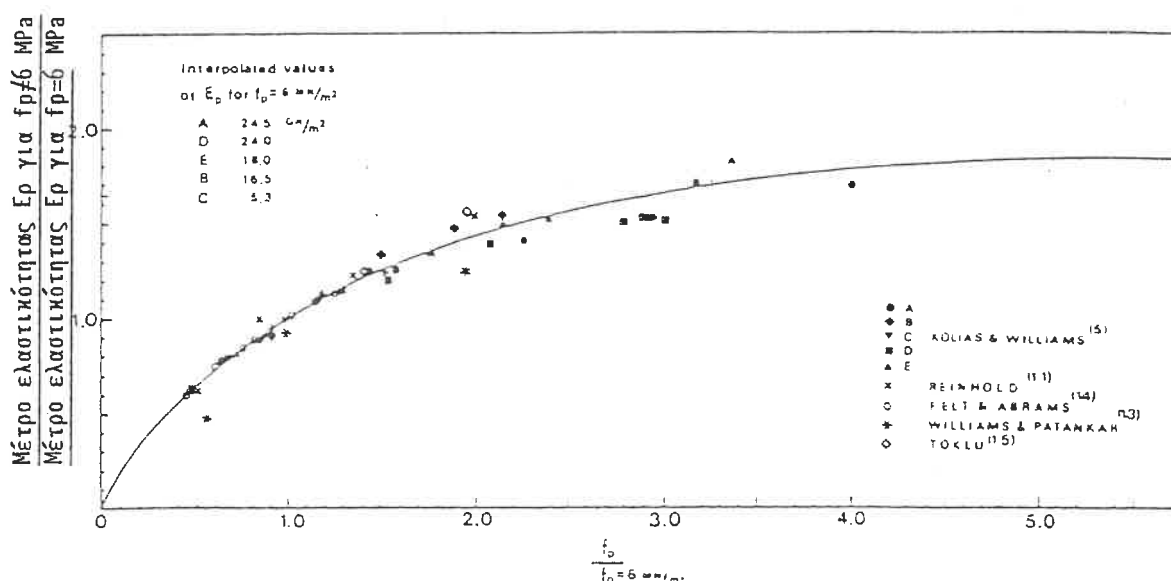
37,5 mm (1 1/2 in), 19 mm (3/4 in), 9,5 mm (3/8 in),
47,5 mm (No 4), 2,36 mm (No 8), 1,18 mm (No 16),
500 μm (No 30), 150 μm (No 100), 75 μm (No 200), και
διαιρώντας με το 100

β) Με τη βοήθεια του μέτρου διαβάθμισης που προσδιορίστηκε προηγουμένως και από το διάγραμμα του σχήματος 4.2., προσδιορίζεται το στατικό μέτρο ελαστικότητας, που αντιστοιχεί στην μονοαξονική αντοχή των 6 MPa ή την κυβική αντοχή των 9 MPa.



Σχ. 4.2

γ) Για να ληφθούν υπόψη θλιπτικές αντοχές διαφορετικές των 6 MPa, γίνεται χρήση του σχήματος 4.3. που ακολουθεί. Με τη βοήθεια του λόγου f/f_p , όπου f είναι η προσδιοριζόμενη θλιπτική αντοχή του υλικού και f_p η σταθερή θλιπτική αντοχή των 6 MPa, προσδιορίζεται ο λόγος E/E_p , όπου E είναι το ζητούμενο στατικό μέτρο ελαστικότητας, ενώ το E_p είναι το στατικό μέτρο ελαστικότητας που προσδιορίστηκε στο προηγούμενο στάδιο.



Σχ. 4.3

Τα δύο τελευταία βήματα μπορούν να αντικατασταθούν με την επίλυση της παρακάτω εξίσωσης :

$$E = (15,5 - 1,4 * G) * (f_p)^{1/2}$$

όπου :

E = στατικό μέτρο ελαστικότητας σε GPa που αντιστοιχεί σε αντοχή f_p

f_p = μονοαξονική θλιπτική αντοχή σε MPa

G = μέτρο διαβάθμισης

4.5. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας βασίζεται στη μετάδοση ηχητικών δονήσεων μέσα στη μάζα δοκιμίων καθορισμένων διαστάσεων. Υπάρχουν οι ακόλουθες δύο μέθοδοι :

- . Μέθοδος της ιδιοσυχνότητας (resonance method)
- . Μέθοδος των υπερήχων.

4.5.1. Μέθοδος της ιδιοσυχνότητας

Η μέθοδος της ιδιοσυχνότητας βασίζεται στη διέγερση του δοκιμίου από μια εξωτερική δόνηση στη φυσική του συχνότητα. Η ιδιοσυχνότητα εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου, την κατανομή της μάζας σ' αυτό, και τα ελαστικά χαρακτηριστικά του υλικού. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται πρέπει να έχουν απλά γεωμετρικά σχήματα, δηλ. να είναι πρισματικά ή κυλινδρικά, των οποίων το μήκος πρέπει να είναι 4 ως 6 φορές μεγαλύτερο από την εγκάρσια διάσταση. Οι δονήσεις παράγονται από έναν ταλαντωτή ρυθμιζόμενης συχνότητας (ηλεκτροδυναμική γεννήτρια). Ο σκοπός είναι να βρεθεί η τιμή της επιβαλλόμενης συχνότητας για την οποία το εύρος της ταλάντωσης γίνεται μέγιστο. Η τιμή αυτή είναι η ιδιοσυχνότητα του εξεταζόμενου υλικού, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ελαστικά χαρακτηριστικά του.

Η μέθοδος της ιδιοσυχνότητας βασίζεται στο γεγονός ότι τα σταθεροποιημένα με τσιμέντο υλικά, όπως και το σκυρόδεμα, μπορούν να θεωρηθούν μερικώς ομογενή και ισότροπα υλικά.⁽¹¹⁾

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής το εξεταζόμενο υλικό υπόκειται σε πολύ μικρές φορτίσεις και δεν διαταράσσουν τη δομή του. Οι ελαστικές σταθερές που προκύπτουν από αυτές τις δοκιμές ονομάζονται "δυναμικές", και έχουν σημαντικές διαφορές στην τιμή τους από τις αντίστοιχες στατικές ελαστικές σταθερές για τα ίδια υλικά.

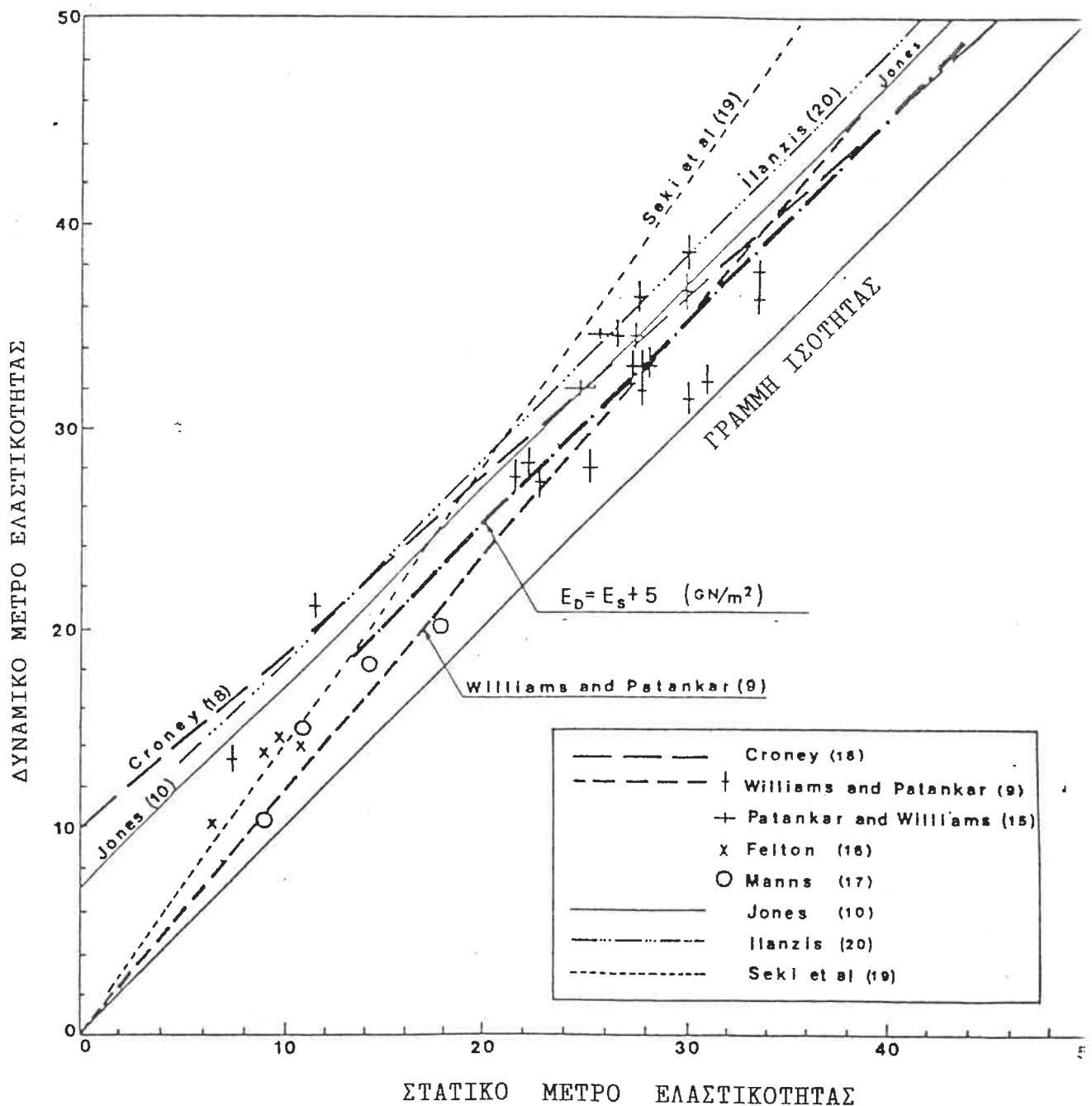
Οι Williams, Patankar⁽¹⁵⁾ παρουσίασαν ότι το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_D είναι τα 7/6 του αντίστοιχου στατικού μέτρου ελαστικότητας E_S .

$$E_D = \frac{7}{6} * E_S$$

Οι Mindess και Young⁽⁷⁾ αναφέρουν ότι το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας είναι μεγαλύτερο κατά 20 - 30% από το στατικό σχετικά με σκυρόδεμα.

Επίσης οι Κόλιας και Williams⁽¹³⁾ παρουσίασαν μιά σχέση μεταξύ του στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, όσον αφορά τα σταθεροποιημένα με τσιμέντο υλικά. Σύμφωνα μ' αυτή το δυναμικό μέτρο είναι περίπου 5000 MPa μεγαλύτερο από το στατικό, για τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που είναι μεγαλύτερες από 15.000 MPa.

Στο σχήμα 4.4. (13) φαίνεται η σχέση μεταξύ του στατικού και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας για σταθεροποιημένα με τσιμέντο υλικά.



Σχ. 4.4.

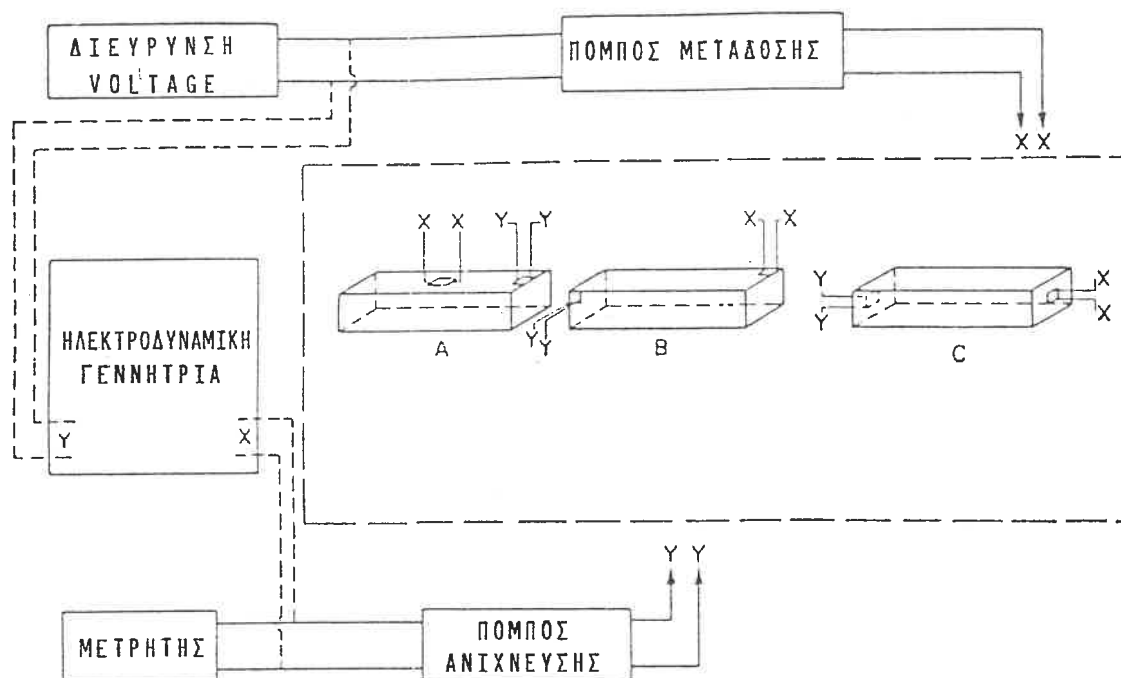
4.5.1.1. Εξοπλισμός και διαδικασία της δοκιμής

Ο ταλαντωτής ρυθμιζόμενης συχνότητας (ηλεκτροδυναμική γεννήτρια) πρέπει να επιβάλλει ταλαντώσεις της τάξεως των 10.000 - 20.000 Hz. Επίσης απαιτούνται 2 πομποί ώστε ο ένας να μεταδίδει την ταλάντωση στο δοκίμιο και ο άλλος να την ανιχνεύει στο άλλο άκρο του δοκιμίου. Στη συνέχεια πρέπει να υπάρχει συσκευή διεύρυνσης του voltage και ένα μιλι-αμπερόμετρο από τις ενδείξεις του οποίου παρακολουθείται το εύρος της ταλάντωσης.

Για να επιτευχθεί συντονισμός μεταξύ της επιβαλλόμενης συχνότητας και της ιδιοσυχνότητας του δοκιμίου, μεταβάλλεται η συχνότητα των δονήσεων έως ότου επιτευχθεί στην οθόνη το μέγιστο εύρος ταλαντώσεως.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην στήριξη του δοκιμίου, που πρέπει να γίνεται πάνω σε ειδική βάση, ώστε να μένει ανεπηρέαστο από εξωτερικές επιρροές (π.χ. κουνήματα, αλλαγή θέσης). Βασική επίσης είναι η χρησιμοποίηση κατάλληλου υλικού π.χ. γράσσου μεταξύ των μεταδοτών και των επιφανειών του δοκιμίου, που έρχονται σε επαφή μ' αυτούς, ώστε να επιτυγχάνεται καλή ακουστική επαφή μεταξύ τους.

Στο σχήμα 4.5. φαίνεται ο εξοπλισμός και η διάταξη των συσκευών που χρησιμοποιούνται στην δοκιμή αυτή.



Σχ. 4.5.

Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της συχνότητας συντονισμού (η), που προσδιορίστηκε με την παραπάνω μέθοδο, του μήκους του δοκιμίου (L) και της πυκνότητας (ρ). Η σχέση αυτή είναι : (10), (14)

$$E_d = 4 * f^2 * l^2 * \rho$$

4.5.2. Μέθοδος των υπερήχων

Με τη δοκιμή αυτή προσδιορίζεται η ταχύτητα διάδοσης του υπερήχου μέσα από το δοκίμιο.

Ένας παλμός διαμήκους δόνησης παράγεται από έναν ηλεκτροακουστικό μεταδότη, ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με μία επιφάνεια του δοκιμίου. Αυτός, αφού διανύσει μία διαδρομή γνωστού μήκους L , μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, από ένα δεύτερο ηλεκτροακουστικό μεταδότη και με τη βοήθεια κατάλληλων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, μετριέται χρόνος διέλευσης t

$$\text{Η ταχύτητα διέλευσης είναι } U = \frac{L}{t}$$

Για γνωστό λόγο του Poisson (μ), το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, συναρτήσει της ταχύτητας (u) και της πυκνότητας (ρ) είναι :

$$E = \frac{(1+\mu) * (1-2\mu)}{(1-\mu)} * \rho * u^2$$

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της δοκιμής, εξαρτάται από την ακριβή γνώση της πυκνότητας του δοκιμίου, αφού επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την ταχύτητα διάδοσης του υπερήχου.

Εκτός από τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, η μέθοδος των υπερήχων χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος. Μπορεί να εφαρμοστεί επίσης και για την ανίχνευση ρωγμών ή μεγάλων κενών μέσα στη μάζα του σκυροδέματος. Ο χρόνος διέλευσης του υπερήχου, στην περίπτωση που εκτρέπεται και οδεύει περιμετρικώς μιας ανωμαλίας, είναι αισθητά μεγαλύτερος του αντίστοιχου σε ομοιογενές μίγμα.

4.6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΩΝ ΟΠΟΙΩΝ Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΤΑΙ ΑΠΟ ΔΥΟ Η ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΕΣ ΦΑΣΕΙΣ

4.6.1. Γενικά

Το σκυρόδεμα και κατ' αναλογία τα κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά μπορούν να θεωρηθούν ως "σύνθετα" υλικά.

Ενα υλικό ορίζεται ως "σύνθετο" αν προέρχεται από ανάμιξη δύο τουλάχιστον, χημικώς και μηχανικώς, διαφορετικών υλικών. (7) Το υλικό αυτό πολλαπλών φάσεων έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα υλικά που το αποτελούν.

Τα κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά λοιπόν, σε μακροσκοπικό επίπεδο αποτελούνται από χονδρόκοικα αδρανή που επιπλέουν στο συνδετικό υλικό. Σε αναλυτικότερη μορφή το συνδετικό υλικό αποτελείται από τους κόκκους της άμμου, οι οποίοι περικλείονται από τον τσιμεντοπολτό. Σε μικροσκοπική

ανάλυση, ο τσιμεντοπολτός αποτελείται κυρίως από ένυδρες ασβεστοπυριτικές και ασβεσταργιλικές ενώσεις και υδροξείδιο του ασβεστίου, τα οποία σχηματίζουν ένα μεγάλο δίκτυο από τριχοειδείς πόρους, που μπορεί να είναι σε ξηρή κατάσταση ή γεμάτοι νερό. Σε ακόμη αναλυτικότερο επίπεδο ο άνθρακας, το θείο και το υδρογόνο, είναι ένα μίγμα κρυστάλλων, που έχουν διάφορα σχήματα και ανόμοια χημική συμπεριφορά. Τέλος, τα αδρανή από μόνα τους είναι σύνθετα υλικά, διότι έχουν σύνθετη ορυκτολογική σύσταση και μεγάλο δίκτυο πόρων.

Φαίνεται λοιπόν πόσο πολυσύνθετη είναι η δομή του σκυροδέματος. Παρόλ' αυτά αν γίνουν ορισμένες απλοποιητικές παραδοχές, μπορεί να διαμορφωθεί ένα μαθηματικό μοντέλο, που θα μας επιτρέπει να προσδιορίζουμε τη σχέση μεταξύ της δομής του σκυροδέματος και των υλικών που το αποτελούν.

Μπορεί λοιπόν το σκυρόδεμα να προσομοιωθεί ως υλικό δύο φάσεων, οι οποίες είναι η φάση των αδρανών και η φάση του τσιμεντοπολτού. Θεωρείται επίσης ότι η φάση των αδρανών είναι ομογενής, ισότροπη και ελαστική, πράγμα το οποίο είναι αληθές, και η φάση του τσιμεντοπολτού είναι επίσης ελαστική, γεγονός που δεν είναι αληθές.⁽²⁹⁾

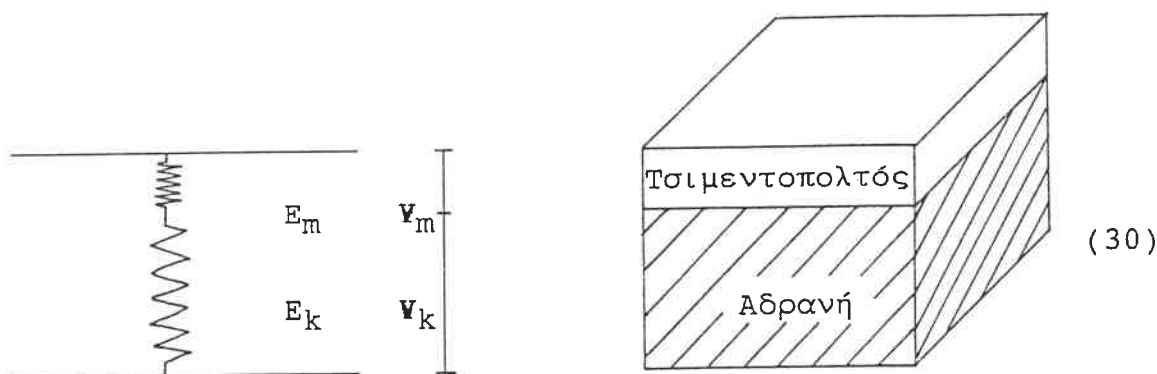
Η εμπειρία έχει δείξει ότι ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να προσομοιάσει σε ικανοποιητικό βαθμό την μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος και γενικά των κατεργασμένων με τσιμέντο υλικών, όταν γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά των φάσεων που το αντιπροσωπεύουν.

4.6.2. Τα βασικά μοντέλα δύο φάσεων

Αν τα μέτρα ελαστικότητας του τσιμεντοπολτού και των αδρανών, δεν έχουν την ίδια τιμή, τότε οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στο σκυρόδεμα δεν είναι πουθενά ομοιόμορφες, οποιασδήποτε μορφής κι αν είναι η εξωτερική φόρτιση. Παρά το γεγονός αυτό τα δύο πιο απλά μοντέλα που έχουν παρουσιαστεί, παραδέχονται είτε ότι η επιβαλλόμενη τάση είναι σταθερή, είτε ότι η προκαλούμενη παραμόρφωση είναι σταθερή.

4.6.2.1. Μοντέλο Reuss

Το απλό μοντέλο σταθερής τάσεως, γνωστό ως μοντέλο Reuss, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6.



Σχ. 4.6.

Για να απλοποιηθεί το μοντέλο τα αδρανή θεωρούνται ότι είναι συγκεντρωμένα ξεχωριστά από τον τσιμεντοπολτό. Η συνολική παραμόρφωση είναι ίση με το άθροισμα των

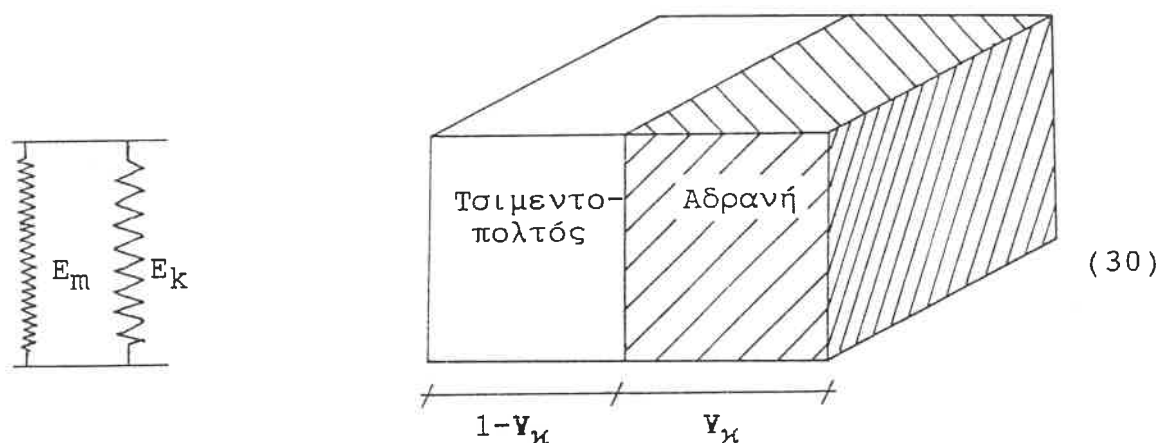
παραμορφώσεων της φάσεως των αδρανών και της φάσεως του τσιμεντοπολτού.

$$\text{Έτσι : } \frac{\sigma}{E} = \frac{V_k * \sigma}{E_k} + \frac{(1-V_k) * \sigma}{E_m} \Rightarrow$$

$$E = \frac{1}{\frac{V_k}{E_k} + \frac{1-V_k}{E_m}}$$

4.6.2.2. Μοντέλο Voigt

Το δεύτερο απλό μοντέλο θεωρεί την παραμόρφωση σταθερή και είναι γνωστό ως μοντέλο Voigt.



Σχ. 4.7.

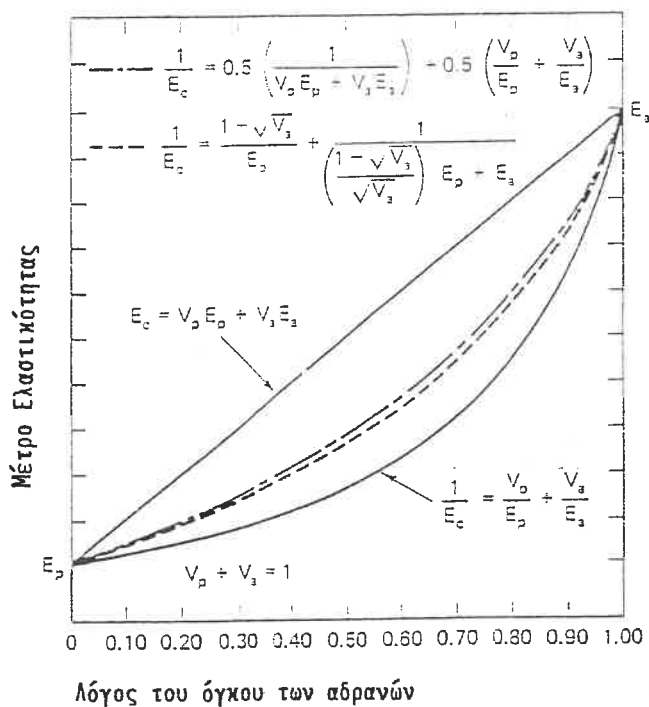
Η συνολική επιβαλλόμενη πίεση ισούται με την τάση που δέχονται τα αδρανή και την τάση που αναλαμβάνει ο τσιμεντοπολτός.

$$\text{Έτσι : } \varepsilon * E = V_k * E_k * e + (1-V_k) * E_m * e \Rightarrow$$

$$E = E_m * (1-V_k) + E_k * V_k$$

4.6.3. Σύγκριση μοντέλων Reuss - Voigt

Οι προβλέψεις του μέτρου ελαστικότητας από τις θεωρίες του Voigt και Reuss φαίνονται στο σχήμα 4.8.



Σχ. 4.8.

Το μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τη θεωρία της σταθερής παραμορφώσεως (Voigt) φαίνεται ότι είναι μεγαλύτερο από αυτό που προβλέπεται από τη θεωρία της σταθερής τάσεως (Reuss). Έχει αποδειχθεί από τον Hill (29) ότι το πραγματικό μέτρο ελαστικότητας ενός υλικού δύο φάσεων, το οποίο θεωρείται ομογενές σε μακροσκοπική κλίμακα βρίσκεται μεταξύ των προβλέψεων των Reuss και Voigt ανεξαρτήτως της γεωμετρίας του υλικού.

Η εξίσωση που βασίζεται στη θεωρία του Voigt, θεωρείται ότι είναι το ανώτερο όριο για το μέτρο ελαστικότητας των υλικών δύο φάσεων. Η δε εξίσωση του Reuss θεωρείται ως το κατώτερο όριο των τιμών του μέτρου ελαστικότητας των υλικών αυτής της φύσεως. (30)

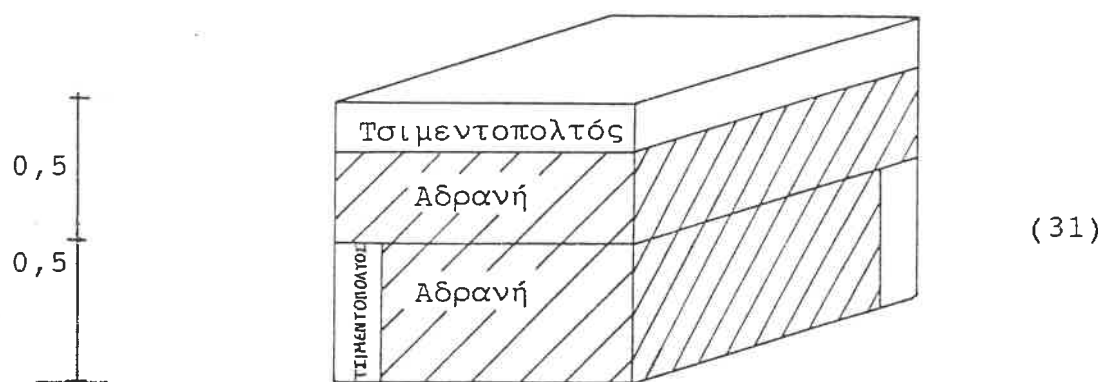
Το είδος του σκυροδέματος που περιέχει τα φυσικά, συνηθισμένα αδρανή (η σκληρότητα των αδρανών είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του τσιμεντοπολτού), παρουσιάζει μέτρο ελαστικότητας αρκετά κοντά στο χαμηλότερο όριο που περιγράφεται από το μοντέλο της σταθερής τάσης. Στην αντίθετη περίπτωση, το σκυρόδεμα που είναι παρασκευασμένο από ελαφρά αδρανή (η σκληρότητα των αδρανών είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του τσιμεντοπολτού), έχει τα χαρακτηριστικά που πλησιάζουν περισσότερο στο μοντέλο σταθερής παραμόρφωσης. Για το σκυρόδεμα που περιέχει τα συνηθισμένα αδρανή, το μοντέλο Reuss υποεκτιμά το μέτρο ελαστικότητας κατά περίπου 10%, ενώ το μοντέλο Voigt υπερεκτιμά το μέτρο ελαστικότητας σε μεγαλύτερο βαθμό. (7)

4.6.4. Επιπρόσθετα μοντέλα υλικών δύο φάσεων

Η ανάγκη να επιτευχθεί λεπτομερέστερη αντιστοιχία μεταξύ του πραγματικού μέτρου ελαστικότητας και του αντίστοιχου προβλεπομένου, παρουσιάστηκε ένας αριθμός εναλλακτικών μοντέλων από διάφορους ερευνητές.

4.6.4.1. Το μοντέλο Hirsch

Το μοντέλο αυτό προκύπτει από το συνδυασμό των μοντέλων Reuss και Voigt.



Σχ. 4.9.

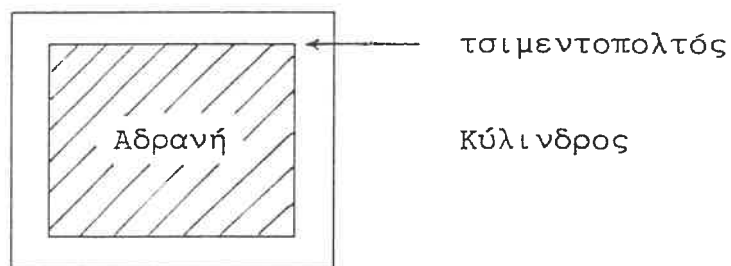
Το μέτρο ελαστικότητας που προκύπτει από τη θεωρία αυτή είναι :

$$E = \frac{1}{\frac{0,5}{V_k \cdot E_k + (1 - V_k) \cdot E_m} + 0,5 \cdot \frac{V_k}{E_k} + \frac{1 - V_k}{E_m}} \quad (31)$$

Στην παραπάνω εξίσωση κατέληξε και ο Κουφόπουλος ξεκινώντας από διαφορετικό πρότυπο δομής. (32) Η εξίσωση αυτή βρέθηκε από το Counto ότι δίνει καλή προσαρμογή, όταν χρησιμοποιούνται ελαφρά αδρανή. Ένας περιορισμός στην παραπάνω εξίσωση είναι ότι, όταν το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών γίνει 0 ($V_k = 0$) τότε το μέτρο ελαστικότητας γίνεται 0, το οποίο δεν είναι αληθές.

4.6.4.2. Μοντέλο Counto

Το μοντέλο Counto, είναι μια τροποποίηση του μοντέλου Voigt. Σύμφωνα με αυτό, όλα τα αδρανή είναι συγκεντρωμένα σε σχήμα κυλίνδρου και είναι τοποθετημένα κεντρικά σε έναν κύλινδρο από σκυρόδεμα. Και οι δύο κύλινδροι έχουν τον ίδιο λόγο ύψους προς εμβαδό διατομής.



Σχ. 4.10.

Το μέτρο ελαστικότητας που προκύπτει απ' αυτή τη θεωρία είναι :

$$E = \frac{1}{\frac{1-V_k}{E_m} + \frac{V_k}{V_k \cdot E_k + (1-V_k) \cdot E_m}}$$

Ο Counto βρήκε ότι το μέτρο ελαστικότητας που μετρήθηκε σε διάφορα πειράματα βρίσκεται σε συμφωνία με την παραπάνω σχέση. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν από τον Counto ήταν : χάλυβας, χυτοσίδηρος, πυριτικά χαλίκια και γυαλί.

4.6.4.3. Μοντέλο Hashin

Το μοντέλο Hashin δίνει πιο ρεαλιστική ανάλυση της συμπεριφοράς των κατεργασμένων υλικών με τσιμέντο. Σύμφωνα μ' αυτή τη θεωρία ο τσιμεντοπολτός σχηματίζει την μορφή μιας σφαίρας στο κέντρο της οποίας βρίσκεται μιά άλλη σφαίρα, στην οποία είναι συγκεντρωμένα όλα τα αδρανή.



Σχ. 4.11

$$V_m = 1 - V_k$$

Η θεωρία αυτή λαμβάνει υπόψη της το λόγο του Poisson και γίνεται η παραδοχή ότι ο λόγος είναι ο ίδιος και για το σύνθετο υλικό και για κάθε μια από τις δύο φάσεις ($\mu = \mu_k = \mu_m = 0,2$)

Η εξίσωση του μέτρου ελαστικότητας που προκύπτει είναι η εξής :

$$E = \left[\frac{(1-V_k) \cdot E_m + (1+V_k) \cdot E_k}{(1+V_k) \cdot E_m + (1-V_k) \cdot E_k} \right] \cdot E_m$$

Προκειμένου τα αποτελέσματα από την παραπάνω εξίσωση να είναι ρεαλιστικά θα πρέπει να ισχύουν οι παρακάτω απαιτήσεις.

- α) Να μην υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των κόκκων των αδρανών
- β) Να υπάρχει μεγάλη συνάφεια μεταξύ των αδρανών και του τσιμεντοπολτού.

Παρόλο που η πρώτη είναι μια λογική παραδοχή κοντά στην πραγματική συμπεριφορά των υλικών, η δεύτερη είναι σχεδόν ανέφικτη. (7)

4.6.5. Δεσμοί μεταξύ αδρανών και τσιμεντοπολτού

Η αντοχή του σκυροδέματος γενικά, εξαρτάται από την αντοχή του τσιμεντοπολτού, την αντοχή των αδρανών και την αντοχή της διεπιφάνειας του τσιμεντοπολτού και των αδρανών. Ακριβώς αυτή η διεπιφάνεια είναι το ασθενέστερο πεδίο του σκυροδέματος. Γενικά η αστοχία της συνδέσεως των αδρανών και του τσιμεντοπολτού παρουσιάζεται νωρίτερα από την αστοχία των αδρανών και του τσιμεντοπολτού ξεχωριστά. Αυτές οι δυνάμεις συνάφειας είναι δυνάμεις Van der Waals και εξαρτώνται από το σχήμα και την τραχύτητα των αδρανών. Η αντοχή του σκυρο-

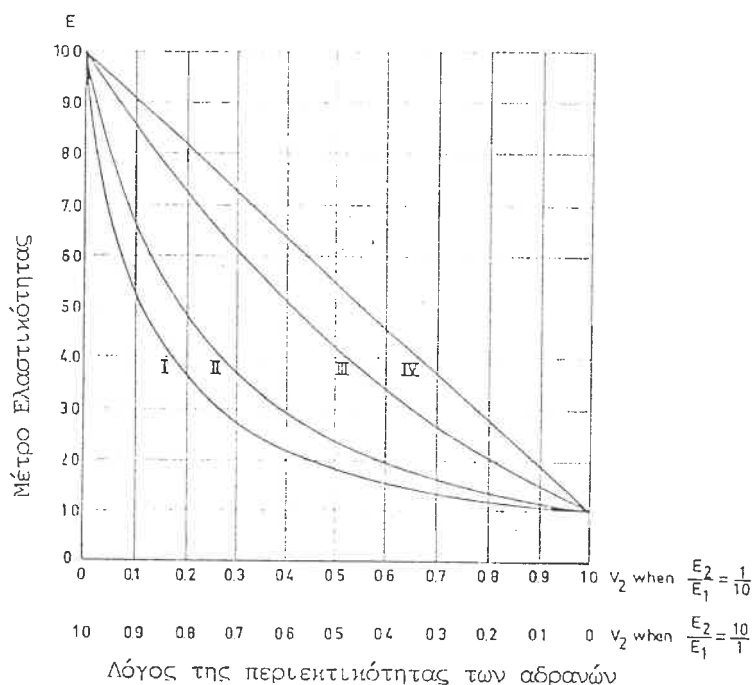
δέματος, σε κάμψη και εφελκυσμό, που είναι παρασκευασμένο από θραυστά αδρανή με ανώμαλες επιφάνειες, είναι πολλές φορές μέχρι 30% μεγαλύτερη από το σκυρόδεμα που είναι παρασκευασμένο με λεία αδρανή που έχουν στρογγυλεμένες επιφάνειες.

Αυτός ο δεσμός συνάφειας μεταξύ του τσιμεντοπολτού και των αδρανών είναι πολύ αδύνατος, διότι εμφανίζονται μικρορωγμές στην διεπιφάνεια, ακόμα κι αν υπάρχει συνεχής συντήρηση σε υγρό περιβάλλον, πριν από την επιβολή εξωτερικών φορτίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα αδρανή υφίστανται ογκομετρικές αλλαγές, λόγω συστολής ή διαστολής, διαφορετικές από τον περιβάλλοντα τσιμεντοπολτό, που σημαίνει ότι αναπτύσσονται διαφορετικές παραμορφώσεις (λόγω των διαφορετικών μέτρων ελαστικότητας) και επέρχεται ασυνέχεια με τη δημιουργία μικρορωγμών.⁽⁷⁾

Η επιρροή των δεσμών που περιγράψαμε στο μέτρο ελαστικότητας των υλικών 2 φάσεων επισημαίνονται από πειράματα που πραγματοποίησε ο Dantinne. Μετρήθηκε λοιπόν δυναμικό μέτρο ελαστικότητας 43,5 GPa σε σκυρόδεμα του οποίου τα αδρανή ήταν περιβεβλημένα με λεπτό στρώμα ασφάλτου, το οποίο εμποδίζει την ανάπτυξη δεσμών συνάφειας μεταξύ του τσιμεντοπολτού και των αδρανών. Στη συνέχεια μετρήθηκε ηλεκτροδυναμικό μέτρο ελαστικότητας 46,6 GPa σε σκυρόδεμα, που αποτελείτο από παρόμοια αδρανή, χωρίς να είναι προεπαλλειμένα, ώστε να αναπτύσσονται οι φυσιολογικοί δεσμοί συνάφειας. (34)

4.6.6. Συμπεράσματα

Στο σχήμα 4.12. φαίνεται η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας ενός ετερογενούς υλικού 2 φάσεων σε συνάρτηση με την αναλογία του όγκου των αδρανών που καταλαμβάνουν μέσα στο υλικό.



Σχ. 4.12.

Η φυσική σημασία των καμπύλων I, II, III, IV αναλύεται παρακάτω :

I : Θεωρητικό ελάχιστο όριο για το μέτρο ελαστικότητας υλικών 2 φάσεων, που αποτελούνται από αδρανή με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, ομοιόμορφα κατανεμημένα στον τσιμεντοπολτό, που έχει μικρότερο μέτρο ελαστικότητας. Επισημαίνεται ότι δεν θεωρείται κανένας δεσμός συνάφειας μεταξύ των αδρανών και του τσιμεντοπολτού.

II : Παριστάνει το μέτρο ελαστικότητας υλικών 2 φάσεων που αποτελούνται από σφαιρικά αδρανή, μεγάλου μέτρου ελαστικότητας, που περιβάλλονται από τον τσιμεντοπολτό που έχει μικρότερο μέτρο ελαστικότητας. Γίνεται επίσης η θέωρηση ότι υπάρχει μέγιστος βαθμός συνάφειας μεταξύ των αδρανών και του τσιμεντοπολτού.

III : Δίνει το μέτρο ελαστικότητας υλικών δύο φάσεων, των οποίων τα αδρανή έχουν σφαιρική μορφή και μικρό μέτρο ελαστικότητας και περιβάλλονται από τον τσιμεντοπολτό με μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας.

IV : Θεωρητικό μέγιστο όριο του μέτρου ελαστικότητας των υλικών 2 φάσεων. Αυτό το μέγιστο όριο προσεγγίζεται όταν το υλικό μπορεί να αντιπροσωπευτεί πλήρως από το μοντέλο κοινής παραμόρφωσης (Voigt).

Το μέτρο ελαστικότητας των υλικών που μπορούν να αντιπροσωπευθούν από δύο φάσεις, βρίσκεται στην πραγματικότητα στην περιοχή μεταξύ των καμπύλων I και II όταν υπάρχει μερικός βαθμός συνάφειας μεταξύ των αδρανών και του τσιμεντοπολτού.

Η θεωρία του Hashin, που αναπτύχθηκε σε προηγούμενη παράγραφο και που δίνει μέτρα ελαστικότητας που παριστάνονται από τις καμπύλες II και III (αναλόγως της σχέσης μεταξύ των μέτρων ελαστικότητας των αδρανών και του τσιμεντοπολτού αντίστοιχα), βασίζεται στις παραδοχές ότι δεν υπάρχει

αλληλεπίδραση μεταξύ των κόκκων των αδρανών και ότι αυτοί οι κόκκοι έχουν σφαιρική μορφή.

Στην πραγματικότητα όμως υπάρχει, έστω και σε μικρό βαθμό, αλληλεπίδραση μεταξύ των αδρανών, όπως επίσης είναι συνηθισμένο οι κόκκοι να μην είναι σφαιρικής μορφής. Έτσι το μέτρο ελαστικότητας των πραγματικών υλικών βρίσκεται στο πεδίο τιμών μεταξύ των καμπύλων II και III.

4.7. ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΡΙΩΝ ΦΑΣΕΩΝ

Μέχρι τώρα θεωρήθηκε ότι το σκυρόδεμα και γενικά τα κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά μπορούν να αντιπροσωπευθούν μόνο από 2 φάσεις. Μπορεί όμως να αναπτυχθεί η θεωρία ότι αντιπροσωπεύονται από τρεις φάσεις, οι δύο εκ των οποίων περιγράφουν τον τσιμεντοπολτό και είναι οι εξής :

- α) στερεά κομμάτια αποτελούμενα από ενυδατωμένο ή ανυδάτωτο τσιμέντο και
- β) κενά αέρος.

Ενα πλήθος ερευνητών, χρησιμοποιώντας ο καθένας διαφορετική μέθοδο, ακολουθώντας όμως τη θεωρία της ελαστικότητας, κατέληξαν στη σχέση :

$$\frac{1}{K_{por}} = \frac{1}{K_{sol}} \left[1 + \frac{3}{2} * \frac{(1-\nu_{sol})}{(1-2*\nu_{sol})} * \frac{n}{1-n} \right]$$

όπου

K_{por} και K_{sol} τα μέτρα διογκώσεως του πορώδους και του στερεού υλικού αντίστοιχα και n το πορώδες. Το μέτρο διογκώσεως εκφράζει την αντίσταση του υλικού στην μεταβολή του όγκου του.⁽⁴⁷⁾ Αν ο λόγος Poisson του πορώδους υλικού και του στερεού μέρους θεωρηθεί ίσος και αν $\nu_{sol} = 0,20$ τότε η προηγούμενη εξίσωση μετατρέπεται και παίρνει την εξής μορφή :

$$E_{por} = E_{sol} \left[\frac{1-n}{1+n} \right]$$

όπου E_s το μέτρο ελαστικότητας του στερεού υλικού. Για μικρές τιμές του πορώδους η προηγούμενη εξίσωση παίρνει τη μορφή :

$$E_{por} = E_{sol} * (1-2n)$$

Ολες οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν για πολύ μικρές τιμές του πορώδους.

Επιπροσθέτως έχουν συνταχθεί και άλλες εμπειρικές εξισώσεις για να παρασταθεί η εξάρτηση του E_{por} από το πορώδες :

εξίσωση Powers $E_{por} = E_{sol} * (1-n)^3$

εξίσωση Hansen $E_{por} = E_{sol} * \frac{(1-n)}{1+2n}$

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε να εφαρμοστούν οι παραπάνω τύποι χωρίς όμως επιτυχία.

Θεωρήθηκε ειδικό βάρος των αδρανών 2700 Kgr/m^3 , του τσιμέντου 3100 Kgr/m^3 του νερού 1000 Kgr/m^3 , και της ασφάλτου

1020 Kgr/m³ των αδρανών στο σύνολο του μίγματος.

$$\frac{A\delta}{2700} + \frac{T}{3100} + \frac{N}{1000} + \frac{A\sigma}{1020} + \frac{1}{100} = 1 \quad (1)$$

$$A\sigma = \frac{4,5}{95,5} A\delta \quad (2)$$

$$T = \frac{5}{100} (A\delta + A\sigma) \quad (3)$$

$$N = \frac{5}{100} (A\delta + A\sigma + T) \quad (4)$$

$$\implies A\delta = 2000 \text{ Kgr}$$

$$A\sigma = 94 \text{ Kgr}$$

$$T = 105 \text{ Kgr}$$

$$N = 110 \text{ Kgr}$$

$$\implies V_A = V_{A\delta} + V_{A\sigma} = \frac{2000}{2700} + \frac{94}{1020} = 83,3 \%$$

Θεωρείται ότι τα αδρανή έχουν μέτρο ελαστικότητας 80 GPa και περιβάλλονται από λεπτό στρώμα ασφάλτου. Το μέτρο ελαστικότητας του τσιμεντοπολτού θεωρείται 10 GPa. Αν στην

εξίσωση του Hansen $E_{por} = E_{sol} * \frac{(1-n)}{1+2n}$ όπου n θεωρείται το

πορώδες, θεωρήσαμε ότι τη θέση των πόρων την καταλαμβάνει η ασφαλτος τότε το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών γίνεται :

$$E = 80 * \frac{1 - 0,045}{1 + 2 * 0,045} = 70 \text{ GPa}$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση :

$$E = \frac{(E_{agg}-E_{pa}) * V_{agg} + (E_{pa}+E_{agg})}{(E_{pa}+E_{agg}) + (E_{pa}-E_{agg}) * V_{agg}} * E_{pa}$$

βρίσκουμε το μέτρο ελαστικότητας του υλικού

$$E = \frac{(70-10) * 0.833 + (10+70)}{(70+10) + (10-70) * 0,833} * 10 \implies E = 43,3 \text{ GPa}$$

Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας απέχει πολύ από την πραγματικότητα.

Αν θεωρήσουμε ότι η άσφαλτος καλύπτει τα κενά αέρος του τσιμεντοπολτού τότε το μέτρο ελαστικότητας του τσιμεντοπολτού γίνεται :

$$E = 10 * \frac{1 - 0,045}{1 + 2 * 0,045} = 8,76 \text{ GPa}$$

Υπολογίζουμε στη συνέχεια τον λόγο του όγκου των αδρανών :

Επιλύεται το παραπάνω σύστημα

$$\frac{A}{2700} + \frac{T}{3100} + \frac{N}{1000} + \frac{4,5}{100} = 1 \quad (\text{I})$$

$$T = 0,05 * A \quad (\text{II})$$

$$N = 0,05 * (T + A) \quad (\text{III})$$

$$\implies A = 2175 \text{ Kgr} \implies V_A = \frac{2175}{2700} = 80\%$$

Επομένως το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού είναι :

$$E = \frac{(80-8,76) * 0,80 + (80+8,76)}{(8,76+80) + (8,86-80) * 0,80} * 8,76 \implies E = 40,2 \text{ GPa}$$

Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας που υπολογίστηκε δεν είναι ρεαλιστική.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

Μέθοδος και όργανα μετρήσεως
παραμορφώσεων

5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

5.1. ΓΕΝΙΚΑ

Μετρητής παραμορφώσεων ορίζεται κάθε όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της γραμμικής παραμόρφωσης σε δεδομένο μήκος παραμόρφωσης. (8)

Οι μετρητές παραμορφώσεων ή μηκυνσιόμετρα μπορούν να καταταγούν ανάλογα με το σύστημα μεγέθυσής τους ως εξής :

1. Μηχανικά μηκυνσιόμετρα

- με χρησιμοποίηση συστήματος μοχλών
- με χρησιμοποίηση οδοντωτών τροχών και κανόνων
- συνδυασμός των δύο παραπάνω συστημάτων

2. Μηχανικά-οπτικά μηκυνσιόμετρα

3. Οπτικά μηκυνσιόμετρα

4. Ακουστικά μηκυνσιόμετρα

5. Ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα

- με καθαρή ωμική αντίσταση
- με επαγωγική αντίσταση
- με χωρητική αντίσταση
- πιεζοηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα

6. Μηκυνσιόμετρα με πίεση αέρα.

Τα ακουστικά και τα ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα πετυχαίνουν την μεγέθυσή τους με τη βοήθεια ηλεκτρικών ενισχυτών. Παρακάτω περιγράφονται τα μηχανικά και τα ηλεκτρικά

μηκυνσιόμετρα, με ιδιαίτερη έμφαση στα ηλεκτρικά με καθαρά ωμική αντίσταση, μιάς και αυτά χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές θλίψης, προκειμένου να υπολογιστεί το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος του Poisson των σταθεροποιημένων με τσιμέντο υλικών.

5.2. ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ

Σ' αυτήν την κατηγορία ανήκουν δύο τύποι :

- A. - μηκυνσιόμετρα με απλό σύστημα μοχλών που επιτυγχάνουν τη μεγέθυνση με κατάλληλη τοποθέτηση του υπομοχλίου. Ο παράγοντας μεγέθυνσης είναι της τάξης 20 έως 40.
- μηκυνσιόμετρα με σύνθετο σύστημα μοχλών, που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των παραμορφώσεων, λόγω του σχετικά μικρού μεγέθους τους και του μεγάλου συντελεστή μεγέθυνσης (300 ± 2000). Αποτελούνται από 2 ή περισσότερους μοχλούς σε σειρά. Μειονέκτημα τους είναι η μεγάλη ευαισθησία τους σε κάθε δόνηση που μπορεί να γίνει κατά τη διάρκεια της δοκιμής, με αποτέλεσμα να δίνει αμφίβολες μετρήσεις.
- B. - Μηκυνσιόμετρα με κανόνα και οδοντωτούς τροχούς ή ωρολογιακά μηκυνσιόμετρα.

Σ' αυτά τα μηκυνσιόμετρα το σύστημα μοχλών αντικαθίσταται με σύστημα οδοντωτών τροχών και οδοντωτού κανόνα. Το όλο σύστημα εγκλείεται μέσα σε μία πυξίδα, μορφής ρολογιού, του οποίου ο δείκτης δείχνει την παραμόρφωση.

5.3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ

Τα ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα χωρίζονται στα μηκυνσιόμετρα με ωμική αντίσταση, με επαγωγική αντίσταση, με χωρητική αντίσταση και τα πιεζοηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα.

Παρακάτω δίνεται μιά σύντομη περιγραφή όλων των κατηγοριών εκτός από τα ωμικά μηκυνσιόμετρα, των οποίων η λειτουργία θα αναπτυχθεί εκτενώς, διότι αυτά χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

5.3.1. Ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα με επαγωγή (LVDT)

Τα μηκυνσιόμετρα αυτά αποτελούνται από περιέλιξη που περιβάλλει ένα πυρήνα από σίδηρο μεταβλητής επαγωγής.

Η μεταβολή της επαγωγής πετυχαίνεται, είτε με την μεταβολή της απόστασης κενού αέρα μέσα στο κύκλωμα ροής λόγω διακοπής του πυρήνα, είτε με την κίνηση του οπλισμού μέσα στην περιέλιξη.

Ο τύπος μετρητή με κενό αέρα είναι πολύ ευαίσθητος, γι' αυτό περιορίζεται για μετρήσεις μικρών παραμορφώσεων.

5.3.2. Ηλεκτρικά μηχανισιόμετρα με χωρητικότητα

Σ' αυτά η χωρητικότητα του πυκνωτή μεταβάλλεται με την αυξομείωση της απόστασης μεταξύ των πλακών του. Υπάρχουν μειονεκτήματα, γι' αυτό οι μετρητές αυτοί είναι δύσχρηστοι.

5.3.3. Πιεζοηλεκτρικά ηλεκτρομηχανισιόμετρα

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο που παρατηρείται σε ορισμένους κρυστάλλους, όπως ο χαλαζίας χρησιμοποιείται για την μετατροπή των τάσεων και παραμορφώσεων σε ηλεκτρικά σήματα.

5.4. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ ΜΕ ΩΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (strain-gauges)

5.4.1. Γενικά

Είναι γνωστό από τον Kelvin (1856) ότι οι αντιστάσεις χάλκινου ή σιδερένιου σύρματος αλλάζουν όταν υποβληθούν σε μια παραμόρφωση. Στηριζόμενος σ' αυτήν την αρχή ο Simmons το 1934 κατασκεύασε τον πρώτο πρακτικό μετρητή παραμόρφωσης με αντίσταση στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο Καλλιφόρνιας. Η εξέλιξη αυτού του μετρητή έγινε από τον καθηγητή Ruge στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο Μασσαχουσέτης και έτσι προέκυψε ο σημερινός μετρητής με αντίσταση, που έχει μεγάλη εφαρμογή στη μέτρηση παραμορφώσεων.

Ο τύπος αυτός αποτελείται από έσχάρα από λεπτό σύρμα, κατασκευασμένο από ειδικό κράμα μετάλλων διαμέτρου 0,001 in., η οποία είναι τοποθετημένη ανάμεσα σε δύο φύλλα χαρτιού. Για να χρησιμοποιηθεί ο μετρητής, είτε προσκολλάται με κατάλληλο υλικό στο δοκίμιο, είτε προσαρμόζεται με ειδικό τρόπο στήριξης.

Τα άκρα του λεπτού σύρματος του μετρητή προσκολλώνται σε παχύτερους αγωγούς μέσω των οποίων διοχετεύεται το ηλεκτρικό ρεύμα.

5.4.2. Είδη ηλεκτρομηκυνσιομέτρων με ωμική αντίσταση

Υπάρχουν δύο κατηγορίες όσον αφορά το υλικό της συρμάτινης αντίστασης.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει ένα κράμα με 45% νικέλιο και 55% χαλκό.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει πιο πολυσύνθετο κράμα που αποτελείται από 33÷35% νικέλιο, 4% πυριτικό μαγγάνιο, μολυβδένιο 0,5% σίδηρο 53% και ίχνη άνθρακα και βαναδίου.

Ανάλογα με το σχήμα της εσχάρας, διακρίνονται 3 τύποι :

- επίπεδη εσχάρα, όπου το σύρμα περιστρέφεται μπρός-πίσω σε επίπεδη θέση
- ελικοειδής επίπεδη εσχάρα, όπου το σύρμα περιτυλίγεται ελικοειδώς γύρω από χάρτινο σωλήνα, μετά ισοπεδώνεται και τοποθετείται μεταξύ δύο χάρτινων περιβλημάτων.
- εσχάρα από λεπτό φύλλο μετάλλου, πάχους 0,0005 in. , που στηρίζεται είτε σε βάση από χαρτί, είτε σε εποξειδική πλαστική βάση, είτε σε βάση καλυμένη με ελαστικό κόμμι.

Ο πρώτος τύπος εσχάρας είναι ο τύπος που κυκλοφορεί περισσότερο στο εμπόριο. Το μειονέκτημα του δεύτερου τύπου, είναι το ότι η μισή εσχάρα είναι τοποθετημένη σε μια απόσταση πάχους 3 φύλλων χαρτιού, από την άλλη μισή επιφάνεια που γίνεται η δοκιμή, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται

διαφορετικές παραμορφώσεις μεταξύ αυτών των δύο τμημάτων της εσχάρας. Ο τρίτος τύπος προβλέπει τη χρήση μεταβλητών τμημάτων, καθόλο το μήκος της εσχάρας, η οποία στα άκρα της καταλήγει σε μεγάλες επιφάνειες για να γίνεται ευκολότερα η σύνδεση.

5.4.3. Υλικά εσχάρας

Κατά την επιλογή των υλικών της εσχάρας, πρέπει να ικανοποιούνται τα παρακάτω :

- υψηλός συντελεστής F (η έννοια και η σημασία του αναπτύσσεται παρακάτω)
- υψηλή ειδική αντίσταση ρ
- χαμηλή ευαισθησία στη θερμοκρασία
- υψηλή ηλεκτρική σταθερότητα
- υψηλό σημείο απόδοσης
- υψηλό όριο αντοχής
- καλή ικανότητα συγκόλλησης
- χαμηλή θερμική αντίσταση κατά τη συγκόλληση με τ' άλλα μέταλλα
- καλή αντίσταση στη διάβρωση

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μέτρησης των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες.

- η ευαισθησία στη θερμοκρασία, που αποτελεί τον κύριο παράγοντα αξιοπιστίας. Με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, επέρχεται μεταβολή στην ειδική αντίσταση ρ , με αποτέλεσμα το ηλεκτρομηκυνσιόμετρο να δίνει μια πλασματική παραμόρφωση, ωφειλόμενη στη θερμοκρασιακή μεταβολή και όχι στην παραμόρφωση του δοκιμίου.
- ο ίδιος ή διαφορετικός βαθμός διαστολής της εσχάρας του ηλεκτρομηκυνσιομέτρου και της στήριξης του. Σε περίπτωση διαφορετικής διαστολής, επέρχεται μιά παραμόρφωση, η οποία δεν μπορεί να ξεχωριστεί από την πραγματική παραμόρφωση του δοκιμίου.

5.4.4. Υλικά στήριξης εσχάρας και συνδέσμου εσχάρας-στήριξης.

Περίβλημα ηλεκτρομηκυνσιομέτρου.

Τα χαρακτηριστικά των μετάλλων που χρησιμοποιούνται για βάσεις στήριξης της εσχάρας είναι :

- ελάχιστο πάχος
- υψηλή μηχανική αντοχή
- υψηλή διηλεκτρική αντοχή
- χαμηλή ευαισθησία στη θερμοκρασία
- καλή συγκολλητική ικανότητα με την εσχάρα
- αντίσταση στην υγρασία

Τα χαρακτηριστικά του υλικού σύνδεσης της εσχάρας με την στήριξη της είναι :

- υψηλή μηχανική αντοχή
- υψηλή αντοχή στον ερπυσμό
- υψηλή διηλεκτρική αντοχή
- χαμηλή ευαισθησία στην θερμοκρασία
- καλή προσκόλληση
- ελάχιστη έλξη υγρασίας
- ευκολία στην εφαρμογή
- ικανότητα να ξηραίνεται γρήγορα

Το περίβλημα του ηλεκτρομηκυνσιομέτρου αποτελείται από δύο λεπτά φύλλα χαρτιού, συνδεδεμένα με νιτροκυταρρίνη, υλικό όμοιο με εκείνο που χρησιμοποιείται στη σύνδεση εσχάρας-στηρίγματος.

Το άνω όριο θερμοκρασίας που επιτρέπεται στη χρήση αυτών των υλικών είναι οι 90° C.

Η μηχανική αντοχή των φύλλων χαρτιού και του υλικού σύνδεσης εσχάρας-βάσης πρέπει να είναι σημαντική, γιατί αυτά θα πρέπει να μεταφέρουν τη δύναμη που απαιτείται για να παραμορφωθεί η εσχάρα.

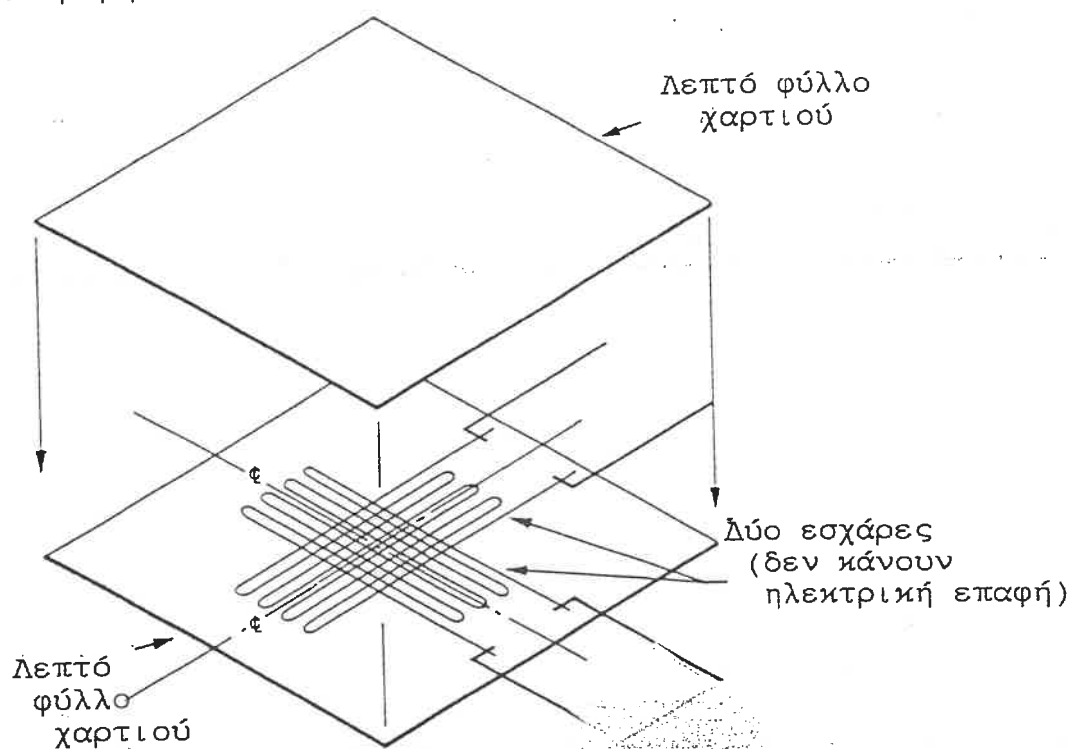
Επίσης η έλξη υγρασίας από το χάρτινο περίβλημα και το υλικό σύνδεσης εσχάρας-στήριξης πρέπει να είναι μικρή, γιατί καθώς η υγρασία απορροφάται, τα υλικά αυτά διαστέλλονται με αποτέλεσμα να δίνουν μια παραμόρφωση στην εσχάρα, που δεν οφείλεται στο φορτίο δοκιμής.

5.4.5. Διαμορφώσεις ηλεκτρομηκυνσιομέτρων

Γενικά είναι διαθέσιμα στο εμπόριο ηλεκτρομηκυνσιομέτρα με απλή εσχάρα ή πολλαπλών εσχάρων σε διαφορετικά μήκη και πλάτη που χρησιμοποιούνται σε διάφορες θερμοκρασίες, για τη μέτρηση μικρών ή μεγάλων παραμορφώσεων.

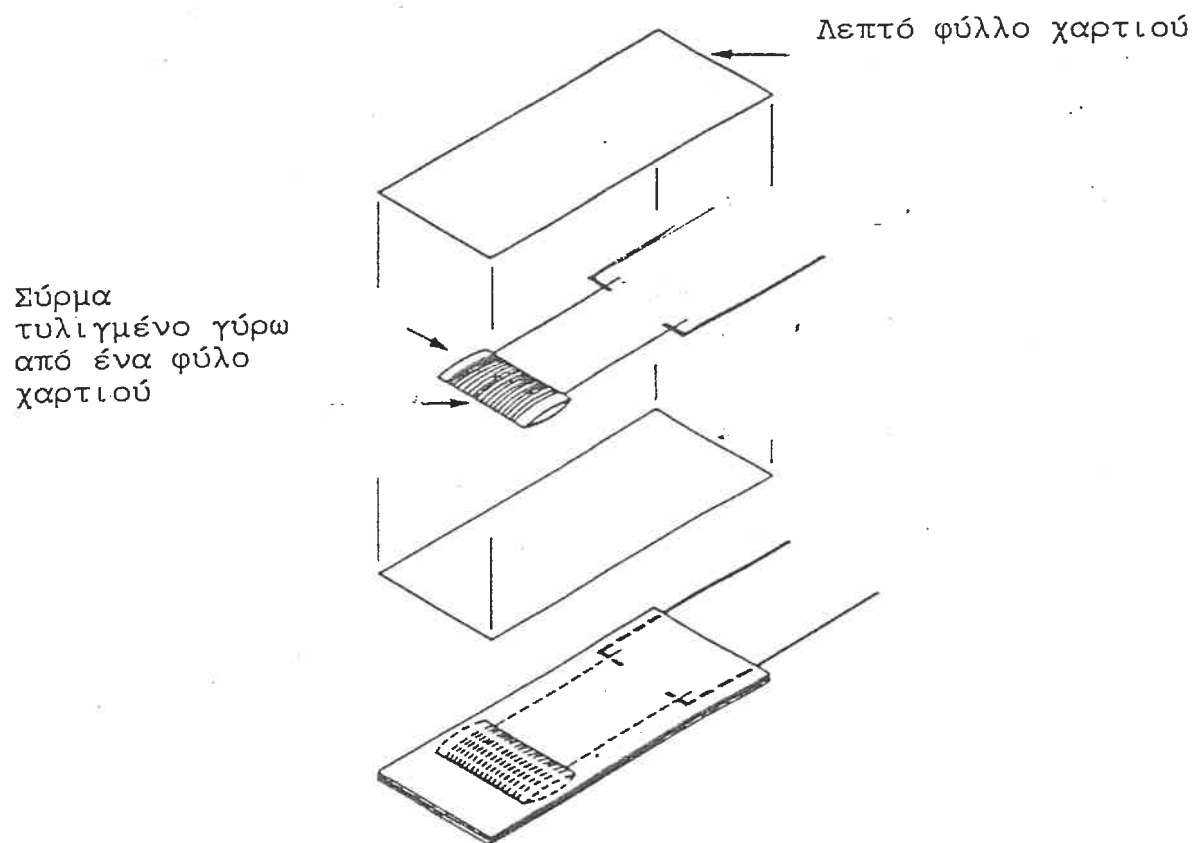
Ειδικά τα ηλεκτρομηκυνσιομέτρα πολλαπλών εσχάρων, τα ονομαζόμενα "rossetes" χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση παραμορφώσεων σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Ένα απλό ηλεκτρομηκυνσιομέτρο αυτού του τύπου, έχει δύο εσχάρες τοποθετημένες η μία πάνω στην άλλη σε σχήμα σταυρού και μετρά ορθογωνικές παραμορφώσεις.

Στα σχήματα 5.1 και 5.2. παριστάνονται διάφοροι τύπου ηλεκτρομηκυνσιομέτρων.

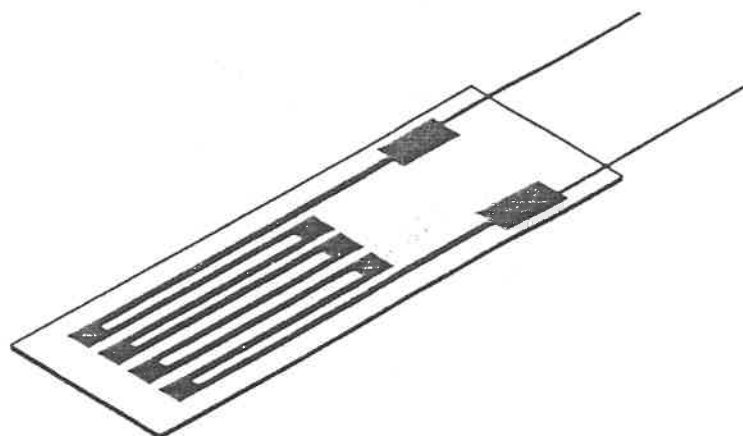


Ροζέττα δύο ηλεκτρομηκυνσιομέτρων

Σχ. 5.1.



Τύπος ηλεκτρομηκυνσιομέτρου



Τύπος ηλεκτρομηκυνσιομέτρου

Σχ. 5.2.

5.4.6. Σχέσεις που ισχύουν στο ηλεκτρομηκυνσιόμετρο

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε έναν αγωγό μήκους L , με γενικό τύπο επιφάνειας $C \cdot D^2$, όπου D είναι το χαρακτηριστικό μέγεθος της διατομής (δηλ. η διάμετρος σε περίπτωση αγωγού κυκλικής διατομής και η πλευρά του τετραγώνου σε περίπτωση τετραγωνικής διατομής) και C μια σταθερά ($\pi/4$ για την κυκλική διατομή και 1 για την τετραγωνική διατομή).

Στους αγωγούς γενικά ισχύει η σχέση

$$R = \rho \cdot L/A = \rho \cdot L/CD^2 \quad (I)$$

Αν υποθέσουμε ότι ο αγωγός παραμορφώνεται, κάθε μια από τις ποσότητες της σχέσης (I) αλλάζει

Διαφορίζοντας τη σχέση (I) έχουμε :

$$dR = \frac{CD^2(Ld\rho + \rho dL) - 2\rho LCDdD}{(CD^2)^2} = \frac{1}{CD^2} \left[(Ld\rho + \rho dL) - 2\rho L \frac{dD}{D} \right] \quad (II)$$

Διαιρώντας τις σχέσεις (II) και (I) κατά μέλη προκύπτει :

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - 2 \frac{dD}{D} \quad \text{η οποία μπορεί να γραφεί και ως εξής :}$$

$$\frac{dR/R}{dL/L} = \frac{d\rho/\rho}{dL/L} + 1 - 2 \frac{dD/D}{dL/L} \quad (III)$$

Θέτοντας $dL/L = E\alpha$ (αξονική παραμόρφωση, in/in)

$dD/D = E\epsilon$ (αξονική παραμόρφωση, in/in)

$$\text{και} \quad \mu = \frac{-dD/D}{dL/L} \quad (\text{λόγος Poisson})$$

και αντικαθιστώντας στη σχέση (III) προκύπτει η βασική σχέση που δίνει τον συντελεστή F του ηλεκτρομηκυνσιομέτρου

$$F = \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{dR/R}{Ea} = 1 + 2\mu \frac{d\rho/\rho}{dL/L} \quad (\text{IV})$$

$$\text{ή διαφορετικά :} \quad Ea = \frac{1}{F} * \frac{\Delta R}{R}$$

Οι τιμές του συντελεστού F και της αντίστασης της εσχάρας R, δίνονται κάθε φορά από τον κατασκευαστή του ηλεκτρομηκυνσιομέτρου και ο χρήστης προκειμένου να υπολογίσει την παραμόρφωση του δοκιμίου, προσδιορίζει την μεταβολή της αντίστασης (ΔR), που η παραμόρφωση αυτή επιφέρει. Για παράδειγμα, αν $F = 2,0$ και $R = 120 \text{ ohms}$, τότε για μια παραμόρφωση της τάξεως της 1 microinch/inch ($0,000001 \text{ in/in}$) η αντίστοιχη μεταβολή της αντίστασης του πρέπει να μετρηθεί από το ηλεκτρομηκυνσιόμετρο είναι :

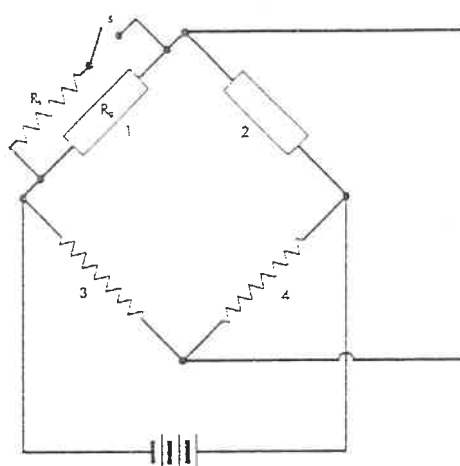
$$\Delta R = F * R * Ea = 2 * 120 * 0,000001 = 0.00024 \text{ ohm}$$

Φαίνεται ότι για τη μέτρηση τόσο μικρών μεταβολών της αντίστασης, απαιτούνται πολύ ευαίσθητα ωμόμετρα. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται κύκλωμα με γέφυρα, το οποίο ελαττώνει ή εξαλείφει τα δυσμενή αποτελέσματα της θερμοκρασίας όπως προαναφέρθηκε.

5.4.7. Βαθμονόμηση του ηλεκτρομηκυνσιομέτρου

Η βαθμονόμηση (καλιμπράρισμα) ενός ηλεκτρομηκυνσιομέτρου γίνεται με μια απλή μέθοδο, εφ' όσον είναι γνωστός ο συντελεστής (F) και η αντίσταση R . Σύμφωνα μ' αυτήν προσδιορίζεται η αντίδραση του συστήματος στην εισαγωγή μιας γνωστής μικρής μεταβολής στην αντίσταση του μηκυνσιομέτρου και στον προσδιορισμό της αντίστοιχης παραμόρφωσης.

Η μεταβολή της αντίστασης πετυχαίνεται με την παράλληλη σύνδεση μιας υψηλής αντίστασης (R_s) στο ηλεκτρομηκυνσιόμετρο (R_g) όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3.



Σχ. 5.3.

Πριν κλείσει ο διακόπτης s , η αντίσταση του βραχίονα (I) είναι R_g , ενώ όταν κλείσει είναι :

$$\frac{R_g * R_s}{R_g + R_s}$$

λόγω παράλληλης σύνδεσης. Έτσι η μεταβολή στην αντίσταση είναι :

$$\Delta R_g = R_g - \frac{R_g * R_s}{R_g + R_s} = \frac{R_g^2}{R_g + R_s} \quad (1)$$

Προκειμένου να προσδιοριστεί η ισοδύναμη παραμόρφωση χρησιμοποιείται η σχέση

$$E = \frac{1}{F} * \frac{\Delta R_g}{R_g} \quad (2)$$

Επομένως λόγω της (1) η σχέση (2) παίρνει την μορφή

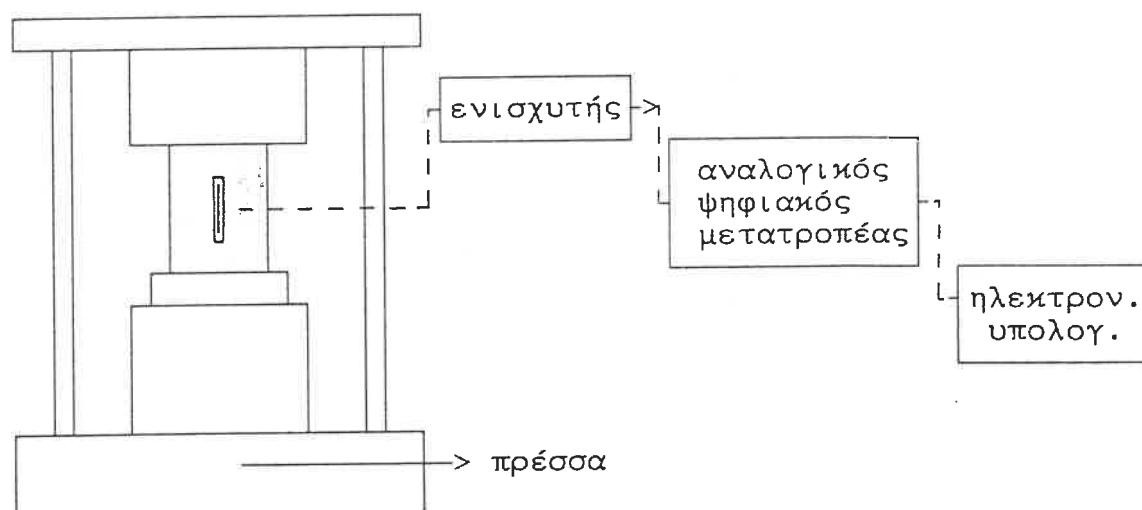
$$E = \frac{1}{F} * \frac{R_g}{R_g + R_s}$$

5.5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

5.5.1. Γενικά

Για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων των δοκιμίων από θλιπτική ή εφελκυστική δύναμη, τοποθετήθηκαν επάνω στην επιφάνεια τους με εποξειδική κόλλα τύπου BISON COMBI-RAPID ηλεκτρομηκυνσιόμετρα, τα οποία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά, σε άλλα δοκίμια.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διάταξη του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές δοκιμές.



Σχ. 5.4.

- η πρέσα : η οποία φορτίζει μέχρι καθορισμένης τιμής το δοκίμιο, πάνω στο οποίο είναι κολλημένα τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα. Η πρέσα έχει τη δυνατότητα σταθερής ταχύτητας επιβολής της τάσης. Το αισθητήριο της επιβαλλόμενης δύναμης (αισθητήρας πίεσεως λαδιού) όπως και

τα ηλεκτρομηκυνσιομέτρα συνδέονται με τον ενισχυτή.

- Ο ενισχυτής : τροφοδοτεί το σύστημα των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων με ρεύμα σταθερής τάσεως και ενισχύει το ηλεκτρικό σήμα που λαμβάνει ως απόκριση των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων.
- Ο αναλογικός ψηφιακός μετατροπέας : ο οποίος μετατρέπει το αναλογικό ηλεκτρικό σήμα από την μεταβολή των αντιστάσεων των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων η οποία προκαλείται από την παραμόρφωση του δοκιμίου, σε μεταβολή ψηφιακών μονάδων, που αναγράφονται στην οθόνη του υπολογιστή, με τον οποίο συνδέεται ο αναλογικός ψηφιακός μετατροπέας.
- Ο υπολογιστής : με τον οποίο δίνονται οι εντολές δειγματοληψίας καθορίζεται η μορφή της δειγματοληψίας, γίνεται η αποθήκευση και η ανάγνωση των μετρήσεων.

5.5.2. Στοιχεία των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων που χρησιμοποιήθηκαν

Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι ηλεκτρομηκυνσιομέτρων

τύπος I

Μήκος αναγωγής (L) = 60 mm

Αντίσταση (R) = 120 Ω

Συντελεστής (F) = 2,11

τύπος II

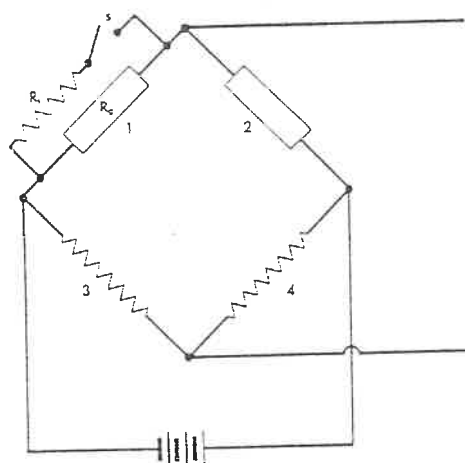
Μήκος αναγωγής (L) = 76 mm

Αντίσταση (R) = 120 Ω

Συντελεστής (F) = 2,16

5.5.3. Βαθμονόμηση των ηλεκτρομηκυνσιόμετρων I, II

Ο τύπος βαθμονόμησης των δύο τύπων είναι ακριβώς ο ίδιος. Στην παράπλευρη επιφάνεια του υπό εξέταση δοκιμίου τοποθετείται το ηλεκτρομηκυνσιόμετρο, που θα χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της παραμόρφωσης, και αποτελεί την αντίσταση R_g στο σχήμα 5.5.



Σχ. 5.5.

Αυτό συνδέεται με ένα άλλο μηκυνσιόμετρο, που αποτελεί τον κλάδο 2 και δεν έχει καμιά άλλη πρακτική σημασία (Dummy). Οι κλάδοι 3,4 υπάρχουν μέσα στον ενισχυτή. Επίσης διαθέτουμε και μία αντίσταση $R_s = 460.000 \ \Omega$, η οποία συνδέεται παράλληλα με την αντίσταση R_g .

Για την βαθμονόμηση του τύπου (I), όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός διαβάζεται μία αρχική ανάγνωση στην οθόνη του υπολογιστή ίση με 4325. Όταν κλείσει ο διακόπτης προκαλείται μία μεταβολή στην αντίσταση του ηλεκτρομηκυνσιόμετρου, που αντιστοιχεί σε μία ισοδύναμη παραμόρφωση ϵ^1 :

$$e_1 = \frac{1}{F} * \frac{(Rg)}{(Rg+Rs)} = \frac{1}{2,11} * \frac{(120)}{(120+460.000)} \Rightarrow e_1 = 123,6 * 10^{-6}$$

Η ανάγνωση που διαβάζεται τώρα στην οθόνη του υπολογιστή είναι τώρα 4095.

Σε διαφορά μονάδων (υπολογιστή) $4325-4095=230$
αντιστοιχεί $e_1 = 123,6 * 10^{-6}$. Σε μία μονάδα (υπολογιστή)
αντιστοιχεί $e_{1\sigma}$:

$$e_{1\sigma} = \frac{123,6 * 10^{-6}}{230} \Rightarrow e_{1\sigma} = 0,537 * 10^{-6}$$

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για την βαθμονόμηση του τύπου II. Η αρχική ανάγνωση του υπολογιστή είναι 4405 και τελική ανάγνωση 4183.

Η ισοδύναμη παραμόρφωση είναι

$$e_2 = \frac{1}{F} * \frac{(Rg)}{(Rg+Rs)} = \frac{1}{2,16} * \frac{(120)}{(120+460.000)} \Rightarrow e_2 = 120,7 * 10^{-6}$$

Σε διαφορά μονάδων (υπολογιστή) $4405-4183=222$ αντιστοιχεί
 $e_2 = 120,7 * 10^{-6}$. Σε μία μονάδα (υπολογιστή) αντιστοιχεί
 $e_{2\sigma}$

$$e_{2\sigma} = \frac{120,7 * 10^{-6}}{222} = 0,544 * 10^{-6}$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι σε μία μονάδα υπολογιστή αντιστοιχεί

περίπου ίδια τιμή παραμόρφωσης και για τους δύο τύπους ηλεκτρομηκυνσιομέτρων. Λαμβάνοντας δε υπόψη ότι τα αποτελέσματα δεν είναι απολύτως ακριβή, λόγω της μεγάλης επιρροής των μηκυνσιομέτρων και των ηλεκτρονικών διατάξεων από τους εξωγενείς παράγοντες, μπορούμε να θεωρήσουμε, με πάρα πολύ μεγάλη προσέγγιση, ότι σε μία μονάδα ανάγνωσης στον υπολογιστή αντιστοιχεί παραμόρφωση $0,54 * 10^{-6}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

Υλικά - Μέθοδοι παρασκευής - Δοκιμές

6. ΥΛΙΚΑ - ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ-ΔΟΚΙΜΕΣ

6.1. ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

Το κυριώτερο υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι φρεζαρισμένο ασφαλτικό υλικό, που προέρχεται από αποξίλωση παλιών οδοστρωμάτων αθηναϊκών δρόμων. Το υλικό αυτό περιέχει 4,5% κ.β. άσφαλτο.

Χρησιμοποιήθηκε επίσης θραυστό ασβεστολιθικό αμμοχάλικο, το οποίο παρασκευάστηκε με κατάλληλη ανάμιξη άμμου, γαρπιλιού και ψηφίδων του εμπορίου, παρόμοιας διαβαθμίσεως με το φρεζαρισμένο ασφαλτικό υλικό, ώστε με την ανάμιξη του με το ασφαλτικό υλικό σε διάφορες αναλογίες να μπορέσουν να εξετασθούν όλες οι δυνατότητες που μπορεί να παρουσιασθούν στην πράξη. (18)

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου II Portland σύμφωνα με τους Ελληνικούς κανονισμούς τσιμέντων.

6.2. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΝΑΛΟΓΙΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

Εγινε επιλογή των ακόλουθων αναλογιών των υλικών των μιγμάτων

- I. 100% ασφαλτικό υλικό
- II. 75% ασφαλτικό υλικό, 25% αμμοχάλικο
- III. 50% ασφαλτικό υλικό, 50% αμμοχάλικο
- IV. 25% ασφαλτικό υλικό, 75% αμμοχάλικο
- V. 100% αμμοχάλικο

Το ποσοστό του τσιμέντου εκλέχθηκε 5% ως ένας ικανοποιητικός μέσος όρος για τη σταθεροποίηση των παραπάνω διαφορετικών υλικών. Το απαιτούμενο ποσοστό τσιμέντου για καθαρό θραυστό αμμοχάλικο είναι συνήθως 3,5% - 4%.

6.3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΗΣΗΣ

Χρησιμοποιήθηκε δονητική μηχανή (Pascal Engineering-18715) κοσκινίσματος. Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σύμφωνα με τα Αμερικάνικα πρότυπα 3/4, 3/8, No 4, No 8, No 16, No 30, No 50, No 100, No 200. Η διάρκεια δόνησης ήταν 20 min και τα υλικά που διαβαθμίστηκαν είχαν ξηρανθεί στο περιβάλλον του εργαστηρίου.

Εγινε κοκκομετρική διαβάθμιση στο καθαρό ασφαλτικό υλικό και στο αμμοχάλικο και συμπληρώθηκαν δελτία κοκκομετρικής

αναλύσεως. Στη συνέχεια παραστάθηκαν σε διάγραμμα οι διαβαθμίσεις των 2 υλικών, στο οποίο επίσης φαίνονται τα όρια των βρετανικών προδιαγραφών όσον αφορά τη διαβάθμιση των σταθεροποιημένων εδαφικών υλικών. Είναι φανερό ότι τα δύο υλικά βρίσκονται εντός των προδιαγραφών, οπότε και τα μείγματα που προκύπτουν από την ανάμιξη των δύο αυτών κατηγοριών, σε διάφορες αναλογίες, θα βρίσκονται εντός των ορίων των προδιαγραφών.

ΥΛΙΚΑ - ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ - ΔΟΚΙΜΕΣ

ΔΕΛΤΙΟΝ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΣ

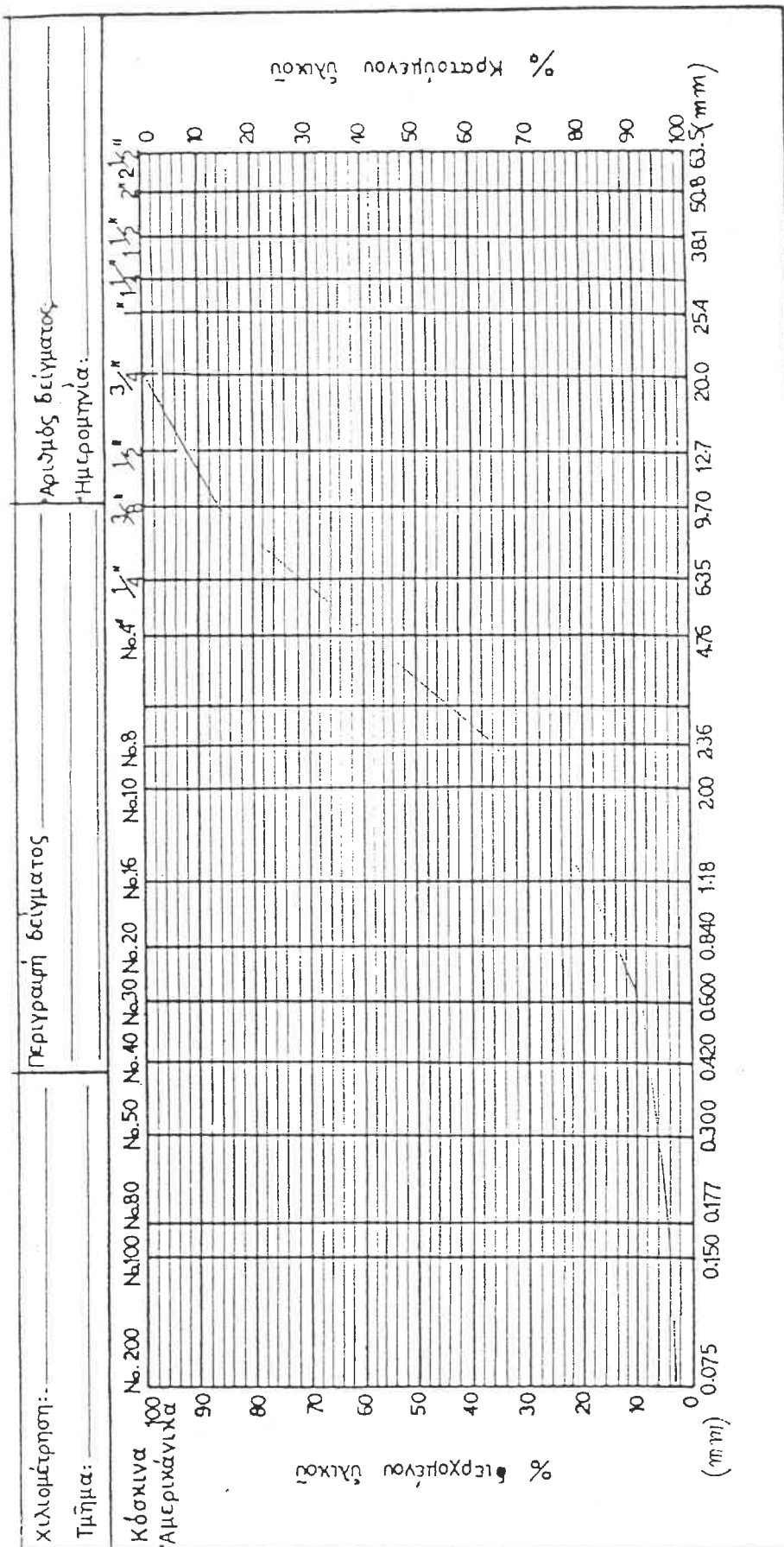
Προέλευσις κίσαρο αμμουδιάς

Βάρος όλικου δείγματος 3000 gr.....

Αριθ. Δείγματος

Ημερομηνία 16/5/1992

Αριθ. Κοσκίνου	Άνοιγμα Κοσκίνου χλσ.	Συγκρατούμενον βάρος γραμ.	Διερχόμενον βάρος γραμ.	%
3''	76,20			
2 1/2''	63,50			
2''	50,80			
1 1/2''	38,10			
1 1/4''	31,75			
1''	25,40			
3/4''	19,10	—	3000	100%
5/8''	15,96			
1/2''	12,70			
3/8''	9,52	410	2590	863%
1/4''	6,35			
No 4	4,76	795	1795	598%
No 8	2,38	740	1055	35,2%
No 10	2,00			
No 16	1,19	480	575	19,2%
No 30	0,59	300	275	9,2%
No 40	0,420			
No 50	0,297	95	180	6%
No 80	0,177			
No 100	0,149	70	110	3,7%
No 200	0,074	40	70	2,3%

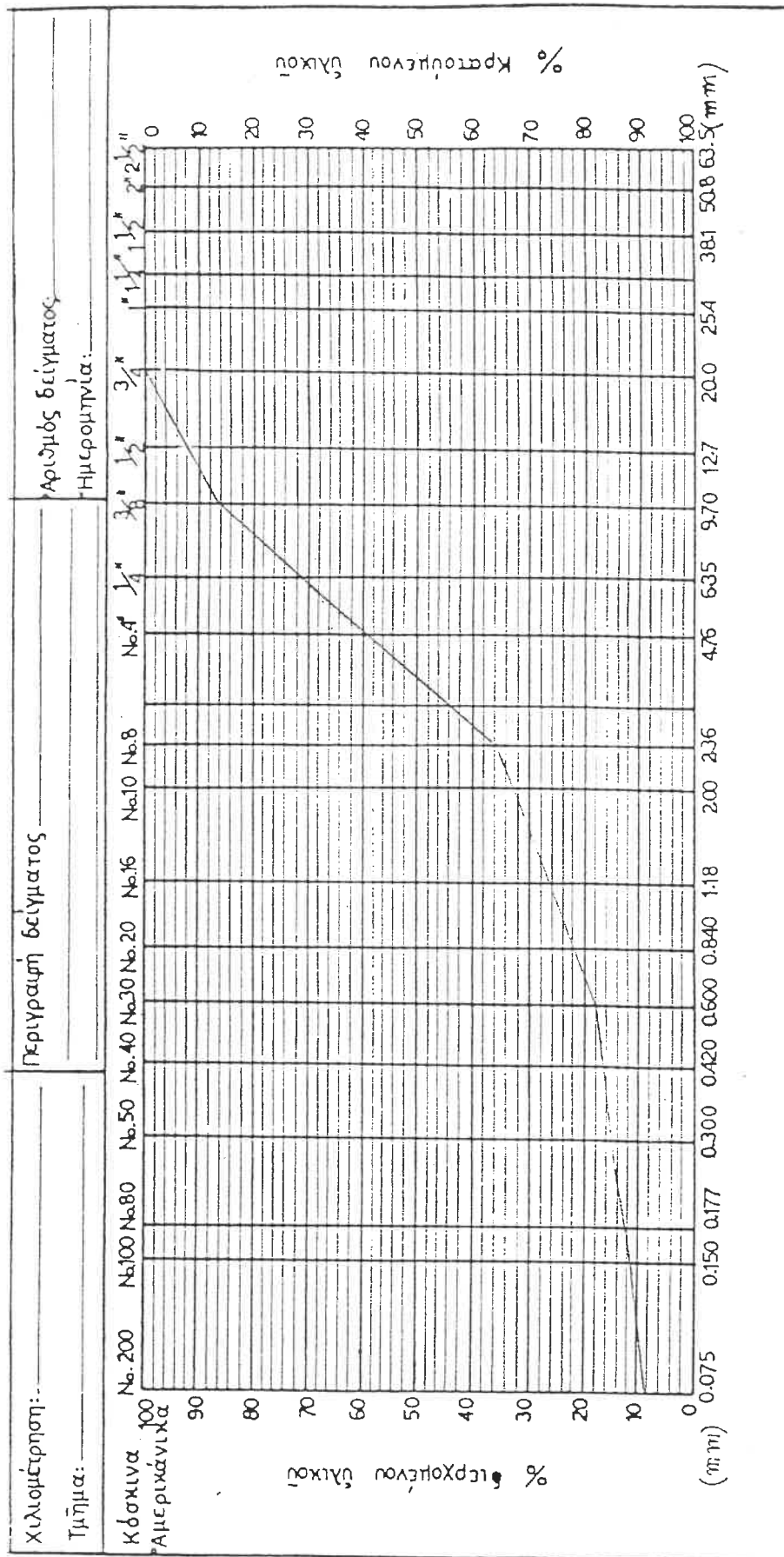


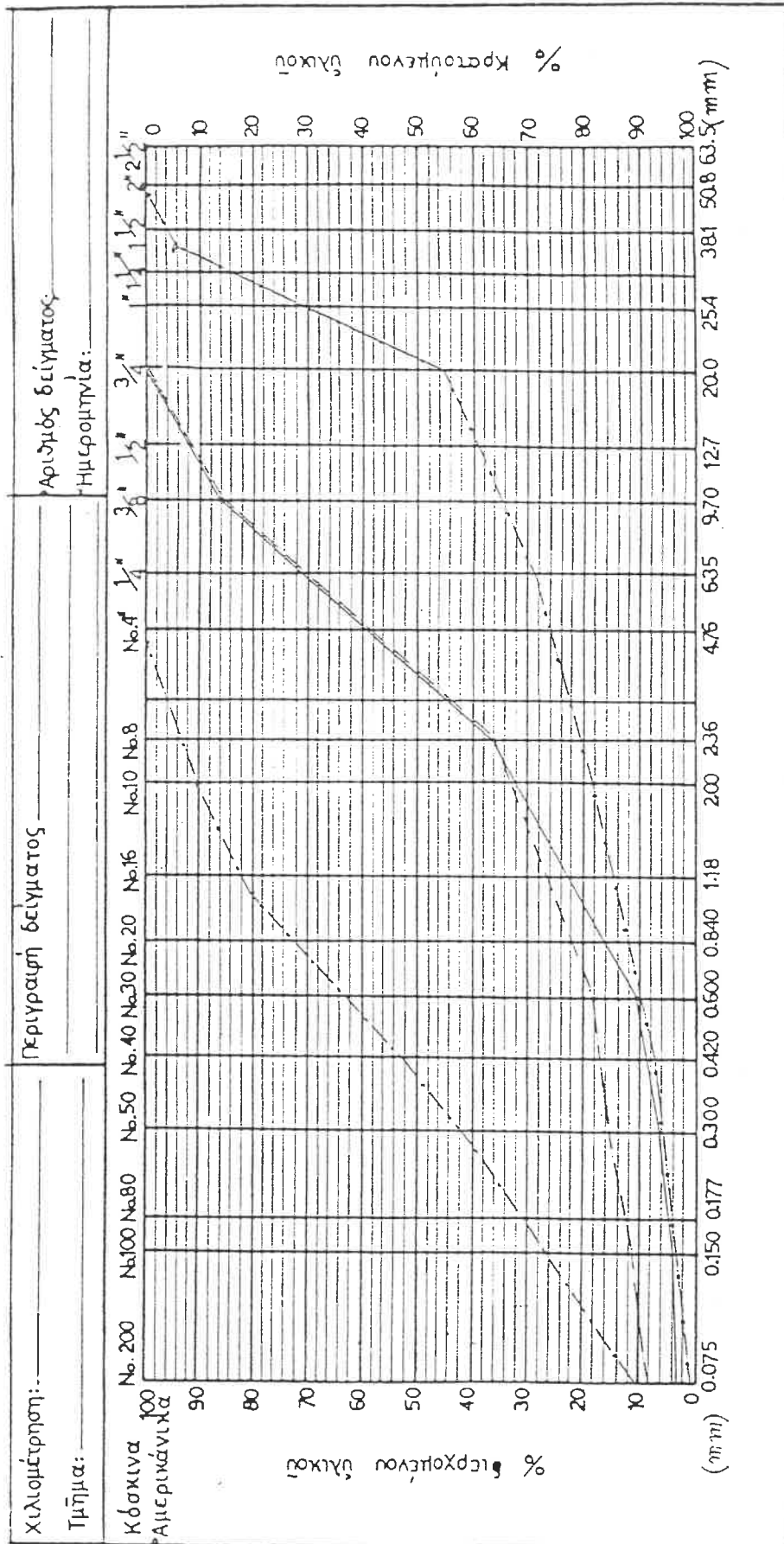
ΔΕΛΤΙΟΝ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΣ

Προέλευσις αμμοχαλίκου
 Βάρος ὀλικοῦ δείγματος, 2000...85....

Ἀριθ. Δείγματος
 Ἡμερομηνία 17/5/1992

Ἀριθ. Κοσκίνου	Ἀνοιγμα Κοσκίνου χλσ.	Συγκρατούμενον βάρος γραμ.	Διερχόμενον βάρος γραμ.	βάρους %
3''	76,20			
2 1/2''	63,50			
2''	50,80			
1 1/2''	38,10			
1 1/4''	31,75			
1''	25,40			
3/4''	19,10	—	2000	100 %
5/8''	15,96			
1/2''	12,70			
3/8''	9,52	275	1725	86,25 %
1/4''	6,35			
No 4	4,76	530	1495	59,75 %
No 8	2,38	485	710	35,5 %
No 10	2,00			
No 16	1,19	185	525	26,25 %
No 30	0,59	150	375	18,75 %
No 40	0,420			
No 50	0,297	70	305	15,25 %
No 80	0,177			
No 100	0,149	80	225	11,25 %
No 200	0,074	60	165	8,25 %

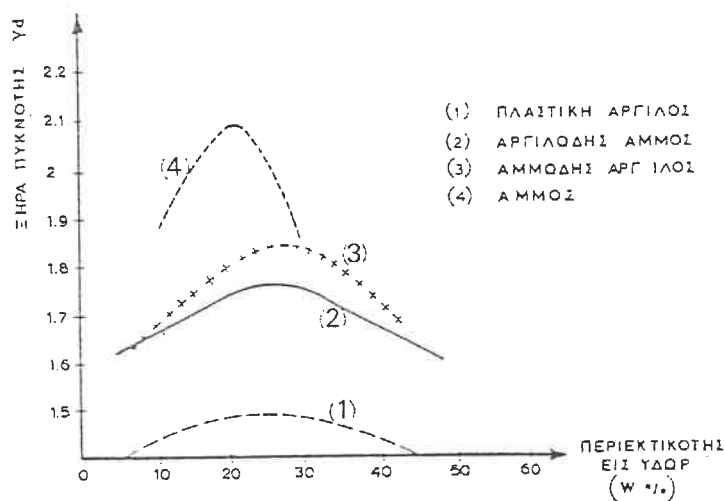




6.4. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ - ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΕΩΣ

Με την συμπίκνωση ενός υλικού επιχειρείται η τακτοποίηση των κόκκων του εδαφικού υλικού σε όσο το δυνατόν πυκνότερη διάταξη και γίνεται με την βοήθεια του νερού και κάποιας ενέργειας συμπίκνωσης, έτσι ώστε να μειωθούν τα κενά του αέρα, να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητα του εδάφους κ.τ.λ. (20) για μια δεδομένη ενέργεια συμπτυκνώσεως, η περιεκτικότητα σε νερό επιδρά επί της επιτυγχανόμενης μέγιστης πυκνότητας. Υπάρχει πάντοτε μιά πρόσφορος περιεκτικότητα σε νερό, που ονομάζεται βέλτιστη υγρασία, με την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη πυκνότητα.

Το φαινόμενο αυτό ερμηνεύεται αν ληφθεί υπόψη ότι με την προσθήκη νερού σ' ένα ξηρό εδαφικό υλικό, οι κόκκοι του περιβάλλονται προοδευτικώς από λεπτή μεμβράνη νερού, το οποίο δρά ως λιπαντικό και διευκολύνει την ανακατάταξη των κόκκων σε πυκνότερη διάταξη. Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό πέραν μιάς ορισμένης τιμής, η ποσότητα του εγκλωβισμένου αέρα παραμένει σταθερή, ενώ το νερό απομακρύνει τους κόκκους, καταλαμβάνοντας τη θέση τους, με αποτέλεσμα την ελάττωση της ξηράς πυκνότητας. (23) Στα αμμοχάλικα μικρές μεταβολές στην περιεχόμενη υγρασία, επιφέρουν σημαντικές μεταβολές της πυκνότητας, ενώ στα συνεκτικά εδάφη η καμπύλη της πυκνότητας είναι περισσότερο τεταμένη όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4.



Διαγράμματα «περιεκτικότης εις ύδωρ w—ξηρά πυκνότης γd».

Σχ. 6.4.

6.4.1. Πειραματική διαδικασία

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συμπυκνώσεως σε 3 διαφορετικά αναμίγματα ασφαλτικού υλικού - αμμοχάλικου τα οποία είναι τα παρακάτω :

- I. 100% ασφαλτικό υλικό
- II. 50% ασφαλτικό υλικό - 50% αμμοχάλικο
- III. 100% αμμοχάλικο

Σε όλα τα αναμίγματα προστέθηκε τσιμέντο σε ποσοστό 5% κ.β. Ο τρόπος συμπίκνωσης βασίστηκε στην βρετανική μέθοδο των δοκιμών για σταθεροποιημένα εδάφη B.S 1924 με ορισμένες μεταβολές. Το υλικό τοποθετείται σε κυβικά δοκίμια ακμής 10cm σε δύο ίσες στρώσεις και κάθε στρώση συμπυκνώνεται για 30 sec. Η συμπίκνωση γίνεται με ηλεκτρόσφυρα Kango 900, η οποία συνδυάζει πίεση και δόνηση. Καταβάλλεται προσπάθεια ώστε το φορτίο να είναι περίπου 35 Kgr. Ο τρόπος αυτός αντιστοιχεί στον τρόπο συμπυκνώσεως σταθεροποιημένων στρώσεων με δονητικό οδοστρωτήρα, τα δε αποτελέσματα της συμπυκνώσεως είναι πάρα πολύ καλά (compaction to refusal).

Τα αναμίγματα παρασκευάστηκαν με την χρησιμοποίηση διαφόρων ποσοστών υγρασίας, με αντικειμενικό σκοπό την εύρεση του βέλτιστου ποσοστού για το οποίο έχουμε μέγιστη πυκνότητα.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή συμπυκνώσεως, τοποθετήθηκαν στον θάλαμο συντηρήσεως για 7 ημέρες και στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε δοκιμή της αντοχής σε θλίψη του κάθε αναμίγματος σε συνάρτηση με την υγρασία.

6.5. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

6.5.1. Ανάμιξη

Τα υλικά τοποθετήθηκαν σε αναμικτήρα βίαιης ανάμιξης , σε αναλογίες που προβλέπονταν για κάθε μίγμα και σε ποσότητες τέτοιες, ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική λειτουργία της μηχανής. Κάθε ανάμιγμα αναλογούσε σε τρία πρισματικά δοκίμια (100mm x 100 mm x 500mm). Πρίν από την ανάμιξη προηγείται ύγρανση των τοιχωμάτων και των πτερυγίων διότι αυτά αφαιρούν σημαντικό ποσοστό από την υγρασία του αναμίγματος. Αρχικά γίνεται η πρώτη ανάμιξη των ξηρών υλικών, η οποία διαρκεί περίπου 2 min. ώστε να επιτευχθεί ομογενοποίηση του αναμίγματος. Στη συνέχεια ακολουθεί σταδιακή προσθήκη νερού, η ποσότητα του οποίου είναι επακριβώς προκαθορισμένη (5% κ.β) και η ανάμιξη συνεχίζεται για περίπου 3 min. Ακολούθως ο αναμικτήρας σκεπάζεται από πλαστικά φύλλα, ώστε να παρεμποδιστεί το φαινόμενο της εξάτμισης για περίπου 5 min, ώστε το νερό να μπορέσει να απορροφηθεί από τους πόρους των αδρανών του μίγματος. Τέλος, ακολουθεί η σταδιακή προσθήκη τσιμέντου, σε ποσότητα που έχει προκαθοριστεί (5% κ.β.), και η ανάμιξη συνεχίζεται για 3-4 ακόμη λεπτά.

6.5.2. Συμπύκνωση

Το παρασκευαζόμενο υλικό ανάμιξης τοποθετείται σε διαρούμενες χαλύβδινες μήτρες, των οποίων οι επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με το δοκίμιο, είναι προεπαλλειμένες με μικρή ποσότητα ορυκτελαίου, αφ' ενός μεν για να εξασφαλιστεί η στεγανότητα του δοκιμίου, και αφ' ετέρου για να διευκολυνθεί η αποκόλλησή του από την χαλύβδινη μήτρα.

Η συμπύκνωση των δοκιμίων γίνεται με την δονητική ηλεκτρόσφυρα **KANGO** και με τον τρόπο που περιγράφεται στην § 6.4.1. Στα κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm και στα πρισματικά 100mm x 100mm x 500mm το υλικό τοποθετείται σε 2 στρώσεις, ενώ στα κυλινδρικά διαμέτρου 100mm και ύψους 200mm, το υλικό τοποθετείται σε 3 στρώσεις.

Η απαιτούμενη συνάφεια μεταξύ των στρώσεων επιτυγχάνεται με αναμόχλευση του υλικού σε βάθος 5mm περίπου.

Η τελική επιφάνεια του δοκιμίου, διαμορφώνεται με χρησιμοποίηση πλάκας συμπύκνωσης, μεγαλύτερων διαστάσεων από εκείνων των δοκιμίων, ώστε κατά την συμπύκνωση να εφάπτεται στο πάνω μέρος του καλουπιού.

6.5.3. Συντήρηση

Μετά την παρασκευή τους τα δοκίμια παραμένουν μέσα στις χαλύβδινες μήτρες για 24 ώρες και προστατεύονται με κάλυψη από πλαστικά φύλλα, από την έκθεση στο περιβάλλον, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες υγρασίας.

Η αφαίρεση των δοκιμίων από τις χαλύβδινες μήτρες γίνεται την επόμενη μέρα από την παρασκευή των δοκιμίων. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετούνται στον θάλαμο συντήρησης, υπό σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) και υγρασίας ($> 90\%$), στον οποίο παραμένουν μέχρι την δοκιμή τους.

6.6. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

6.6.1 Δοκιμή θλίψης

Για να πραγματοποιηθεί αυτή η δοκιμή, παρασκευάστηκαν 6 κυβικά δοκίμια από κάθε μία από τις κατηγορίες που ακολουθούν.

- I. : 100% ασφαλτικό υλικό
- III. : 50% ασφαλτικό υλικό -50% αμμοχάλικο
- V. : 100% αμμοχάλικο

Στα μισά από τα δοκίμια (αριθμός 3) υπολογίζεται η αντοχή σε θλίψη στις 7 ημέρες και στα άλλα μισά στις 28 ημέρες.

Η μηχανή της δοκιμής, εξασφαλίζει σταθερή ταχύτητα επιβολής τάσης και είναι μεγίστου φορτίου 600 KN με πολύ δύσκαμπτο πλαίσιο από 4 υποστηλώματα, με σταθερό ζύγωμα και πάνω πλάκα με σφαιρική άρθρωση, που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του Βρετανικού προτύπου B.S. 1881 Part 115.

Η σφαιρική άρθρωση επιτρέπει την ελεύθερη περιστροφή της επάνω πλάκας, στο αρχικό στάδιο της φόρτισης ώστε να επιτευχθεί πλήρης επαφή του δοκιμίου και της πλάκας. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η καταπόνηση του δοκιμίου μόνο από αξονική δύναμη, και όχι από τον συνδυασμό αξονικής δύναμης και ροπής, το οποίο θα γινόταν αντιληπτό από την εμφάνιση οριζοντίων ρωγμών στις παράπλευρες επιφάνειες του δοκιμίου. Αυτό φυσικά προϋποθέτει την κέντρωση του δοκιμίου στο κάτω έμβολο της μηχανής.

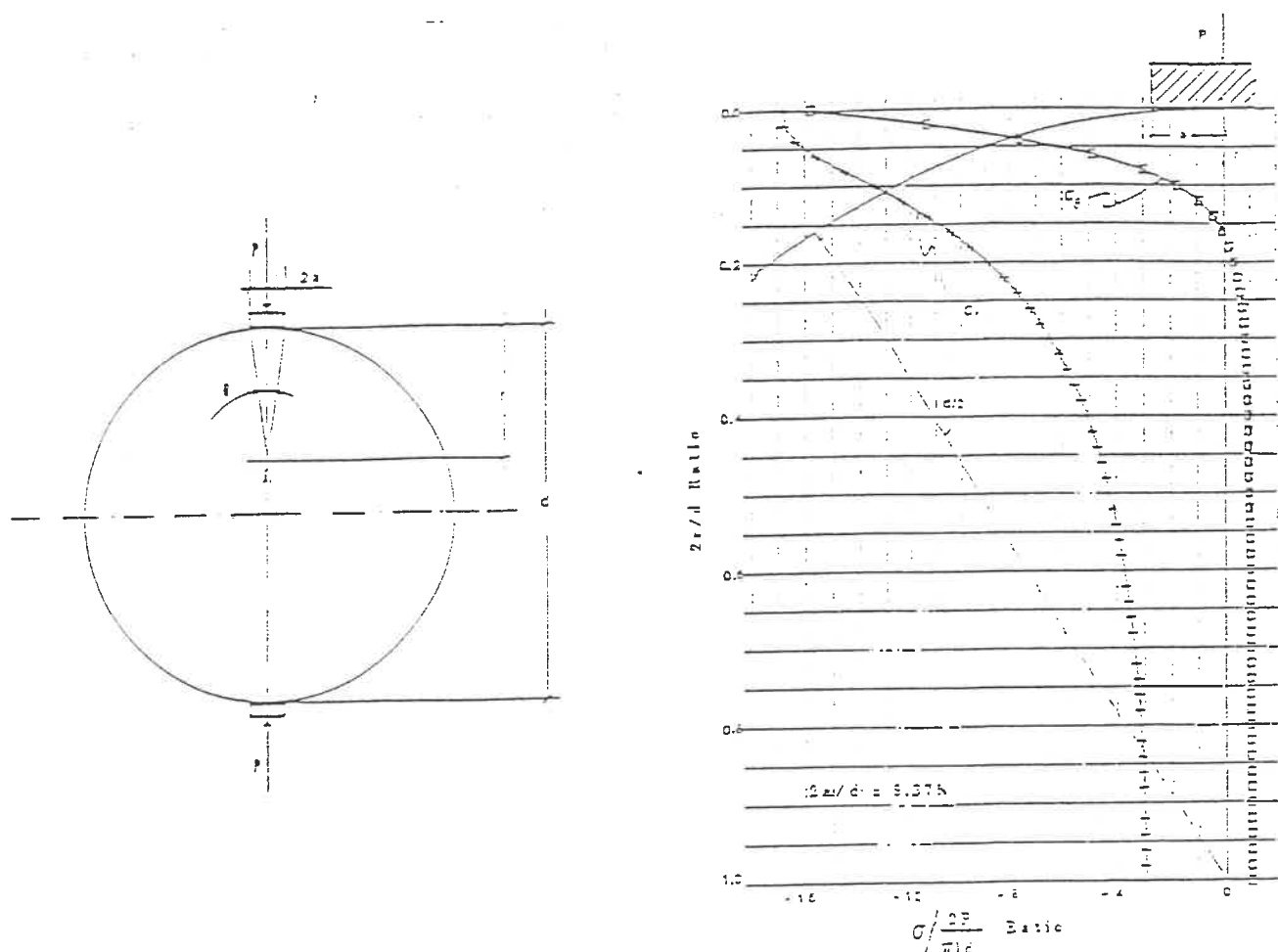
Η ταχύτητα της φόρτισης είναι 2KN/sec.

6.6.2. Δοκιμή διάρρηξης

Η δοκιμή διάρρηξης ή δοκιμή σε αντιδιαμετρική θλίψη, είναι μία έμμεση μέθοδος για την πειραματική εξεύρεση της αντοχής σε εφελκυσμό και είναι ιδιαίτερα απλή, δεδομένου ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μηχανή της δοκιμής σε θλίψη, που

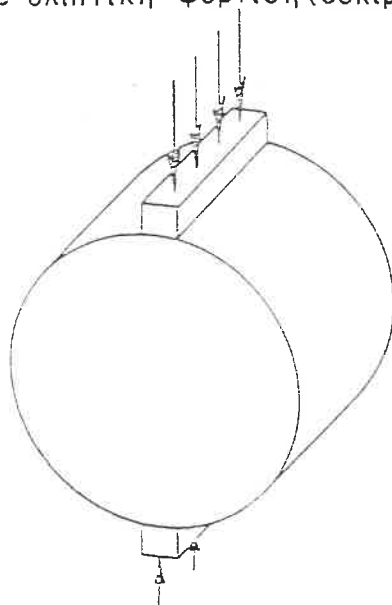
περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, χωρίς να απαιτούνται πρόσθετες ακριβές διατάξεις ή μηχανές.

Η δοκιμή αυτή γίνεται σε κυλινδρικό δοκίμιο ύψους 200 mm και διαμέτρου 100 mm. Το δοκίμιο τοποθετείται οριζόντια και επιπονεύεται από θλίψη μέσω 2 οριζόντιων μεταλλικών πλακών. Μεταξύ των πλακών συμπίεσης και του δοκιμίου, τοποθετούνται παράλληλα λεπτές, χαλύβδινες λωρίδες, (λωρίδες σύνθλιψης), οι οποίες εφάπτονται στον κύλινδρο κατά τις γεννετειρές του (προδιαγραφές ISO 4108), (26) όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6.

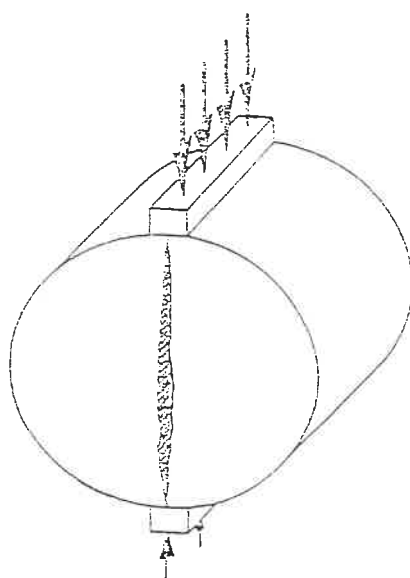


Σχ. 6.5.

Δοκίμιο υποβαλλόμενο σε θλιπτική φόρτιση (δοκιμή διάρρηξης)



Αστοχία δοκιμίου κατά τη δοκιμή διάρρηξης



Σχ. 6.6.

Σύμφωνα με τη θεωρία της ελαστικότητας κατά το κατακόρυφο αξονικό επίπεδο αναπτύσσονται οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις, που τείνουν να διασπάσουν, να διαχωρίσουν τον κύλινδρο σε δύο ημικυλίνδρους.

Το μέγεθος των οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων είναι :

$$\sigma_z = \frac{2P}{\pi DL}$$

όπου :

P : η επιβαλλόμενη κατακόρυφη δύναμη

D : η διάμετρος του δοκιμίου

L : το μήκος της γεννέτειρας του κυλίνδρου.

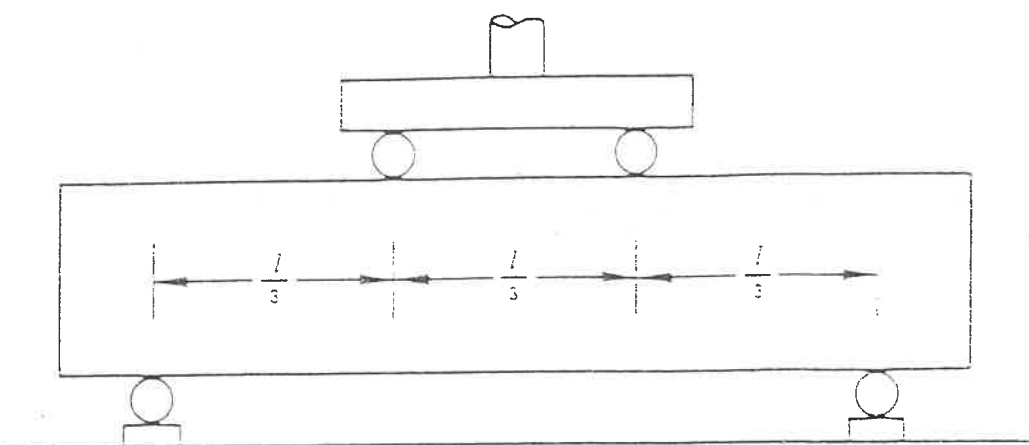
Σε κάθε στοιχείο του κατακόρυφου επιπέδου αναπτύσσονται ταυτόχρονα και κατακόρυφες, θλιπτικές τάσεις, δηλ. έχουμε διαξονική εντατική κατάσταση (24), όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5.

Το παραπάνω πείραμα έγινε σε δοκίμια 7 και 28 ημερών για τα αναμίγματα των κατηγοριών, I, III, V.

Η ταχύτητα επιβολής της φόρτισης ήταν 0,5 KN/sec (ASTM C496-71).

6.6.3. Δοκιμή κάμψης

Η δοκιμή εκτελείται σε πρισματικά δοκίμια τετραγωνικής διατομής 100 mm και μήκους 500 mm (ISO 1920), που υποβάλλονται σε κάμψη με 2 συγκεντρωμένα φορτία στα τρίτα του ανοίγματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.7.



Σχ. 6.7.

Η δοκιμή με τα δύο φορτία στα τρίτα του ανοίγματος είναι προτιμότερη από την δοκιμή με ένα συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσο του ανοίγματος, γιατί η περιοχή θραύσεως είναι μεγαλύτερη και επομένως έχουμε μια περισσότερο αντιπροσωπευτική τιμή της αντοχής του δοκιμίου.

Ο υπολογισμός της αντοχής γίνεται με τη σχέση :

$$f_b = \frac{P \cdot l}{b \cdot d^2}$$

όπου :

P : το επιβαλλόμενο φορτίο

l : το μήκος του ανοίγματος

b : το πλάτος του δοκιμίου

d : το ύψος του δοκιμίου

Σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο θεωρούμε τριγωνικό διάγραμμα κατανομής των τάσεων καθ' ύψος της κρίσιμης διατομής, ενώ στην πραγματικότητα το διάγραμμα καμπυλώνεται, τείνοντας σε παραβολικό, όταν οι εξωτερικές στρώσεις της δοκού έχουν εξέλθει της ελαστικής περιοχής. Επομένως η αντοχή που υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση δεν είναι η πραγματική

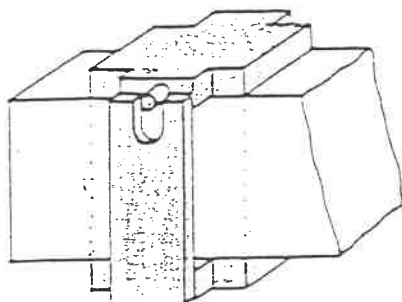
αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά είναι μιά "θεωρητική" αντοχή. Αυτό οφείλεται και στο γεγονός ότι στην κάμψη δε επιπονείται με υψηλές εφελκυστικές δυνάμεις όλο το δοκίμιο, αλλά ένα μεγάλο μέρος στο κάτω τμήμα του.

Η δοκιμασία σε κάμψη γίνεται για δοκίμια ηλικίας 28 ημερών των κατηγοριών I, II, III, IV, V.

6.6.4. Δοκιμή σε θλίψη ισοδύναμου κύβου (equivalent cube test)

Μετά τη θραύση λόγω κάμψης των δοκιμίων, προκύπτουν δύο τμήματα από κάθε πρίσμα, τα οποία υποβάλλονται σε δοκιμασία σε θλίψη (equivalent cube test). Η μηχανή της θλίψης περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Κατά την εισαγωγή του δοκιμίου στην μηχανή, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στον τρόπο τοποθέτησης των πλακών, ούτως ώστε οι ακμές τους ανα ζεύγη, άνω και κάτω, να βρίσκονται στο αυτό κατακόρυφο επίπεδο, αλλά και να είναι περίπου ίσα τα τμήματα του δοκιμίου που περισσεύουν, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.8.

Η ταχύτητα επιβολής της φόρτισης είναι 2KN/sec.



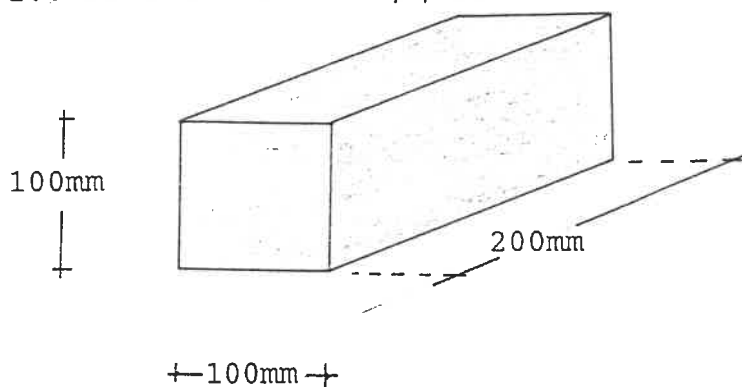
Δοκιμή ισοδύναμου κύβου

Σχ. 6.8.

6.7. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ POISSON ΣΕ ΘΛΙΨΗ

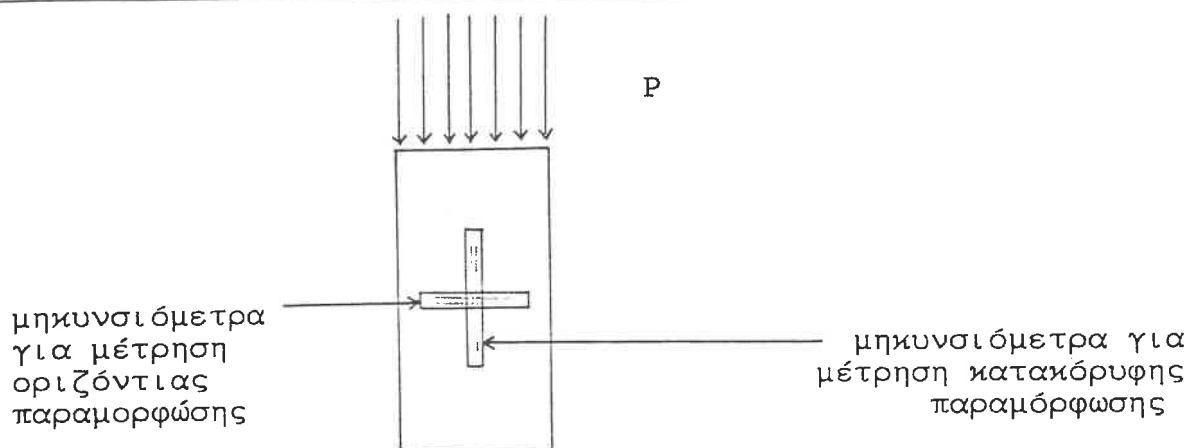
Μετά τη θραύση των πρισματικών δοκιμίων, μήκους 500 mm, από κάμψη, προκύπτουν 2 τμήματα μήκους 200÷300 mm, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη ισοδύναμου κύβου (equivalent cube test) και για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας.

Με τη βοήθεια ειδικής μηχανής πριονίσματος τα πρισματικά αυτά τμήματα αποκτούν επίπεδες επιφάνειες και έχουν διατομή 100 mm x 100 mm και μήκος 200 mm.



Σχ. 6.9.

Εχοντας εξασφαλίσει το γεγονός ότι τα πρίσματα βρίσκονται σε ξηρή κατάσταση, στη συνέχεια προσκολλώνται στις απέναντι παράπλευρες επιφάνειες τους τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα με εποξειδική κόλλα τύπου BISON COMBI-RAPID.



Σχ. 6.10.

Οι απολήξεις των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων συνδεόνται με διάφορα κανάλια του ενισχυτή, στον οποίο μεταδίδεται το ηλεκτρικό σήμα που προέρχεται από την μεταβολή της αντίστασης των μηκυνσιομέτρων λόγω παραμόρφωσης του δοκιμίου.

Επίσης το αισθητήριο πίεσης της πρέσσας συνδέεται με το κανάλι 14 του ενισχυτή.

Εχοντας προηγηθεί ο υπολογισμός της αντοχής σε θλίψη των αναμιγμάτων που έχουμε, μπορούμε να πάρουμε μία γενική εικόνα της τάξεως μεγέθους της αντοχής που αναμένουμε να έχουμε στα πρισματικά δοκίμια που εξετάζουμε.

Στη συνέχεια η πρέσα ρυθμίζεται με τη βοήθεια του ποτενσιομέτρου της, ώστε να φορτίζει το δοκίμιο μέχρι του $1/3$ του αναμενόμενου φορτίου θραύσης του. Η επιλογή αυτής της τιμής του φορτίου γίνεται, γιατί μέχρι αυτήν την τιμή παρατηρείται σχεδόν ελαστική συμπεριφορά των υλικών που έχουν

σταθεροποιηθεί με τσιμέντο. (28)

Ακολουθούν δοκιμές θλίψεως με μικρή ταχύτητα φόρτισης 2 KN/sec και με μεγάλη 9,99 KN/sec, τα αποτελέσματα των οποίων καταγράφονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αυτές οι δοκιμές επαναλαμβάνονται αρκετές φορές σε κάθε δοκίμιο, του οποίου αλλάζουμε τη θέση ή το γυρίζουμε ανάποδα, ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που λαμβάνουμε.

Τέλος η πρέσσα φορτίζει το δοκίμιο μέχρι τη θραύση του. Ο αυτόματος ενσωματωμένος μηχανισμός που διαθέτει η πρέσσα, δίνει στο τέλος της δοκιμής συνεχή αναγραφή του φορτίου θραύσης.

Για την βαθμονόμηση όλων των παραμορφωσιμέτρων χρησιμοποιείται, όπως είδαμε στην παράγραφο 5.5.3, συντελεστής ισοδυναμίας

$$e_{\sigma} = 0,54 * 10^{-6}$$

6.8. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΡΠΥΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ

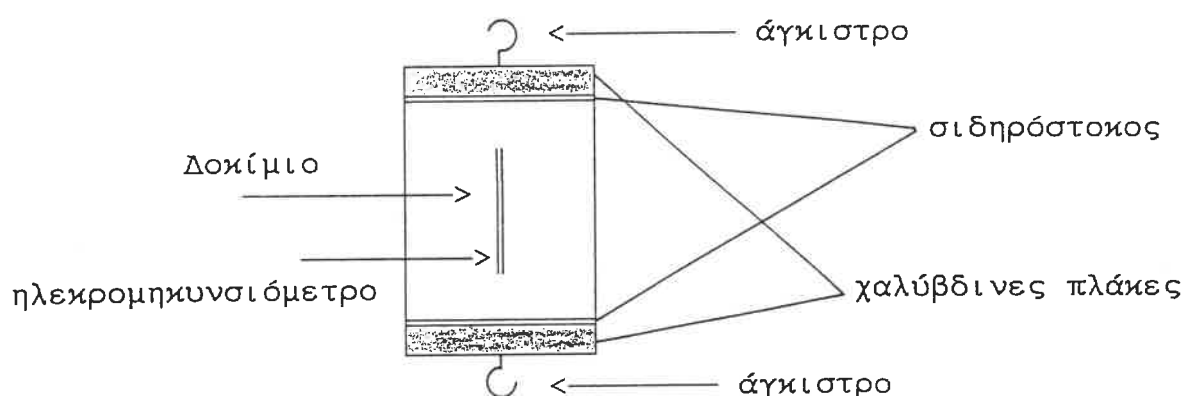
Ακολουθώντας την ίδια ακριβώς διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμών, των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων και της πρέσσας που περιγράφηκαν για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson, γίνεται προσπάθεια προσδιορισμού ερπυστικών παραμορφώσεων υπό θλιπτικά φορτία.

Ρυθμίζουμε το ποτενσιόμετρο της πρέσσας, ώστε να επιβάλλεται θλιπτικό φορτίο στο δοκίμιο περίπου το $1/3$ της αναμενόμενης αντοχής του. Το δοκίμιο παραμένει σε αυτήν την εντατική κατάσταση για μιά ώρα, κατά τη διάρκεια της οποίας σε τακτά διαστήματα λαμβάνονται οι μεταβολές στην παραμόρφωση με τη βοήθεια των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων.

6.9. ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

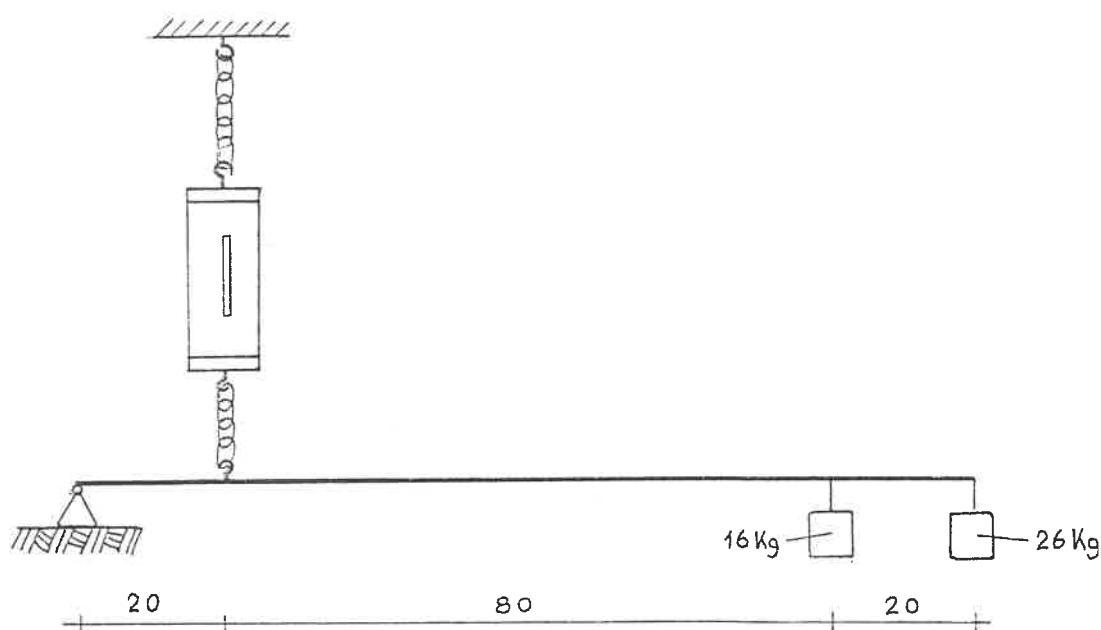
Σ' αυτό το πείραμα γίνεται απόπειρα προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου υπό εφελκυστικές τάσεις.

Στις δύο βάσεις πρισματικού δοκιμίου $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ προκολλώνται με σιδηρόστοκο χαλύβδινες πλάκες διαστάσεων $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ στα κέντρα των οποίων είναι προσαρμοσμένα δύο άγκιστρα. (Βλ. σχήμα 6.11)



Σχ. 6.11.

Για την επιβολή του εφελκυστικού φορτίου χρησιμοποιήθηκε η διάταξη που φαίνεται παρακάτω :



Σχ. 6.12.

Διαθέτουμε μία σιδερένια δοκό μήκους 120 cm η οποία στηρίζεται μόνο στο ένα της άκρο. Σε απόσταση 100 cm και 120 cm από το σημείο στήριξης επιβάλλονται φορτία βάρους 16 Kgr και 26 Kgr αντίστοιχα. Σε απόσταση 20 cm από τη στήριξη υπάρχει στην σιδερένια δοκό ένα άγκιστρο στο οποίο συνδέεται το ένα άκρο αλυσίδας. Το άλλο άκρο της αλυσίδας προσαρμόζεται στο άγκιστρο που βρίσκεται στην πλάκα που είναι κολλημένη στο κάτω άκρο του δοκιμίου. Στο άγκιστρο που βρίσκεται στην πλάκα που είναι κολλημένη στο πάνω άκρο του δοκιμίου, προσαρμόζεται το ένα άκρο μίας άλλης αλυσίδας, το άλλο άκρο της οποίας προσαρμόζεται σε σταθερό και ακλόνητο σημείο.

Η διάταξη αυτή με τη βοήθεια των αλυσίδων έχει σαν αποτέλεσμα την μετάδοση στο δοκίμιο κεντρικής εφελκυστικής δύναμης, χωρίς ταυτόχρονη εμφάνιση ροπής. Το μέτρο της δύναμης αυτής είναι :

$$160 * 5 = 800 \text{ Nt λόγω του φορτίου } 16 \text{ Kgr}$$

$$260 * 6 = 1560 \text{ Nt λόγω του φορτίου } 26 \text{ Kgr}$$

$$\frac{100 \text{ Nt λόγω ιδίου βάρους σιδηράς δοκού}}{}$$

$$\text{Σύνολο} \quad 2460 \text{ Nt}$$

Επομένως η επιβαλλόμενη εφελκυστική τάση είναι :

$$\frac{2460 \text{ Nt}}{100 * 100 \text{ mm}^2} = 0,246 \text{ MPa}$$

Για την επιλογή αυτής της τιμής ακολουθείται η εξής συλλογιστική : το πρίσμα είναι παρασκευασμένο από ανάμιγμα της κατηγορίας IV, δηλ. 25% ασφαλτικό υλικό -75% αμμοχάλικο, του οποίου η αντοχή σε θλίψη είναι περίπου 10 MPa. Θεωρούμε ότι η εφελκυστική του αντοχή είναι $1/10 + 1/15$ της θλιπτικής αντοχής δηλ. $0,67 \div 1 \text{ MPa}$. Το $1/3$ της εφελκυστικής αντοχής είναι περίπου 0,25 MPa, τιμή η οποία επιλέγεται για την περιामατική διαδικασία.

Η εφελκυστική παραμόρφωση του δοκιμίου μετράται με ηλεκρομηκυνσιόμετρα , με τον τρόπο που έχει περιγραφεί εκτενώς. Εγινε απόπειρα μετρήσεως της παραμόρφωσης με μηχανικό μηκυνσιόμετρο ακριβείας 10^{-6} , αλλά δεν υπήρξαν θετικά αποτελέσματα λόγω του πολύ μικρού μεγέθους των παραμορφώσεων.

Επίσης επιχειρήθηκε η μέτρηση ερπυστικών παραμορφώσεων υπό συνεχές εφελκυστικό φορτίο για αρκετό διάστημα, αλλά δεν υπήρξε επιτυχία διότι μετά από περίπου 20 min ξεκόλλησε η χαλύβδινη πλάκα από το κάτω μέρος του δοκιμίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

Αποτελέσματα - Σχολιασμός

7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

7.1. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΑΝΑΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

Κατηγορία	Είδη υλικών
I	100% ασφαλτικό υλικό
II	75% ασφαλτικό υλικό - 25% αμμοχάλικο
III	50% ασφαλτικό υλικό - 50% αμμοχάλικο
IV	25% ασφαλτικό υλικό - 75% αμμοχάλικο
V	100% αμμοχάλικο

Πίνακας 7.1.

Η επιλογή των κατηγοριών αυτών γίνεται προσπαθώντας να αντιπροσωπευθεί με τη μεγαλύτερη δυνατή προσέγγιση ο τρόπος με τον οποίο η αποξίλωση παλαιών οδοστρωμάτων και στη συνέχεια η σταθεροποίηση με τσιμέντο. Η αποξίλωση και ο θρυμματισμός μπορεί να γίνει μόνο στην ασφαλτική στρώση (περίπτωση I) ή και να επεκταθεί σε μεγαλύτερο βάθος στις στρώσεις της βάσεως και της υποβάσεως (περιπτώσεις II, III, IV). Η κατηγορία αναμίγματος V αντιπροσωπεύει το ισχνό σκυρόδεμα και επιλέχθηκε για να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο σύγκρισης στα αποτελέσματα της σταθεροποίησης που δίνουν οι άλλες κατηγορίες.

7.2. ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΕΩΣ

Τα αποτελέσματα της δοκιμής συμπυκνώσεως και η αντοχή των δοκιμίων φαίνεται στο διάγραμμα του σχ. 7.1.

Παρατηρούμε ότι για το ανάμιγμα 50% ασφαλτικό υλικό -50% αμμοχάλικο οι καμπύλες της πυκνότητας και της αντοχής έχουν την ίδια μορφή και παρουσιάζουν μέγιστο στην τιμή υγρασίας 5%.

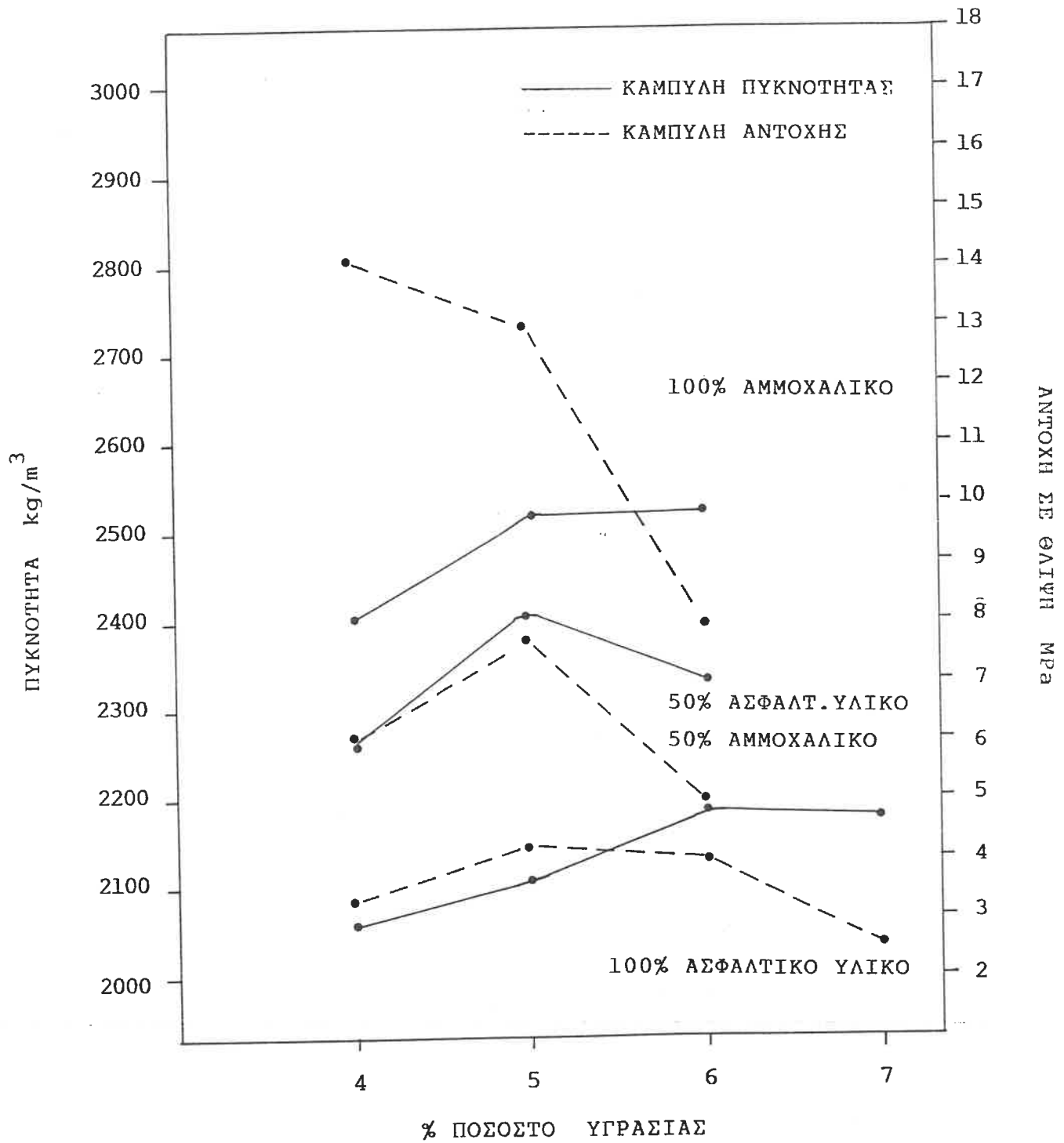
Για το ανάμιγμα με 100% ασφαλτικό υλικό, η μέγιστη τιμή παρατηρείται μεταξύ των ποσοστών υγρασίας 6% και 7%. Πρέπει όμως εδώ να σημειωθεί ότι για αυτά τα ποσοστά υγρασίας και ιδιαίτερα για το 7% , κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης παρατηρήθηκε διαχωρισμός του λεπτόκοκκου υλικού και ανάδυσή του στην επιφάνεια του δοκιμίου. Έτσι υπάρχει το ενδεχόμενο τα ποσοστά που παρατηρείται το μέγιστο να είναι πλασματικά. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καμπύλη της πυκνότητας σε συνάρτηση με την υγρασία για τα κοκκώδη υλικά, όπως αυτό που χρησιμοποιούμε, είναι τεταμένη και δεν παρουσιάζει ξεκάθαρη τιμή μεγίστου. Η καμπύλη όμως της αντοχής σε συνάρτηση με την υγρασία δείχνει καθαρά ότι η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται όταν η καμπύλη είναι 5% και λόγω του ότι ο παράγοντας της αντοχής κρίνεται πιο κρίσιμος, το ποσοστό αυτό θα χρησιμοποιηθεί και στη συνέχεια για την παρασκευή αναμιγμάτων ίδιας σύνθεσης.

Για το μίγμα από το καθαρό αμμοχάλικο παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στην πυκνότητα για τις τιμές

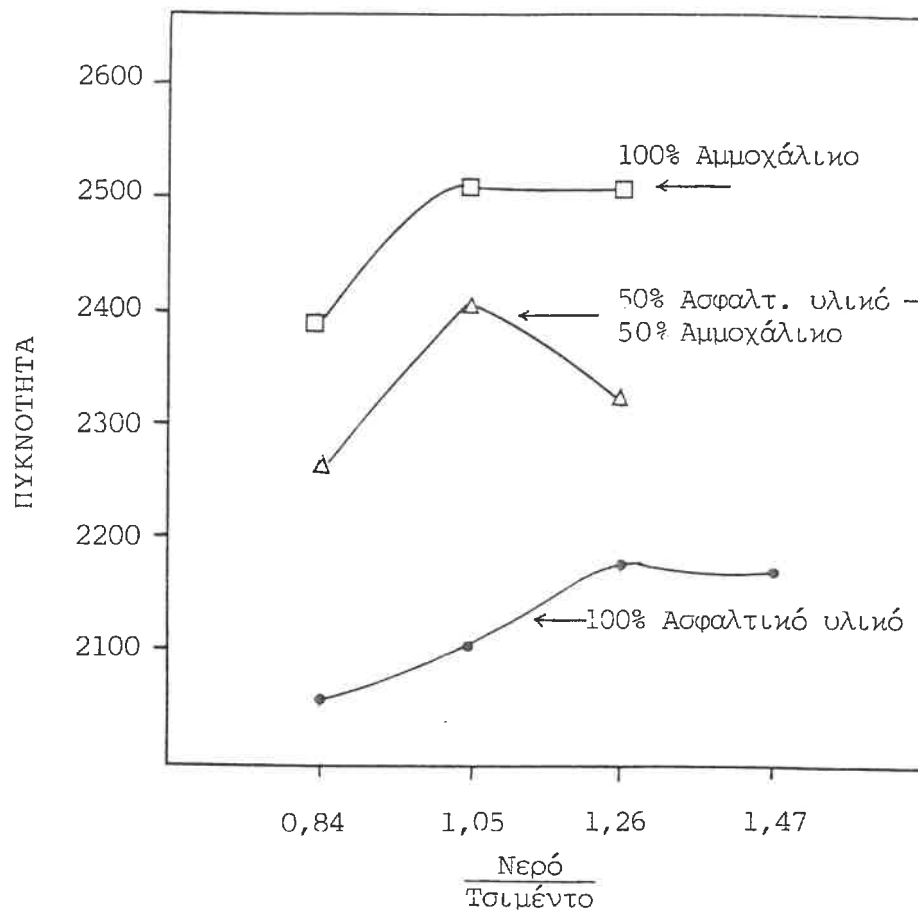
υγρασίας 5% και 6%. Σημειώνεται δε ότι για τα δοκίμια που συμπυκνώθηκαν με υγρασία 6%, παρατηρήθηκε φαινόμενο διαχωρισμού του λεπτόκοκκου υλικού, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Η δε καμπύλη της αντοχής παρουσιάζει το μέγιστο στο χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας απ' όσα εφαρμόστηκαν, φαινόμενο απολύτως φυσιολογικό και αναμενόμενο, διότι η αντοχή του αναμίγματος επηρεάζεται από τον λόγο νερό προς τσιμέντο, ο οποίος γι' αυτά τα ποσοστά υγρασίας, βρίσκεται ήδη σε πολύ υψηλές τιμές. Υπενθυμίζεται ότι η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται όταν ο λόγος νερό προς τσιμέντο είναι μικρότερος με την προϋπόθεση ότι επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή συμπύκνωση.

Στην εξεταζόμενη περίπτωση η μικρότερη τιμή του λόγου είναι 0,84 , όταν η υγρασία είναι 4%. Ακολουθούν διαγράμματα πυκνότητας-λόγου νερού προς τσιμέντο και αντοχής-λόγου νερού προς τσιμέντο, για να φανεί παραστατικά η επιρροή του λόγου στα δύο αυτά μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών.

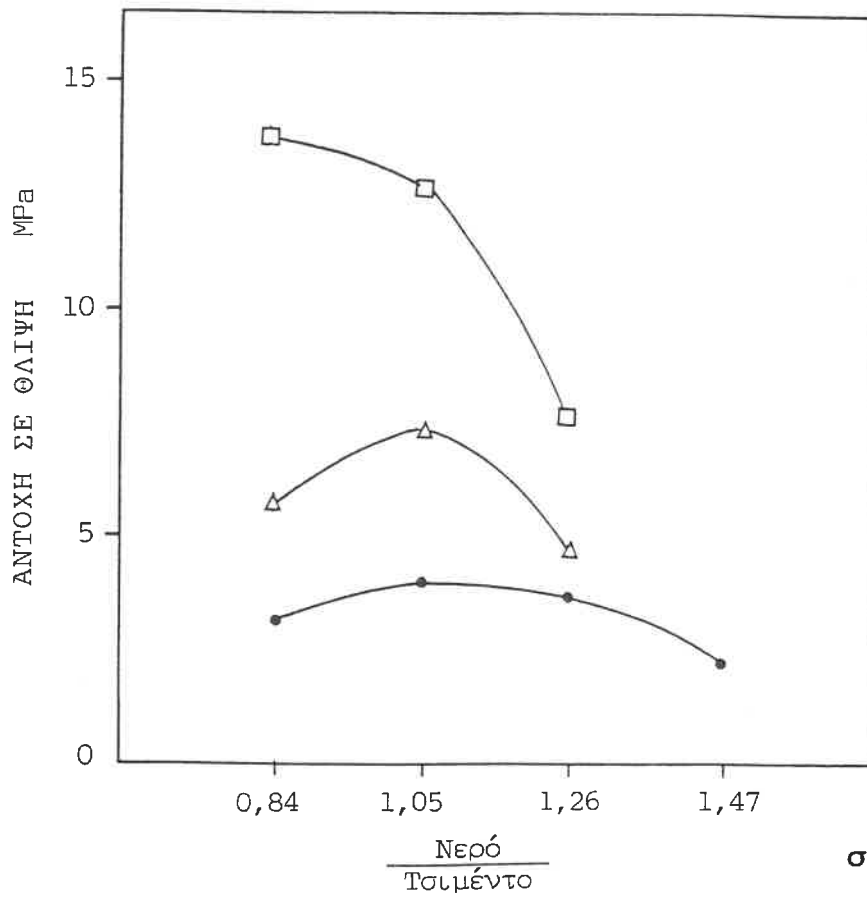
Για τη συνέχιση της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιείται ποσοστό υγρασίας 5%, το οποίο, όπως φαίνεται από το σχήμα 7.1., δίνει μέγιστη πυκνότητα και αντοχή για τα υλικά που προέρχονται από ανάμιξη ασφαλικού υλικού και αμμοχάλικου, μίγματα τα οποία αντιστοιχούν σε περιπτώσεις ανακατασκευής και ενισχύσεως παλαιών οδοστρωμάτων.



Σχ. 7.1



Σχ. 7.2



Σχ. 7.3

7.3. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

Αντοχή σε θλίψη κυβικών δοκιμίων ακμής 100mm ηλικίας 7 ημερών						
Κατηγορία μίγματος	Αριθμός δοκιμίων			μ.ο. MPa	S MPa	σ.μ. %
	1 MPa	2 MPa	3 MPa			
I	4,875	5,007	5,207	5,03	0,14	2,8
III	8,29	8,37	8,52	8,39	0,095	1,1
V	15,44	15,89	16,55	15,96	0,46	2,9

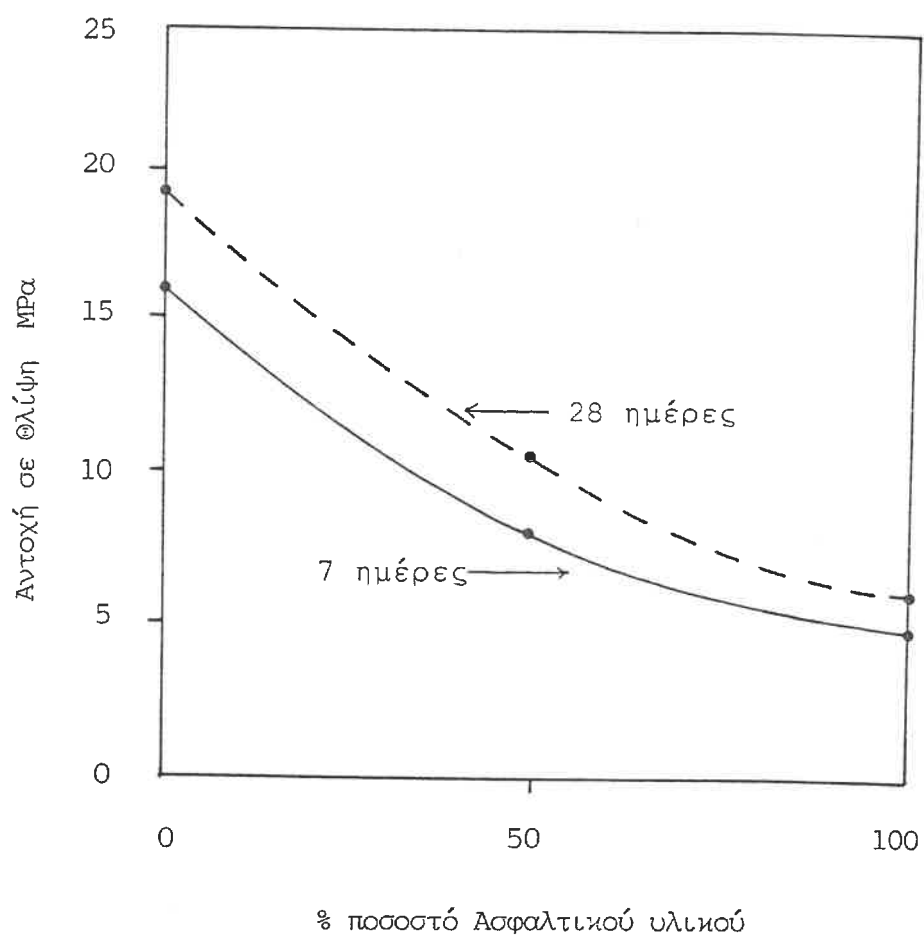
Πίνακας 7.2.

* Τυπική απόκλιση

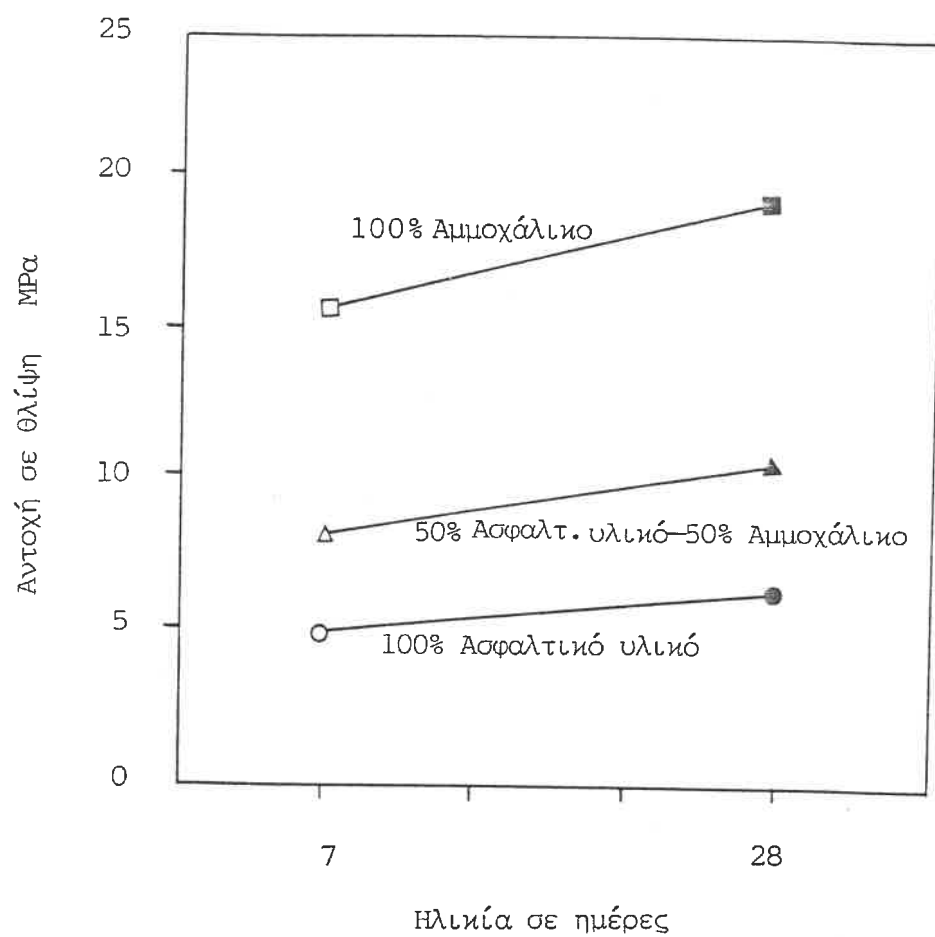
** Συντελεστής μεταβλητότητας

Αντοχή σε θλίψη κυβικών δοκιμίων ακμής 100mm ηλικίας 28 ημερών						
Κατηγορία μίγματος	Αριθμός δοκιμίων			μ.ο. MPa	S MPa	σ.μ. %
	1 MPa	2 MPa	3 MPa			
I	6,44	5,51	5,95	6,3	0,25	4
III	10,75	10,47	11,01	10,74	0,22	2
V	20,04	18,80	19,85	19,56	0,55	2,8

Πίνακας 7.3.



Σχ. 7.4



Σχ. 7.5

7.3.1. Σχολιασμός αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης. Σύγκριση με άλλες έρευνες

Από το σχήμα 7.4. παρατηρείται μείωση της θλιπτικής αντοχής του σταθεροποιημένου υλικού, όσο αυξάνεται το ποσοστό του περιεχομένου ασφαλτικού υλικού. Η αντοχή του μίγματος Ι (ασφαλτικό υλικό 100%) είναι μόλις το 30% της αντοχής του μίγματος V (αμμοχάλικο).

Επίσης από το σχήμα 7.5. βλέπουμε ότι υπάρχει σημαντική αύξηση στις αντοχές των δοκιμίων 28 ημερών σε σχέση με τα δοκίμια 7 ημερών. Η αύξηση αυτή είναι $20 \div 30\%$.

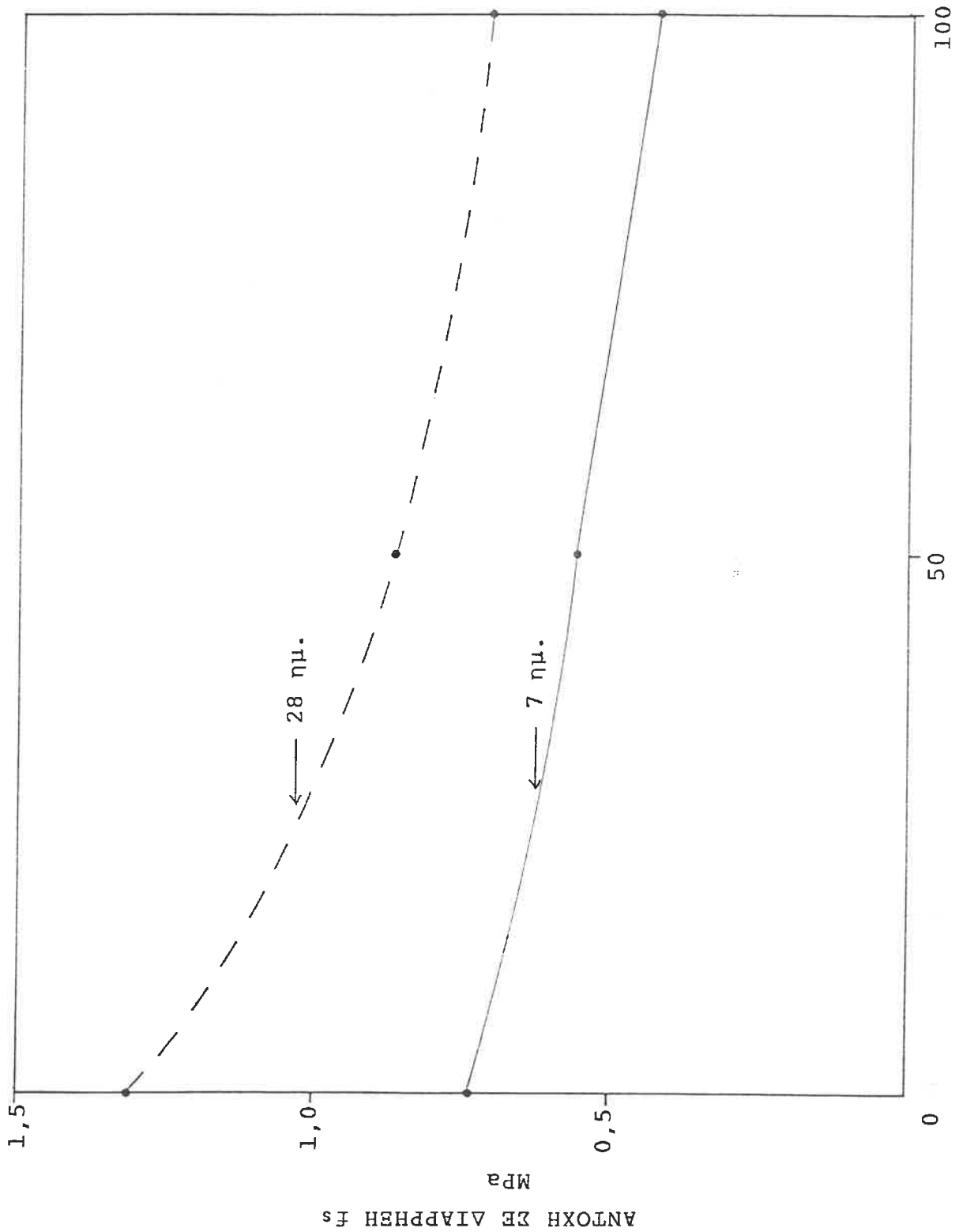
7.4. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗ ΘΛΙΨΗ (διάρρηξη)

Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη (διάρρηξη) κυλινδρικών δοκιμίων διαμέτρου 100mm και μήκους 200mm και ηλικίας 7 ημερών						
Κατηγορία μίγματος	Αριθμός δοκιμίων			μ.ο. MPa	S MPa	σ.μ. %
	1 MPa	2 MPa	3 MPa			
I	0,418	0,433	--	0,426	--	--
III	0,533	0,559	0,588	0,56	0,022	4
V	0,735	0,747	0,747	0,743	0,006	0,7

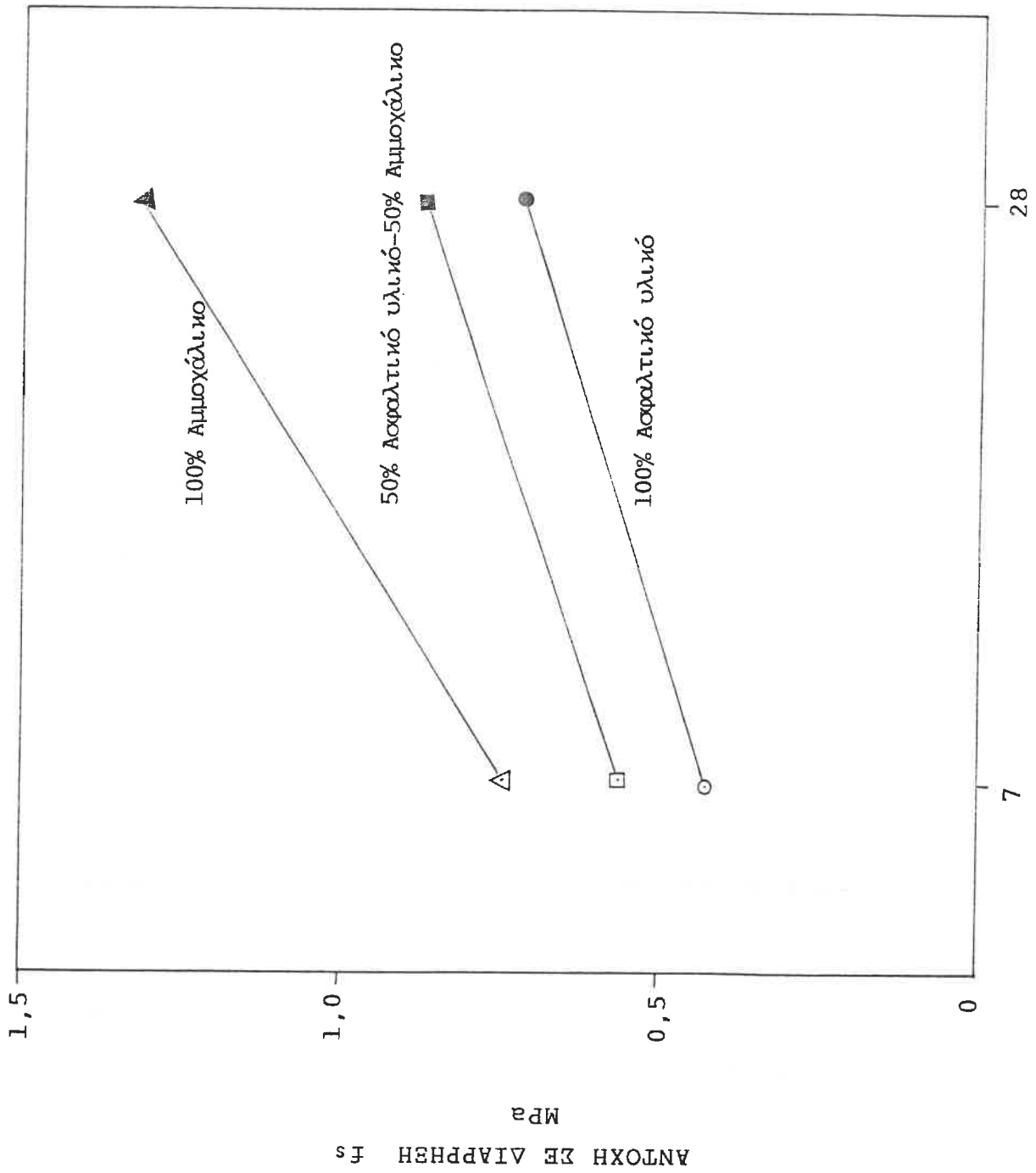
Πίνακας 7.4.

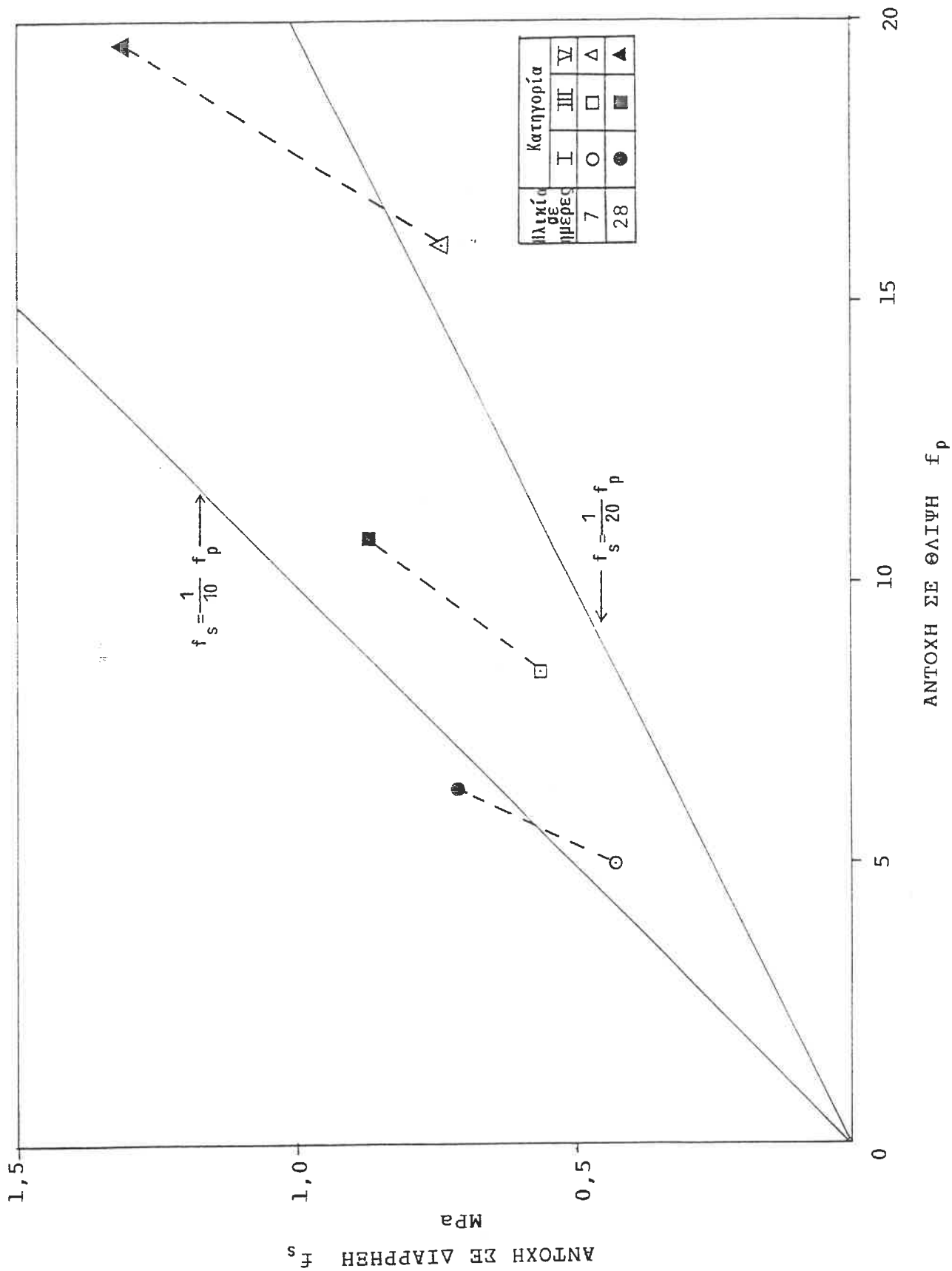
Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη (διάρρηξη) κυλινδρικών δοκιμίων διαμέτρου 100mm και μήκους 200mm και ηλικίας 28 ημερών						
Κατηγορία μίγματος	Αριθμός δοκιμίων			μ.ο. MPa	S MPa	σ.μ. %
	1 MPa	2 MPa	3 MPa			
I	0,65	0,71	0,78	0,71	0,053	7,4
III	0,91	0,82	0,89	0,87	0,039	4,4
V	1,43	1,36	1,17	0,17	0,11	8,3

Πίνακας 7.5.

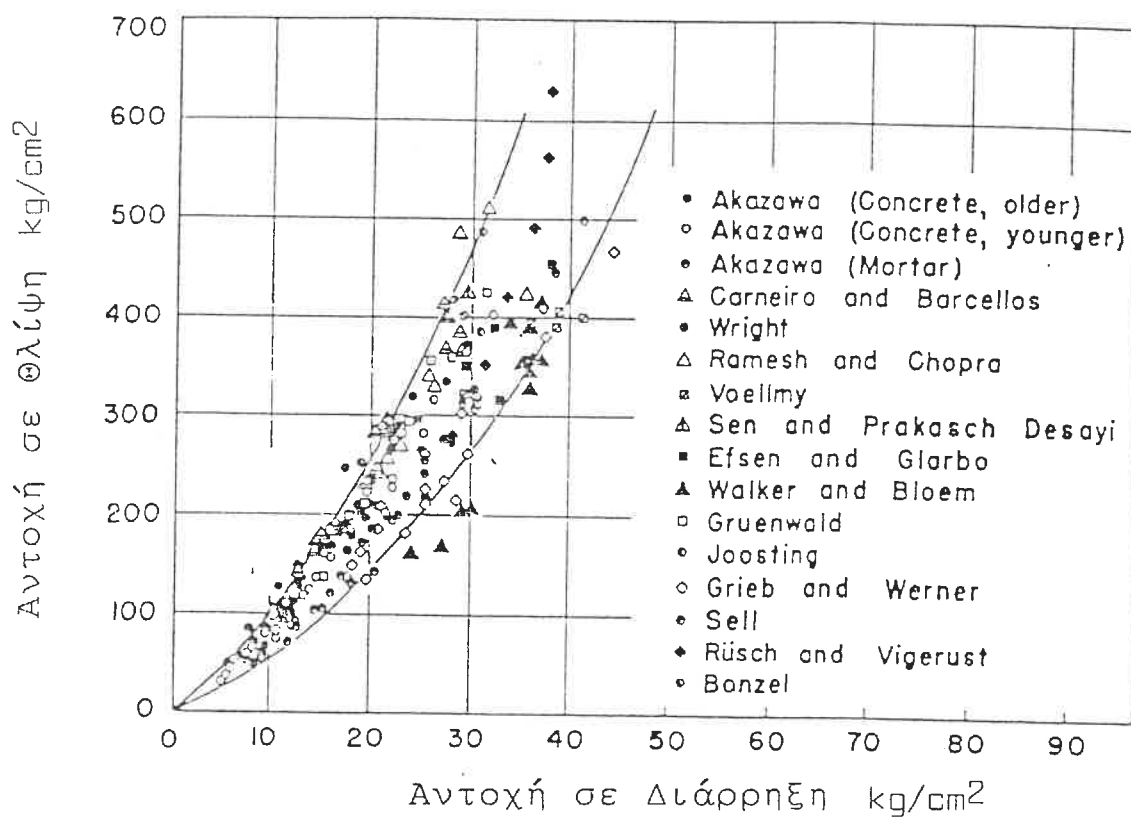


Σχ. 7.6





Σχ. 7.8



Σχ. 7.9

7.4.1. Σχόλια

Για την κατηγορία I έχουμε μόνο 2 τιμές αντοχής 7 ημερών, γιατί το τρίτο κυλινδρικό δοκίμιο έσπασε κατά τη διαδικασία αφαίρεσής του από την χαλύβδινη μήτρα.

Στο σχήμα 7.6. βλέπουμε ότι η αντοχή σε διάρρηξη μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό του ασφαλτικού υλικού. Η αντοχή μειώνεται κατά 75% στις 7 ημέρες και κατά 85% στις 28 ημέρες μεταξύ των δοκιμών των δύο ακραίων κατηγοριών.

Από το σχήμα 7.7. παρατηρούμε ότι η αντοχή σε διάρρηξη αυξάνεται από τις 7 στις 28 ημέρες και η αύξηση αυτή είναι πολύ εντονότερη στο καθαρό αμμοχάλικο (αύξηση 77%) από ότι στις άλλες δύο κατηγορίες (αύξηση 55 ÷ 65%).

Το σχήμα 7.8 παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ της αντοχής σε θλίψη και της αντοχής σε διάρρηξη. Παρατηρούμε ότι η αντοχή σε διάρρηξη είναι από 10 έως 20 φορές μικρότερη της αντοχής σε θλίψη.

Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με μεγάλο πλήθος πειραμάτων που έχουν γίνει στο παρελθόν και παριστάνονται στο σχήμα 7.9.

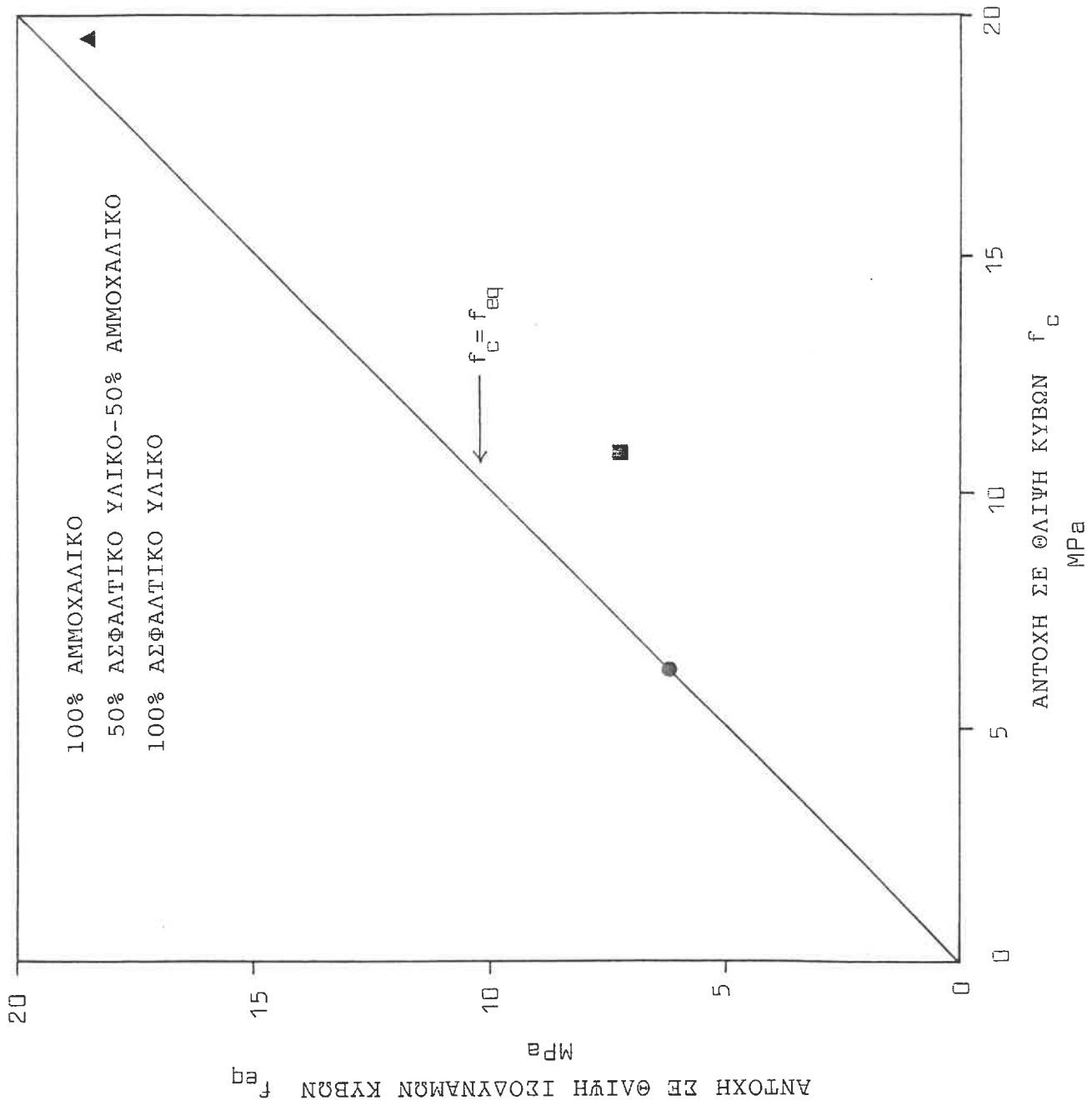
7.5. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΚΑΙ ΘΛΙΨΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΩΝ ΚΥΒΩΝ

Αντοχή σε κάμψη πρισματικών δοκιμίων 100mm και μήκους 500mm και ηλικίας 28 ημερών								
Κατηγορία μίγματος	Αριθμός δοκιμίων					μ.ο. MPa	S MPa	σ.μ. %
	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa			
I	0,484	0,502	0,471	--	--	0,49	0,013	2,2
II	0,50	0,537	0,50	0,484	0,511	0,51	0,018	3,8
III	0,467	0,52	0,476	--	--	0,49	0,023	8,4
IV	0,626	0,555	0,661	--	--	0,61	0,054	14,8
V	0,802	0,873	0,837	--	--	0,84	0,030	4,1

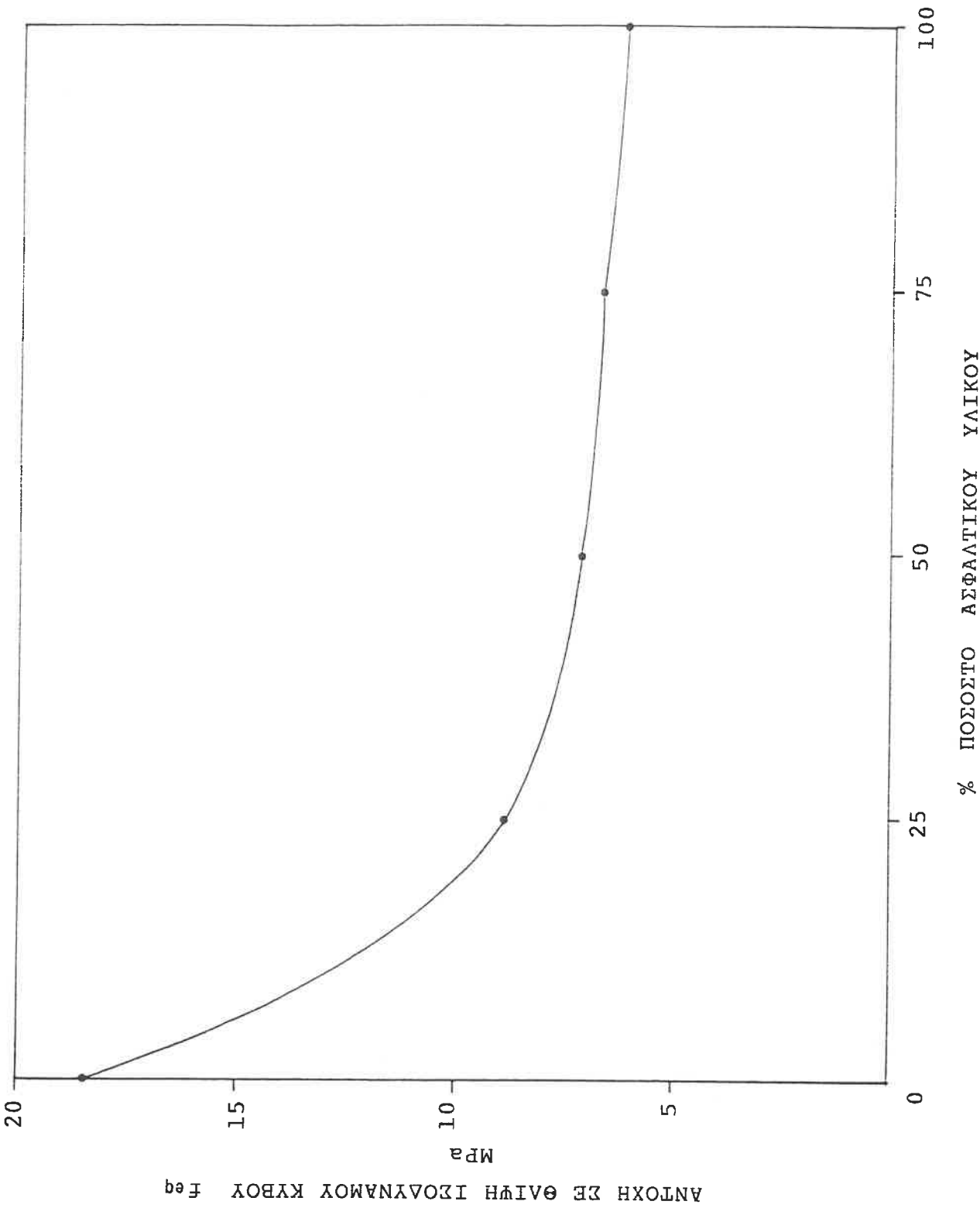
Πίνακας 7.6.

Αντοχή σε θλίψη ισοδύναμων κύβων (equivalent cube test) σε δοκίμια ηλικίας 28 ημερών						
Κατηγορία μίγματος	Αριθμός δοκιμίων			μ.ο. MPa	S MPa	σ.μ. %
	1 MPa	2 MPa	3 MPa			
I	5,9	6,23	6,1	6,1	0,14	2,2%
II	6,29	6,91	6,64	6,6	0,25	3,8%
III	6,43	7,9	7,14	7,2	0,60	8,4%
IV	8,7	7,4	10,6	8,9	1,31	14,8%
V	17,51	19,31	18,76	18,52	0,75	4,1%

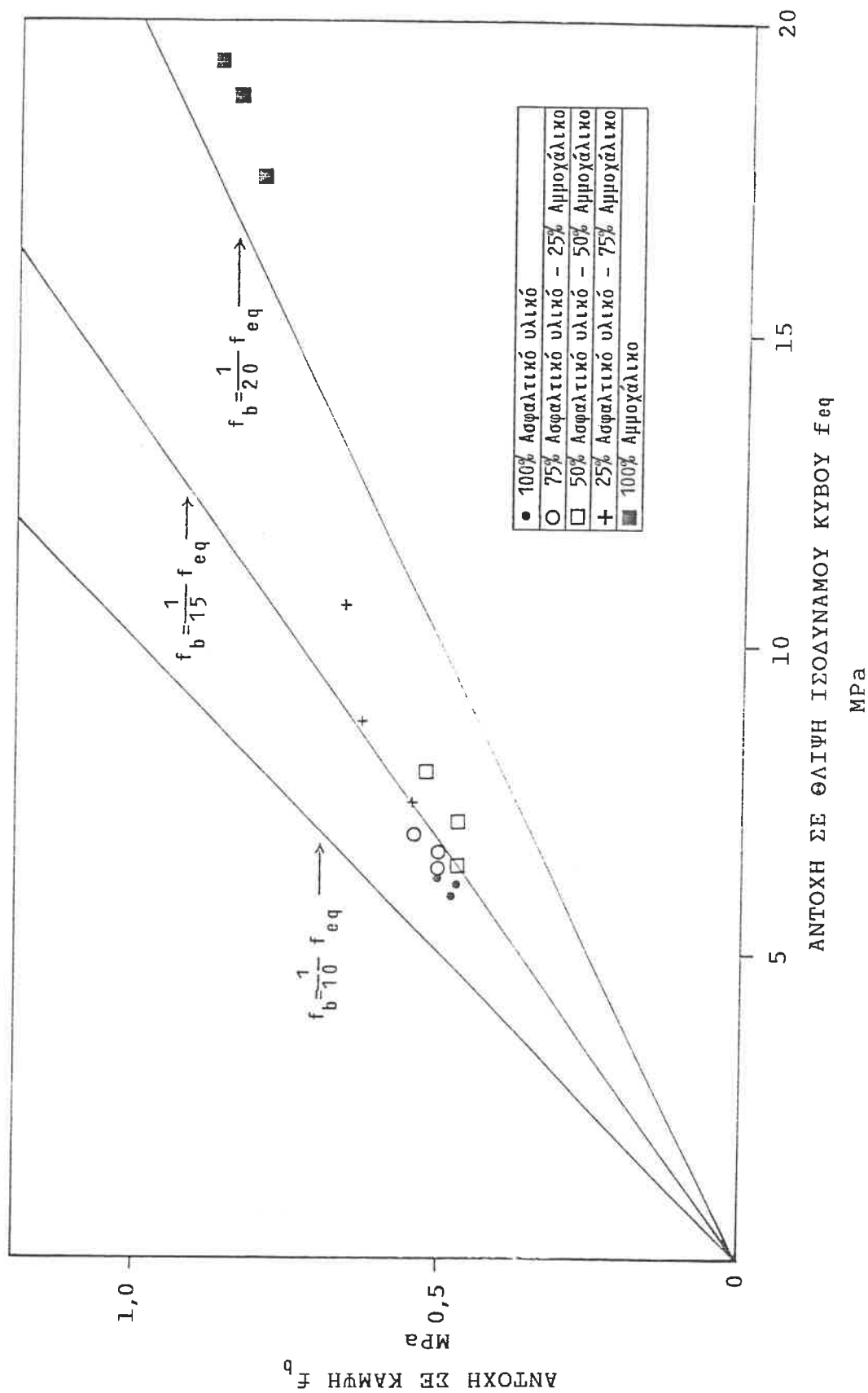
Πίνακας 7.7.



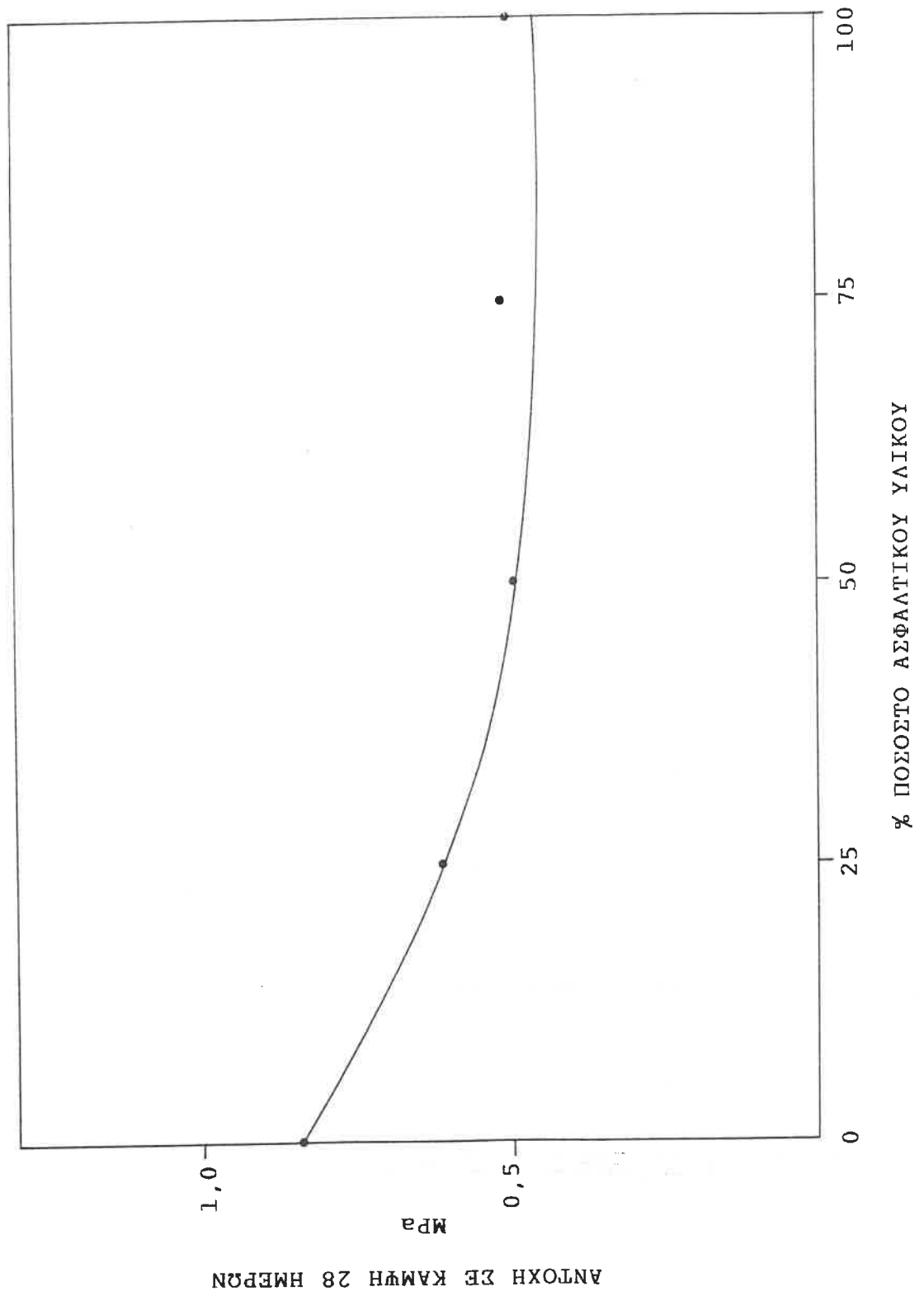
Σχ. 7.10



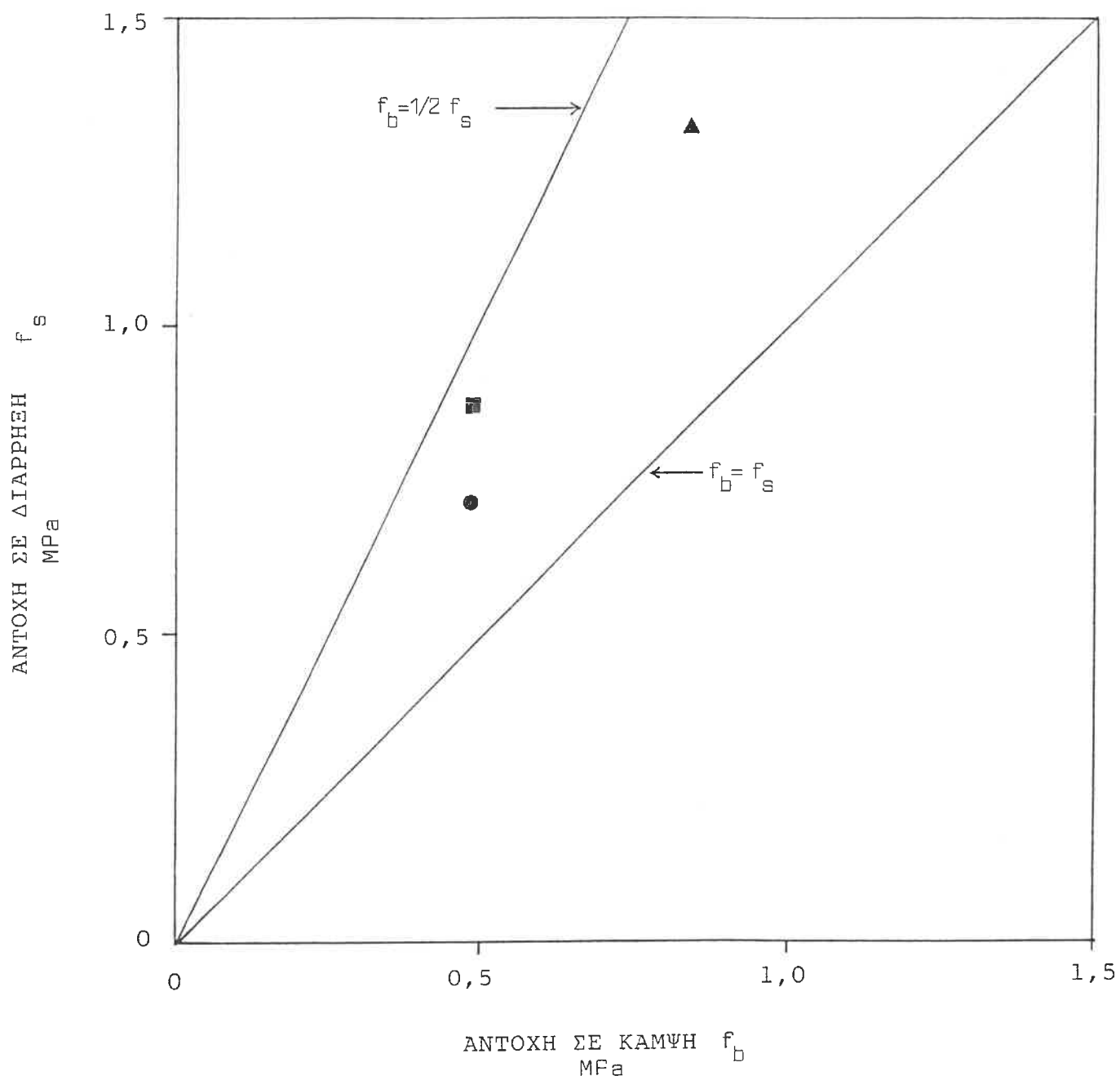
Σχ. 7.10α



ΣΧ. 7.11



ΣΧ. 7.13α



Σχ.7.13

7.5.1. Σχόλια

Η τιμή της αντοχής σε κάμψη κάθε κατηγορίας καθορίζεται από τον μέσο όρο της αντοχής τριών πρισματικών δοκιμίων εκτός από το ανάμιγμα κατηγορίας II που είναι ο μέσος όρος πέντε δοκιμίων.

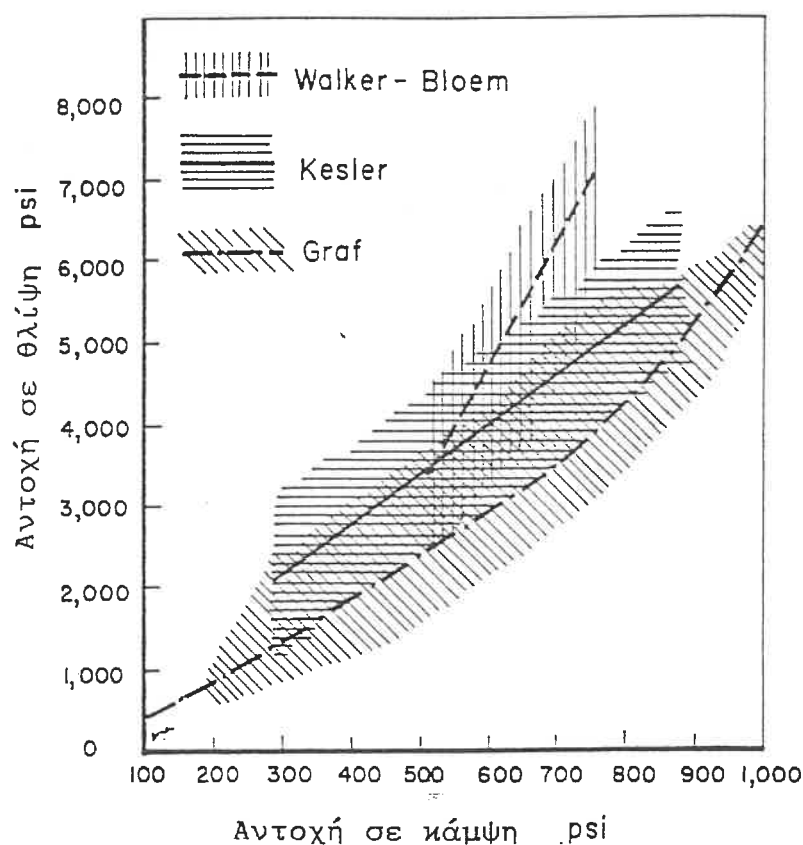
Όπως και στα προηγούμενα πειράματα έτσι και στην κάμψη παρατηρούνται υψηλότερες αντοχές στα μίγματα με μικρότερο ποσοστό ασφαλτικού υλικού. Το φαινόμενο όμως δεν είναι τόσο έντονο και μάλιστα για τις κατηγορίες I, II, III παρατηρείται η ίδια σχεδόν αντοχή.

Η αντοχή σε θλίψη ισοδύναμων κύβων όπως φαίνεται στο σχήμα 7.10 παρουσιάζει περίπου την ίδια μορφή με την αντοχή σε θλίψη κυβικών δοκιμίων.

Στο σχήμα 7.11 παριστάνεται η αντοχή σε κάμψη σε σχέση με την αντοχή σε θλίψη ισοδύναμων κύβων. Όπως φαίνεται η αντοχή σε κάμψη είναι σαφώς μικρότερη από το 1/10 της αντοχής σε θλίψη, στα περισσότερα δοκίμια είναι περίπου το 1/15 της αντοχής σε θλίψη.

Παρατηρείται δε ότι στο μίγμα V του καθαρού αμμοχάλικου η αντοχή σε κάμψη είναι μικρότερη από το 1/20 της αντοχής σε θλίψη.

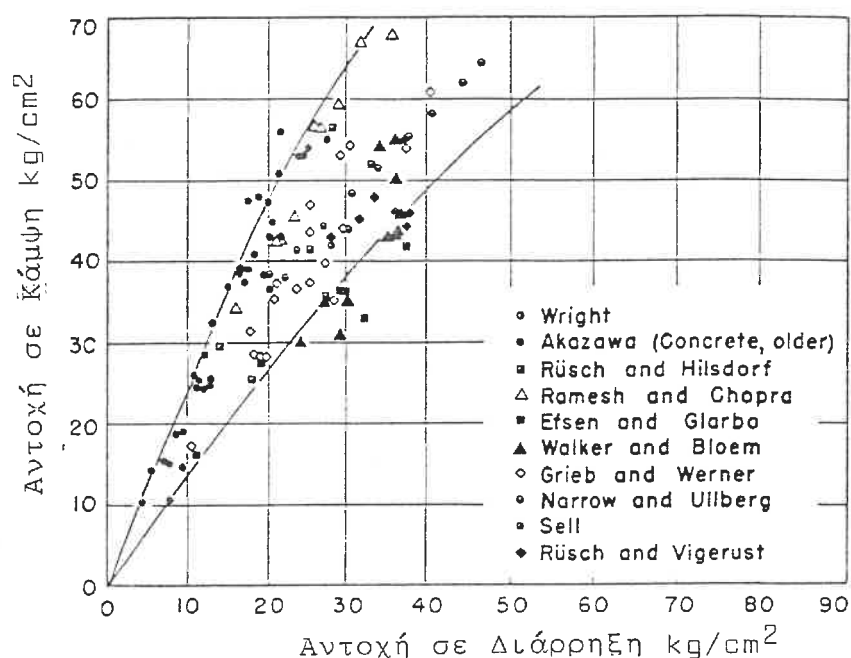
Οι τιμές της αντοχής σε κάμψη είναι πολύ χαμηλές σε σχέση μ' αυτές που έχουν πραγματοποιηθεί από διάφορους ερευνητές. Ο Williams (1) αναφέρει ότι για το έδαφος-τσιμέντο (soil-cement) η αντοχή σε κάμψη είναι περίπου το $1/5$ της αντοχής σε θλίψη και για το ισχνό σκυρόδεμα κυμαίνεται μεταξύ του $1/6$ και του $1/10$ της αντοχής σε θλίψη. Τα αποτελέσματα διαφόρων άλλων ερευνητών φαίνονται στο σχήμα 7.12. (39)



Σχ. 7.12

Στο σχήμα 7.13 παριστάνεται η αντοχή σε διάρρηξη σε συνάρτηση με την αντοχή σε κάμψη. Παρατηρείται ότι η αντοχή σε κάμψη, είναι μικρότερη από την αντοχή σε διάρρηξη και σε μερικές περιπτώσεις πλησιάζει το $1/2$ αυτής.

Στο σχήμα 7.14. φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα διαφόρων ερευνητών που δείχνουν ότι η αντοχή σε κάμψη είναι σαφώς μεγαλύτερη (μέχρι 2 φορές) της αντοχής σε διάρρηξη.⁽³⁹⁾



Σχ. 7.14

Με βάση τα προηγούμενα, διατυπώνονται αρκετές επιφυλάξεις σε σχέση με την απόλυτη τιμή της αντοχής σε κάμψη των δοκιμίων όλων των κατηγοριών, η οποία βρίσκεται σαφώς μικρότερη από την αναμενόμενη. Το γεγονός αυτό οφείλεται μάλλον στη μηχανή εκτελέσεως της δοκιμής σε κάμψη και στο δυναμόμετρο, από το οποίο γινόταν η ανάγνωση του φορτίου θραύσεως.

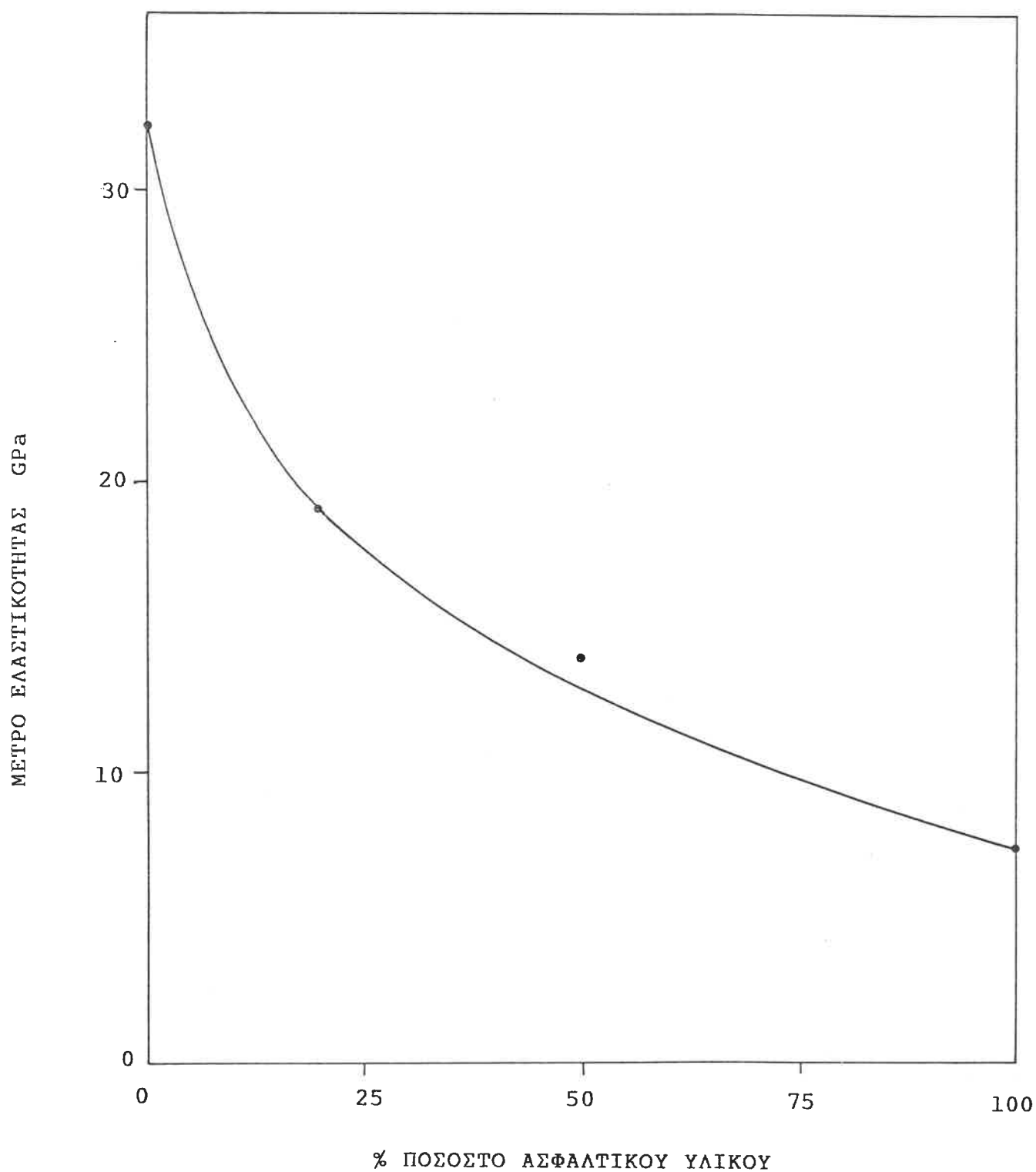
7.6. ΣΤΑΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΛΟΓΟΣ POISSON

Στατικό μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη πρισματικών δοκιμίων διατομής 100mm και μήκους 200mm ηλικίας τουλάχιστον 28 ημερών.						
Κατηγορία μίγματος	Αριθμός δοκιμίων			μ.ο. GPa	σ GPa	σ.μ. %
	1 GPa	2 GPa	3 GPa			
I	7	8	7	7, 33	0, 47	6, 4
III	13	15	--	14	--	--
IV	24	16	17	19	3, 56	18, 7
V	30	31, 5	35	32, 17	2, 1	6, 5

Πίνακας 7.8.

Στατικός λόγος Poisson σε θλίψη πρισματικών δοκιμίων διατομής 100mm και μήκους 200mm ηλικίας τουλάχιστον 28 ημερών.	
Κατηγορία μίγματος	Λόγος Poisson
I	0, 21
III	0, 22
IV	0, 21
V	0, 20

Πίνακας 7.9.

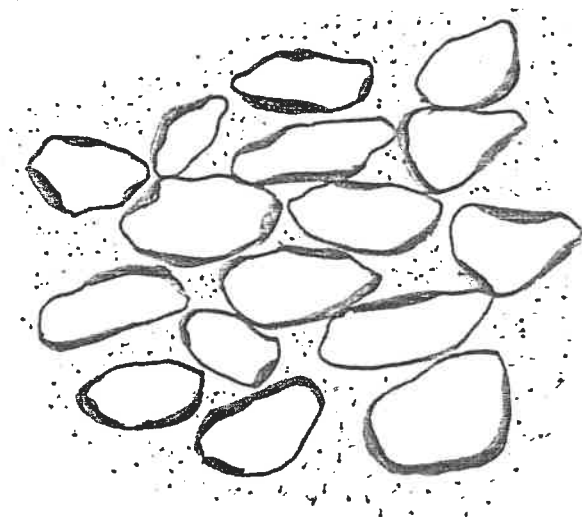


Σχ. 7.15

7.6.1. Σχόλια

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 7.15 παρατηρείται θεαματική πτώση στο μέτρο ελαστικότητας, όσο αυξάνεται το ποσοστό του ασφαλτικού υλικού.

Οι κατηγορίες δηλαδή που περιέχουν ασφαλτικό υλικό παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευκαμψία και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι κόκκοι των αδρανών περιβάλλονται μερικώς ή ολικώς από μια λεπτή στρώση ασφάλτου όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 7.17

Όταν λοιπόν επιβληθεί η εξωτερική φόρτιση οι κόκκοι έρχονται σε επαφή ο ένας με τον άλλο με αποτέλεσμα να υπάρχουν μικρομετακινήσεις μέχρι να επιτευχθεί πλήρης συνεργασία μεταξύ των κόκκων.

Το φαινόμενο αυτό γίνεται λιγότερο έντονο όσο μειώνεται το ποσοστό της ασφάλτου, και μηδενίζεται στην κατηγορία V του καθαρού αμμοχάλικου.

Σε ανάλογες έρευνες από τους Williams-Patankar (19) και Κόλια-Βασιλείου-Γιώτη (40) παρατηρήθηκε επίσης το φαινόμενο της μείωσης του μέτρου ελαστικότητας των υλικών που περιέχουν κάποιο ποσοστό ασφάλτου.

Οι Williams-Patankar χρησιμοποίησαν αδρανή προεπαλλειμμένα με άσφαλτο και προέκυψε μίγμα με μέτρο ελαστικότητας 16,5 GPa. Παρόμοια αδρανή, χωρίς επάλληψη έδωσαν μίγματα με μέτρο ελαστικότητας 27,9 GPa.

Οι Κόλιας-Βασιλείου-Γιώτης χρησιμοποίησαν φρεζαρισμένο ασφαλτικό υλικό και θραυστά αδρανή και προέκυψαν μίγματα με μέτρο ελαστικότητας 9 GPa

Ο στατικός λόγος του Poisson που μετρήθηκε στα δοκίμια των διαφόρων κατηγοριών δεν παρουσίασε σημαντικές διαφορές.

Ποσοστό ασφάλτου ω
ταχύτητα διέλευσης
υπερήχων

7.7. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ, ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ-ΤΑΣΕΩΣ, ΛΟΓΟΥ POISSON - ΤΑΣΕΩΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ.

Για την κατασκευή των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν περισσότερα του ενός πρισματικά δοκίμια ώστε να γίνει έλεγχος της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Σε πολλά δοκίμια έγινε φόρτιση μέχρι θράυσεως ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά των υλικών σ' αυτή τη φάση της φόρτισης. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για δύο διαφορετικές ταχύτητες επιβολής της φόρτισης. Η ταχύτητα 2,0 KN/sec αντιπροσωπεύει την αργή-στατική φόρτιση, ενώ η ταχύτητα 9,99 KN/sec αντιπροσωπεύει μια πιο γρήγορη φόρτιση που μοιάζει περισσότερο με δυναμική φόρτιση, με την οποία όπως είναι γνωστό καταπονούνται τα οδοστρώματα.

7.7.1. Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων

Ακολουθεί παράθεση και σχολιασμός των διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεων των διαφόρων κατηγοριών των υλικών που διαθέτουμε.

7.7.1.1. Κατηγορία 100% αμμοχάλικο

Μεταξύ των τριών δοκιμίων που εξετάστηκαν δεν παρουσιάστηκαν αξιοσημείωτες διαφορές στα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν με φόρτιση ως το 1/3 του αναμενόμενου φορτίου θράυσεως.

Ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων μέχρι του $1/3$ του φορτίου θραύσεως για ταχύτητα φορτίσεως $9,99 \text{ KN/sec}$ εικονίζεται στο σχήμα 7.8.

Παρατηρείται ότι το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων είναι σχεδόν ευθύγραμμο και μόνο στην αρχή παρουσιάζει πολύ μικρές, διαδοχικές και αντίθετης κυρτότητας καμπυλώσεις, οι οποίες, λόγω του ότι είναι πολύ μικρή η τιμή των τάσεων και των παραμορφώσεων, μπορεί να οφείλεται στις ατέλειες των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων, ή ακόμη στην προϋπαρξη μικρορωγμών στο δοκίμιο, οι οποίες με την επιβολή του φορτίου, κλείνουν και δείχνουν ένδειξη παραμορφώσεως στα σημεία του διαγράμματος που αναφέρθηκε παραπάνω.

Στο ίδιο δοκίμιο σχεδιάσθηκε το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων και για ταχύτητα φόρτισης 2 KN/sec . Στο σχήμα 7.19 παριστάνονται οι δύο καμπύλες για τις δύο ταχύτητες φόρτισης. Παρατηρείται ότι για τη μεγάλη ταχύτητα φόρτισης οι παραμορφώσεις που παρουσιάζονται, για την ίδια τιμή της τάσης είναι μικρότερες από ότι για μικρή ταχύτητα φόρτισης φαινόμενο το οποίο ερμηνεύεται από διάφορους ερευνητές όπως ο Τάσσιος. (41)

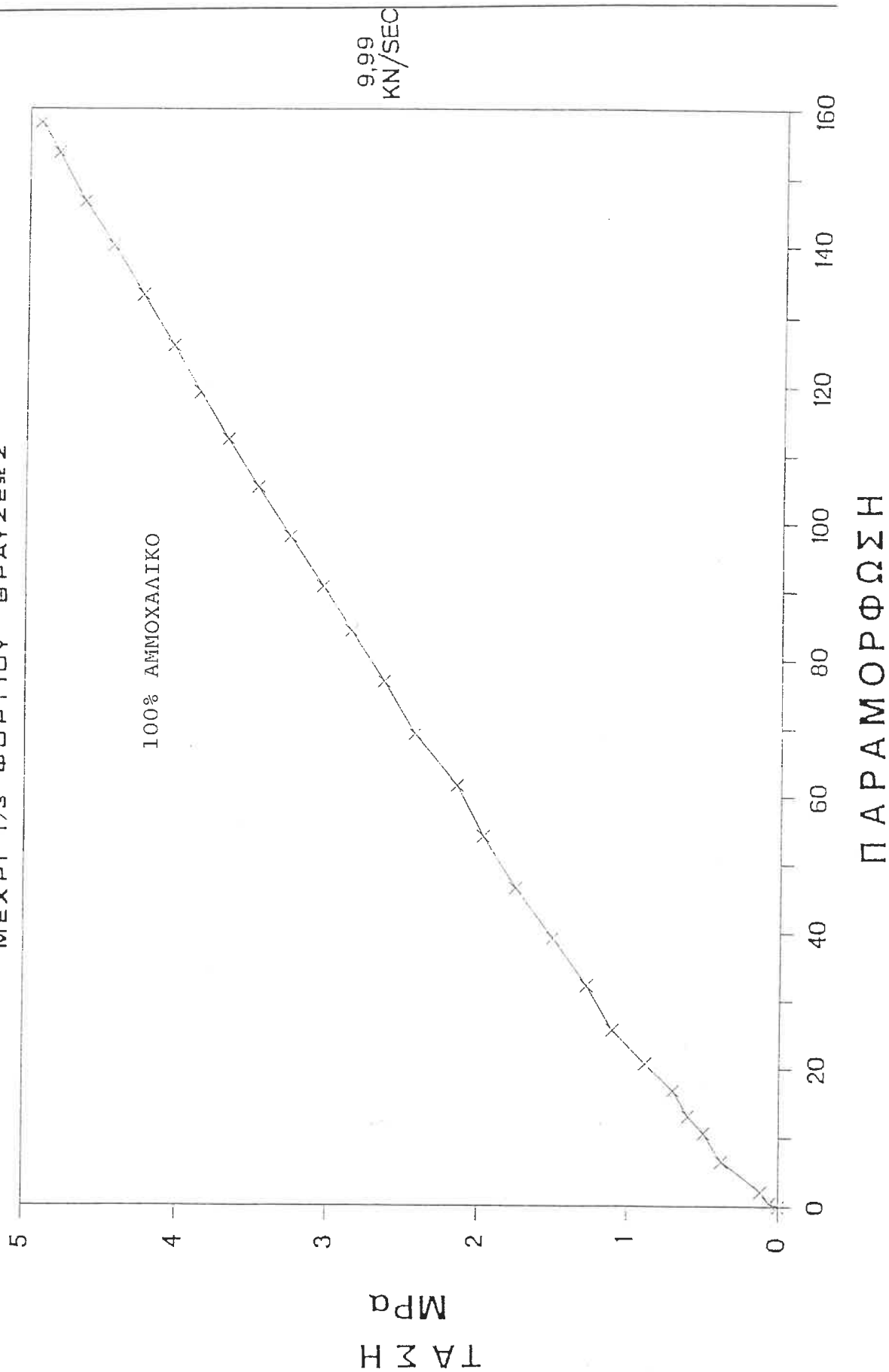
Σε δύο από τα τρία δοκίμια που εξετάστηκαν, σχεδιάστηκε το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων ως το φορτίο θραύσεως.

Το σχήμα 7.20 είναι ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων έως τη θραύση του δοκιμίου, η οποία πραγματοποιήθηκε με ταχύτητα φορτίσεως 9,99 KN/sec.

Παρατηρείται ότι το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων είναι σχεδόν ευθύγραμμο μέχρι φορτίου ίσου με το 1/3 περίπου του φορτίου θραύσεως, μετά δε καμπυλώνεται έντονα. Μετά την υπέρβαση των 2/3 φορτίου θραύσεως η ταχύτητα αύξησε των παραμορφώσεων είναι παρά πολύ μεγάλη, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην ταχύτερη διάδοση ρωγμών, η αύξηση του ανοίγματος των οποίων μπορεί να καταγράφεται από τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα ως ένδειξη παραμόρφωσης.

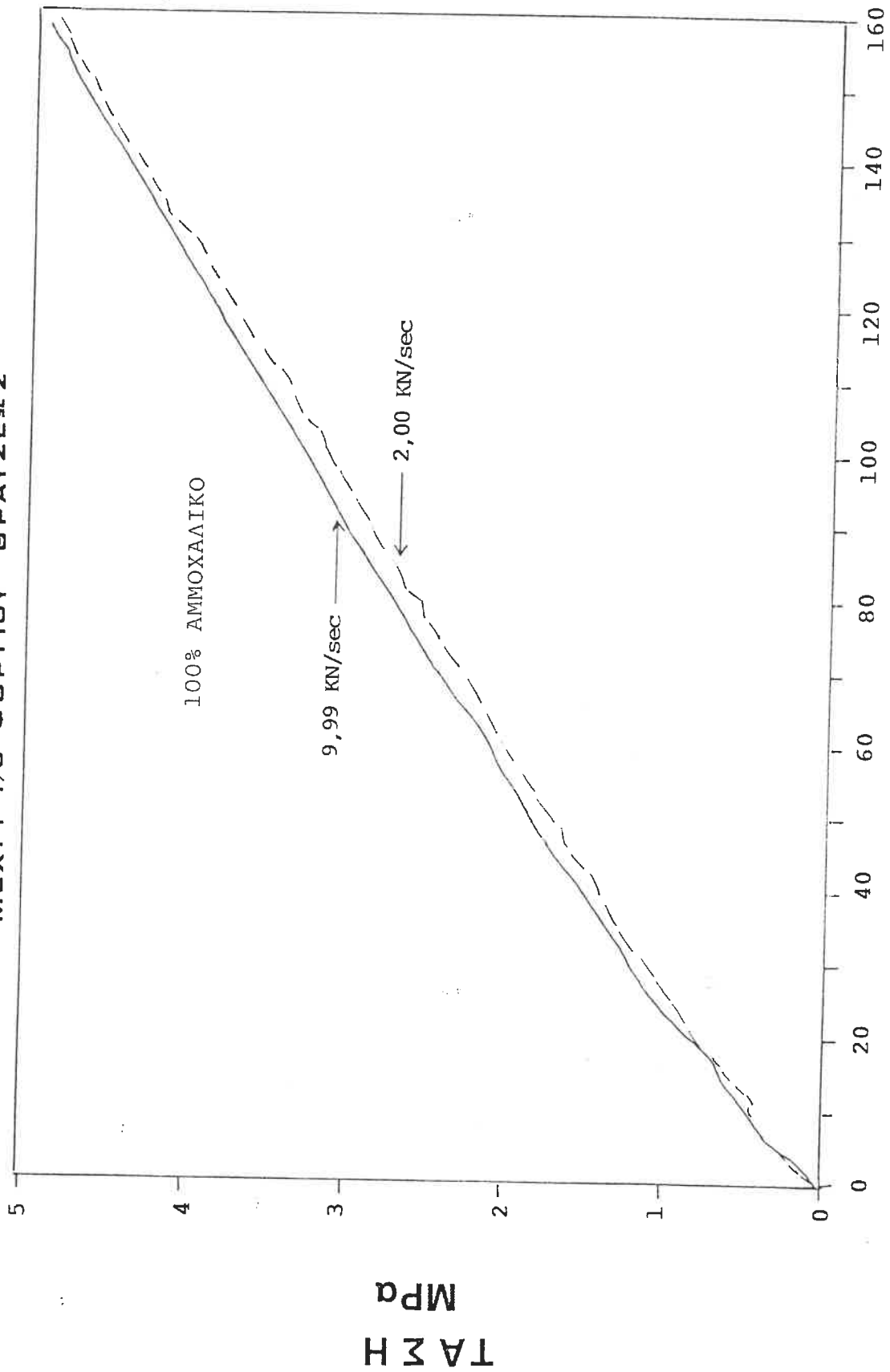
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



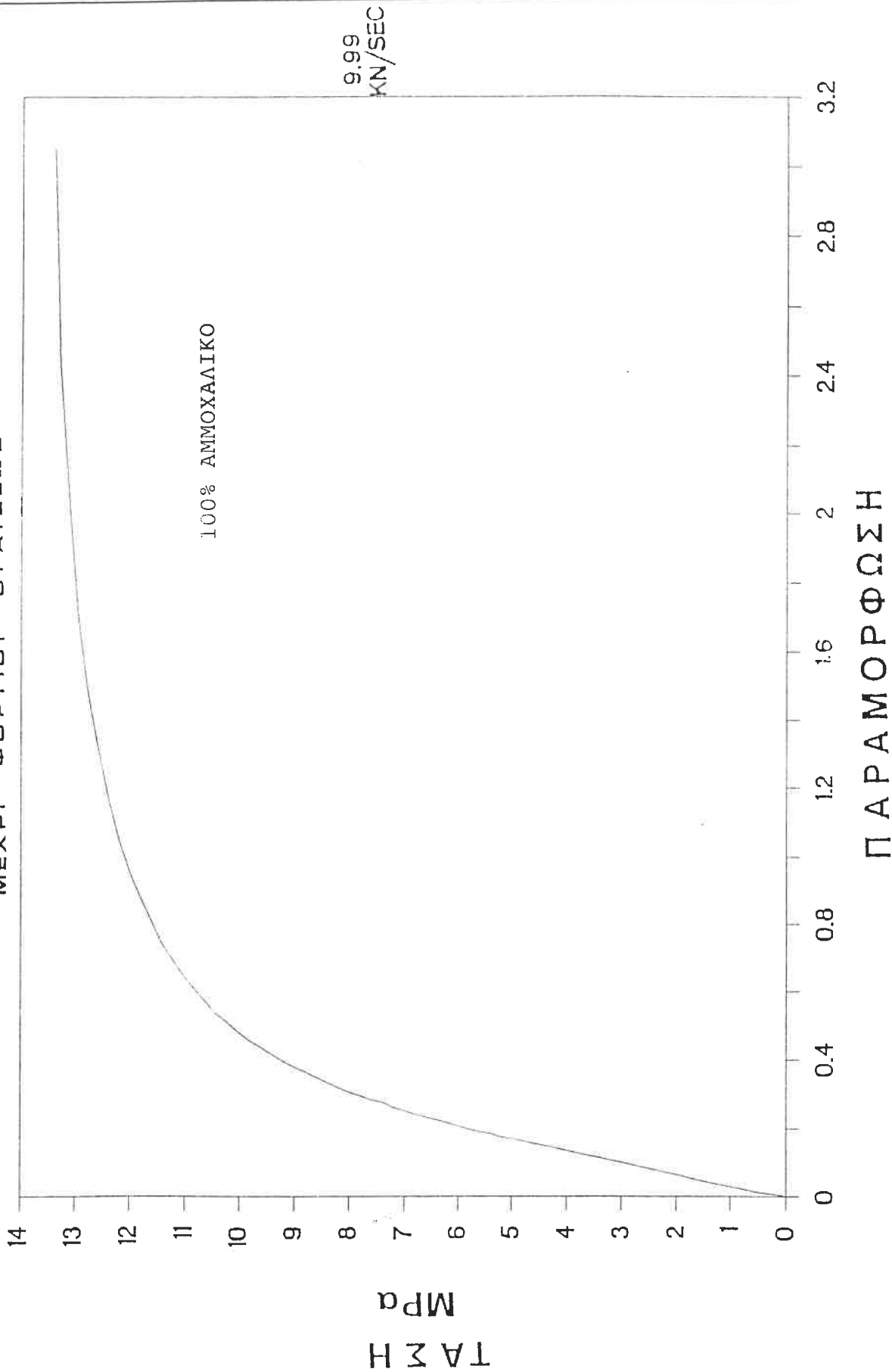
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

$\times 10^{-6}$

ΣΧ. 7.19

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

ΜΕΧΡΙ ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



$\times 10^{-3}$
ΣΧ. 7.20

7.7.1.2. Κατηγορία 100% ασφαλικό υλικό

Στο σχήμα 7.23 παριστάνονται τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων δύο διαφορετικών δοκιμίων, αποτελούμενα από 100% ασφαλικό υλικό. Οι διαφορές που παρουσιάζουν είναι πολύ μικρές, οπότε επιλέγεται ένα δοκίμιο για να μελετηθεί η συμπεριφορά αυτής της κατηγορίας.

Στο σχήμα 7.21 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, το οποίο δεν παρουσιάζει την ευθυγραμμία που συναντήσαμε στα δοκίμια που αποτελούνται από 100% αμμοχάλικο.

Οι απότομες αλλαγές που παρουσιάζονται στην αρχή μέχρι την τάση 0,1 MPa δεν θεωρούνται αξιοσημείωτες, διότι η τιμή της τάσης και της παραμόρφωσης είναι πολύ μικρή και η ακρίβεια των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων σε τόσο μικρές τιμές δεν είναι απόλυτη.

Όταν όμως η τάση φτάσει στην τιμή 0,4 MPa (τιμή που παρατηρείται σε όλα τα δοκίμια), στο διάγραμμα παρατηρούμε μια καμπύλωση, που σημαίνει ότι ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων γίνεται πιο γρήγορος γεγονός όμως, που όπως φαίνεται, δεν κρατάει πολύ, διότι όταν η τάση γίνεται περίπου 0,7 MPa, η κλίση της καμπύλης επανέρχεται στην αρχική της μορφή.

Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται ως εξής : Οι κόκκοι των

αδρανών περιβάλλονται πλήρως ή εν μέρει από ένα λεπτό στρώμα ασφάλτου.

Όταν το δοκίμιο είναι αφόρτιστο οι κόκκοι δεν έρχονται σε άμεση επαφή. Με την επιβολή όμως εξωτερικών πιέσεων οι κόκκοι τείνουν να έρθουν σε επαφή και οι δυνάμεις αναλαμβάνονται αρχικά από την λεπτή ασφαλτική στρώση, η οποία μη έχοντας μεγάλη αντοχή, αστοχεί στην τιμή περίπου 0,4 MPa και παρουσιάζονται μικρομετακινήσεις μεταξύ των κόκκων που έρχονται πλέον σε άμεση επαφή. Αυτές οι μικρομετακινήσεις καταγράφονται ως καμπύλωση του διαγράμματος στην περιοχή που αναφέρθηκε.

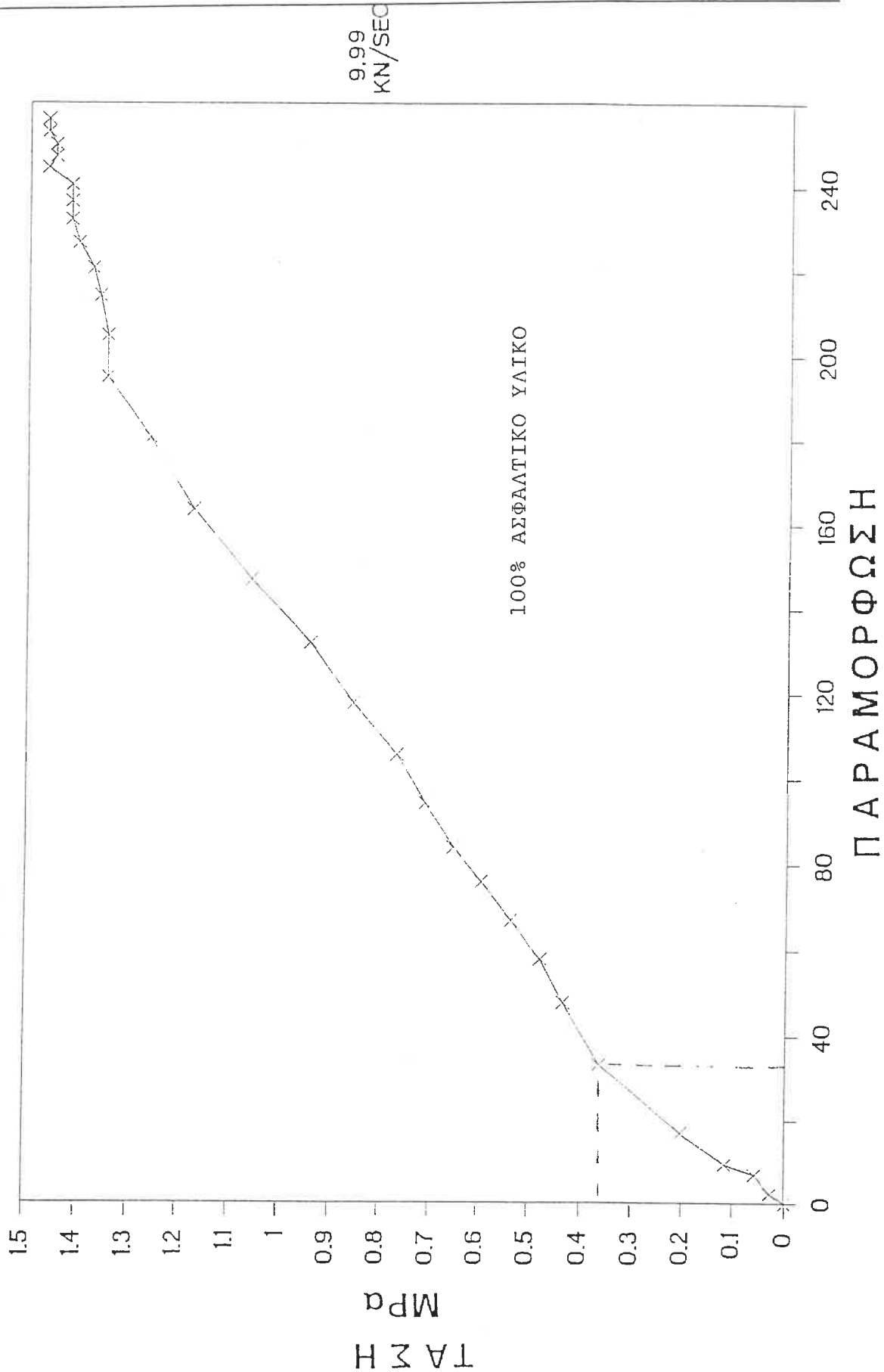
Μια άλλη ενδιαφέρουσα περιοχή του διαγράμματος παρουσιάζεται στην περιοχή που η τάση ξεπερνάει την τιμή $1,2 \div 1,3$ MPa. Παρατηρούμε μεγάλη καμπύλωση του διαγράμματος, δηλ. μεγάλη άνοδο του ρυθμού αύξησης των παραμορφώσεων, γεγονός το οποίο ερμηνεύεται ως εξής :

Όπως είδαμε προηγουμένως αφού "αστοχήσει" η λεπτή ασφαλτική στρώση, οι κόκκοι των αδρανών έρχονται σε άμεση επαφή και οι εξωτερικές τάσεις αναλαμβάνονται απευθείας από αυτούς. Όταν όμως μεγαλώσουν αρκετά οι εξωτερικές πιέσεις οι δυνάμεις τριβής δεν μπορούν να αναλάβουν την εξωτερική φόρτιση, όπως επίσης εμφανίζονται και οι πρώτες αστοχίες των δεσμών που έχουν αναπτυχθεί από τη δράση του τσιμέντου, και πραγματοποιείται ρηγμάτωση και μικροολίσθηση των κόκκων. Οι μικροολισθήσεις καταγράφονται ως καμπύλωση στην αναφερθείσα

περιοχή του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων.

Στο σχήμα 7.22 παριστάνεται το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων ενός δοκιμίου στο οποίο επιβλήθηκε η φόρτιση με δύο διαφορετικές ταχύτητες. Η κλίση του διαγράμματος είναι πιο ήπια όταν η ταχύτητα φόρτισης είναι 2 KN/sec από την κλίση του διαγράμματος στην περίπτωση της ταχύτητας 9,99 KN/sec.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΜΕΧΡΙ 1/3 ΘΩΡΙΣΤΙΟΥ ΒΡΑΥΣΕΩΣ



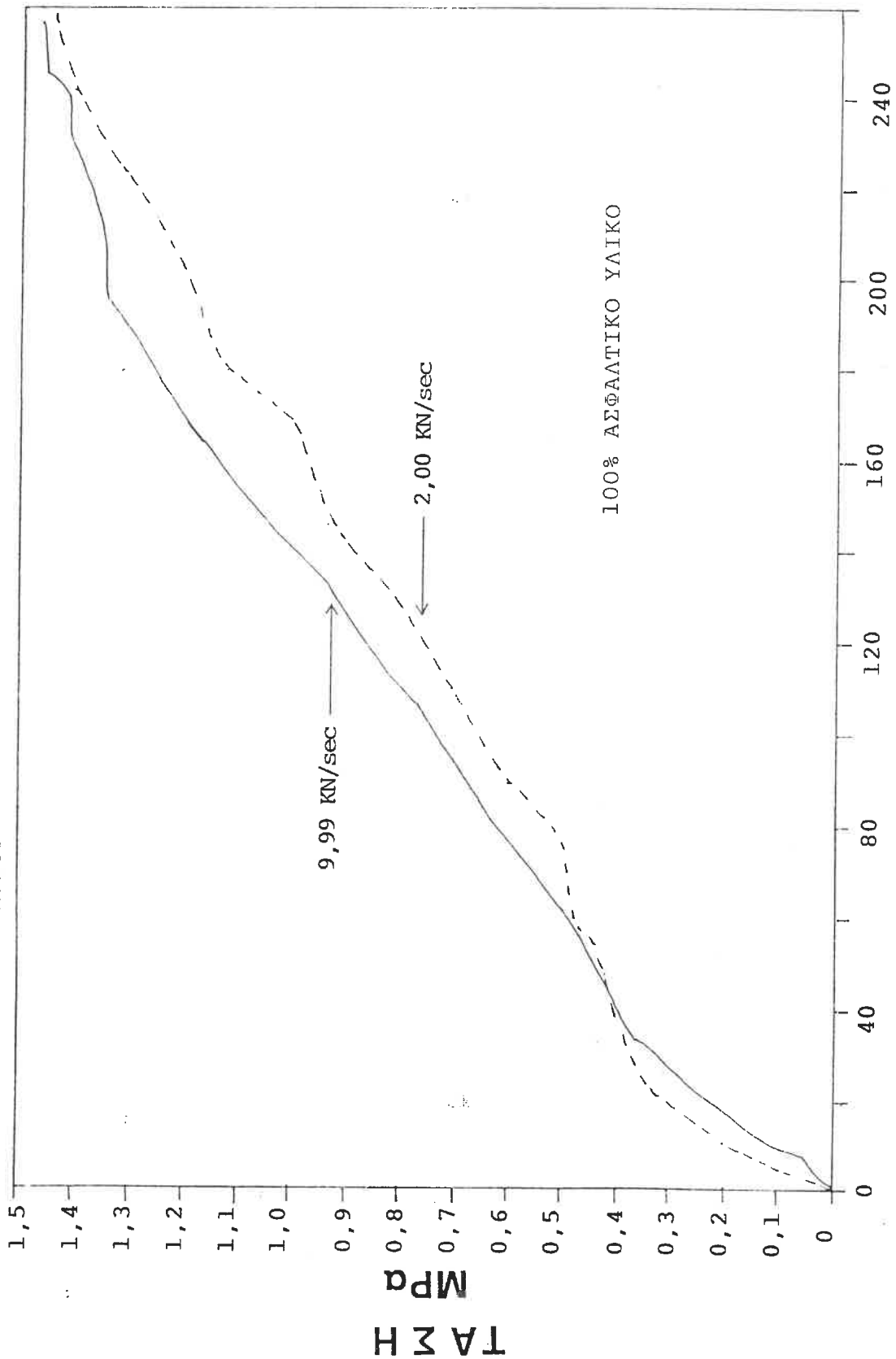
9.99
KN/SEC

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

* 10⁻⁶
ΣΧ. 7.21

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ

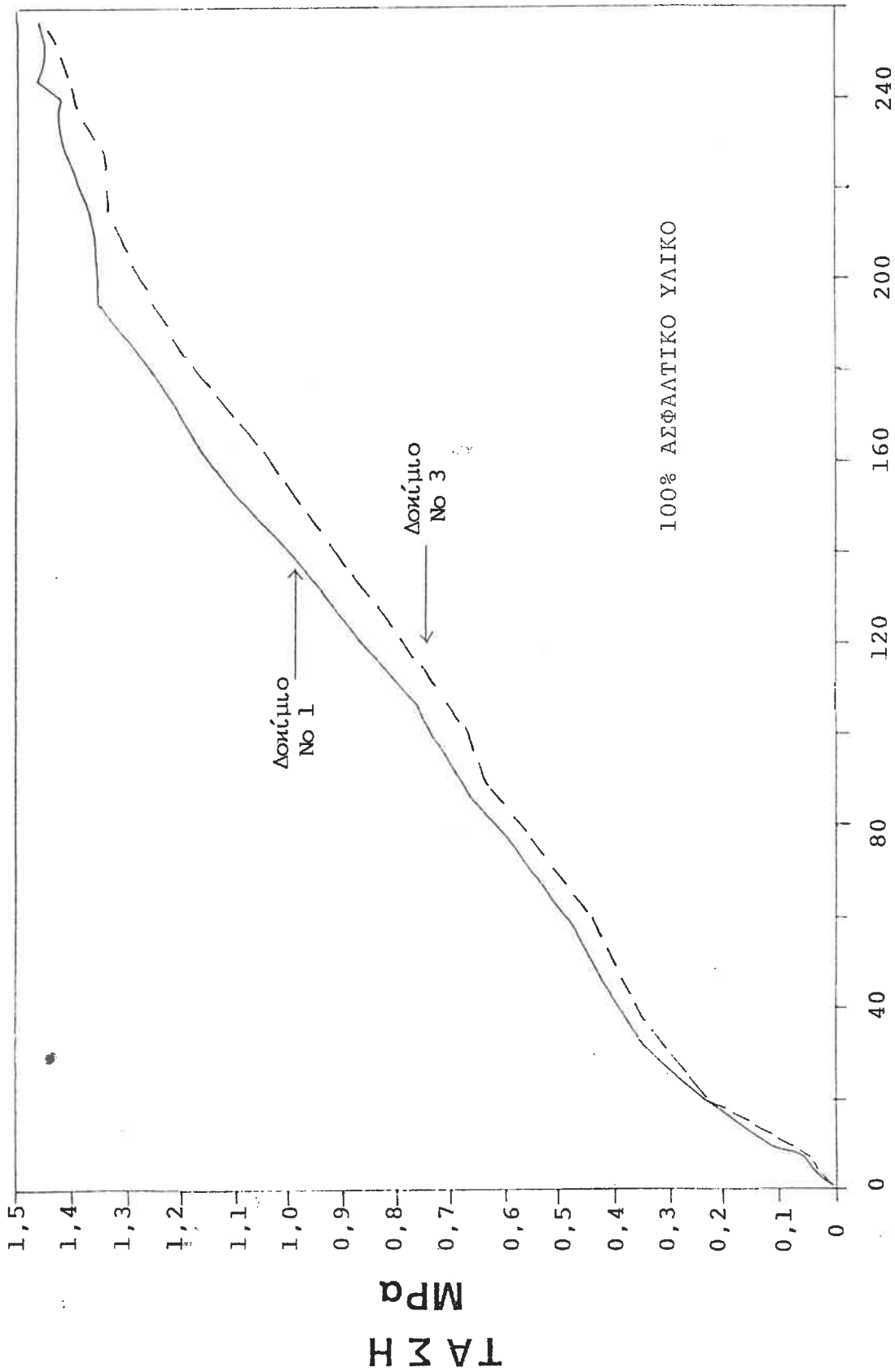


ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

$\times 10^{-6}$

ΣΧ. 7.22

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

*** 10⁻⁶**

ΣΧ. 7.23

7.7.1.3. Κατηγορία 25% Ασφαλτικό υλικό - 75% Αμμοχάλικο

Εξετάζονται τρία δοκίμια, των οποίων τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων φαίνονται στο σχήμα 7.24. Παρατηρείται αρκετά σημαντική διαφορά στις τρεις καμπύλες, των οποίων όμως τα χαρακτηριστικά σημεία παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ομοιομορφία.

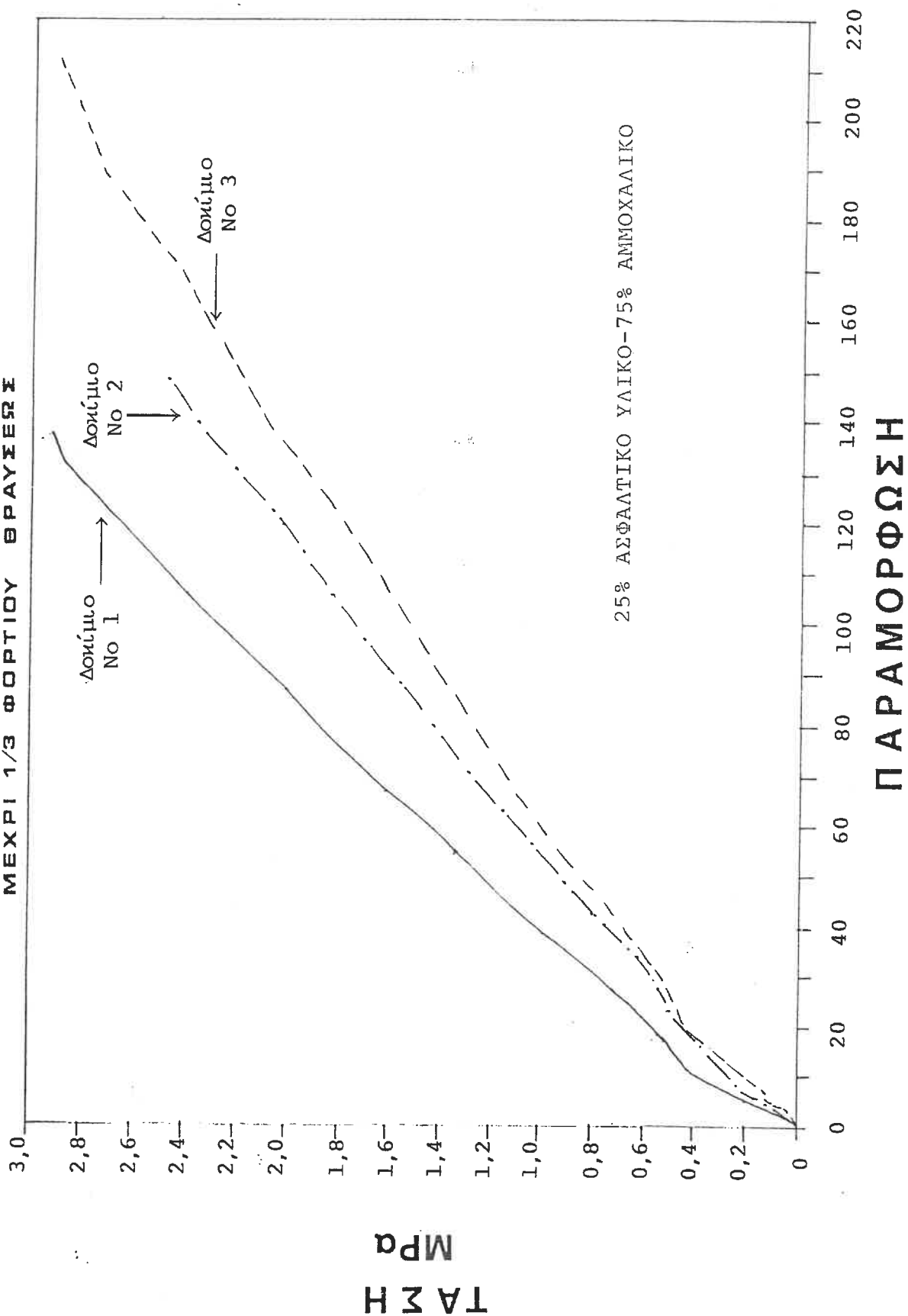
Επιλέγεται το διάγραμμα του σχήματος 7.25 ως αντιπροσωπευτικό της εξεταζόμενης κατηγορίας. Στην περιοχή που αντιστοιχεί στην τάση $\approx 0,5$ MPa παρατηρείται μια αλλαγή της κλίσης του διαγράμματος, όπως και στην περίπτωση της κατηγορίας 100% ασφαλτικό υλικό. Το φαινόμενο αυτό ερμηνεύεται με τον ίδιο τρόπο, μόνο που εδώ η έκτασή του, είναι μικρότερη λόγω του μικρού ποσοστού του ασφαλτικού υλικού.

Επίσης η παρατηρείται μια ανεπαίσθητη αλλαγή της κλίσης στην περιοχή τάσης 2,8 MPa που αντιστοιχεί σε μικρή άνοδο του ρυθμού αύξησης των παραμορφώσεων, που ερμηνεύεται ως μικροολισθήσεις μεταξύ των κόκκων. (όπως περιγράφηκε στην § 7.7.1.2.)

Στο σχήμα 7.26 παριστάνεται το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων στο ίδιο δοκίμιο για δύο ταχύτητες 2,0 KN/sec και 9,99 KN/sec. Όπως φαίνεται οι καμπύλες δεν διαφέρουν πολύ, σημειώνεται όμως ότι η καμπύλη της αργής φόρτισης, στο μεγαλύτερο μέρος της, είναι ελαφρώς μικρότερης κλίσης της καμπύλης της γρήγορης φόρτισης.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

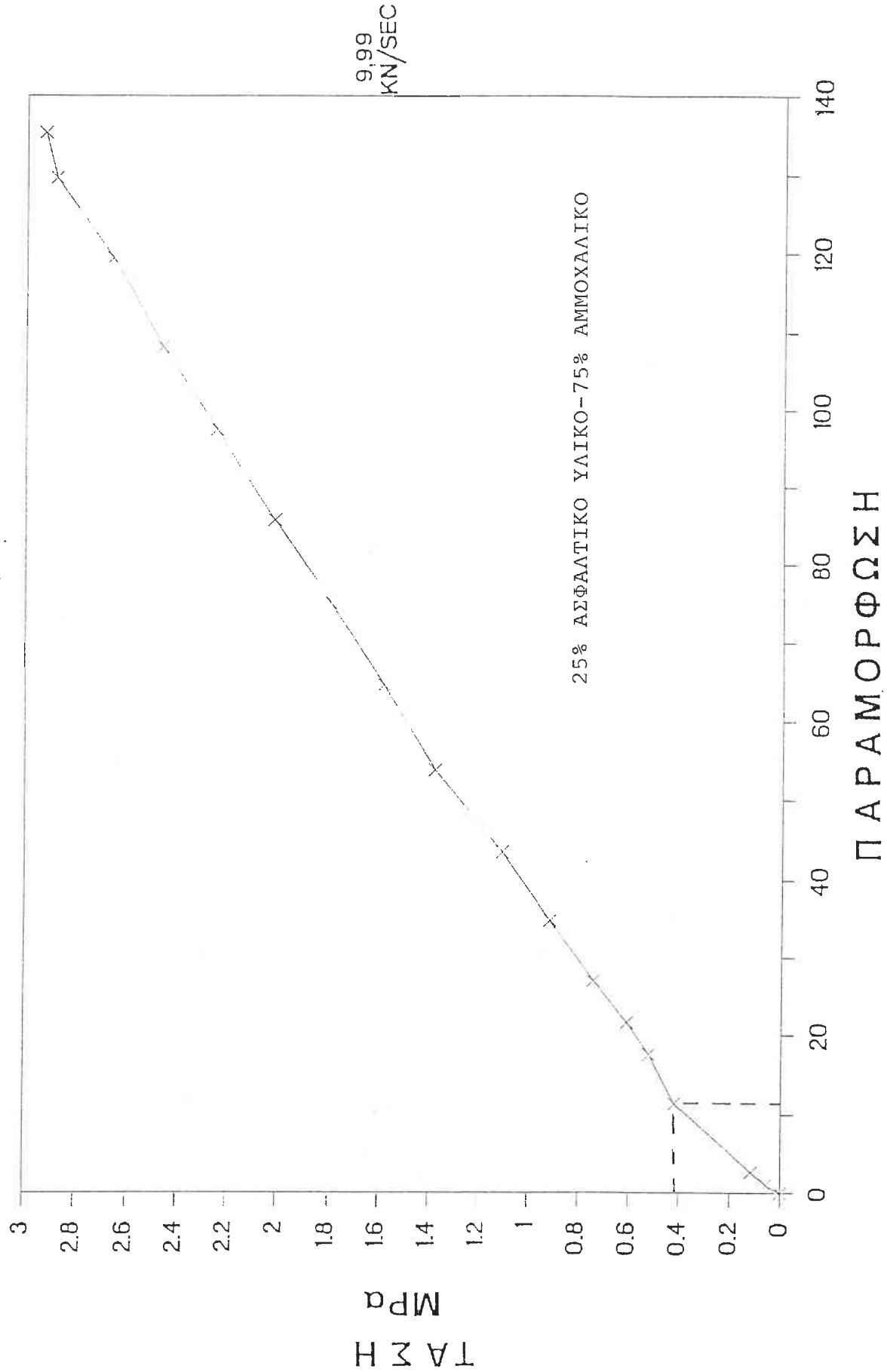
ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



$\times 10^{-6}$

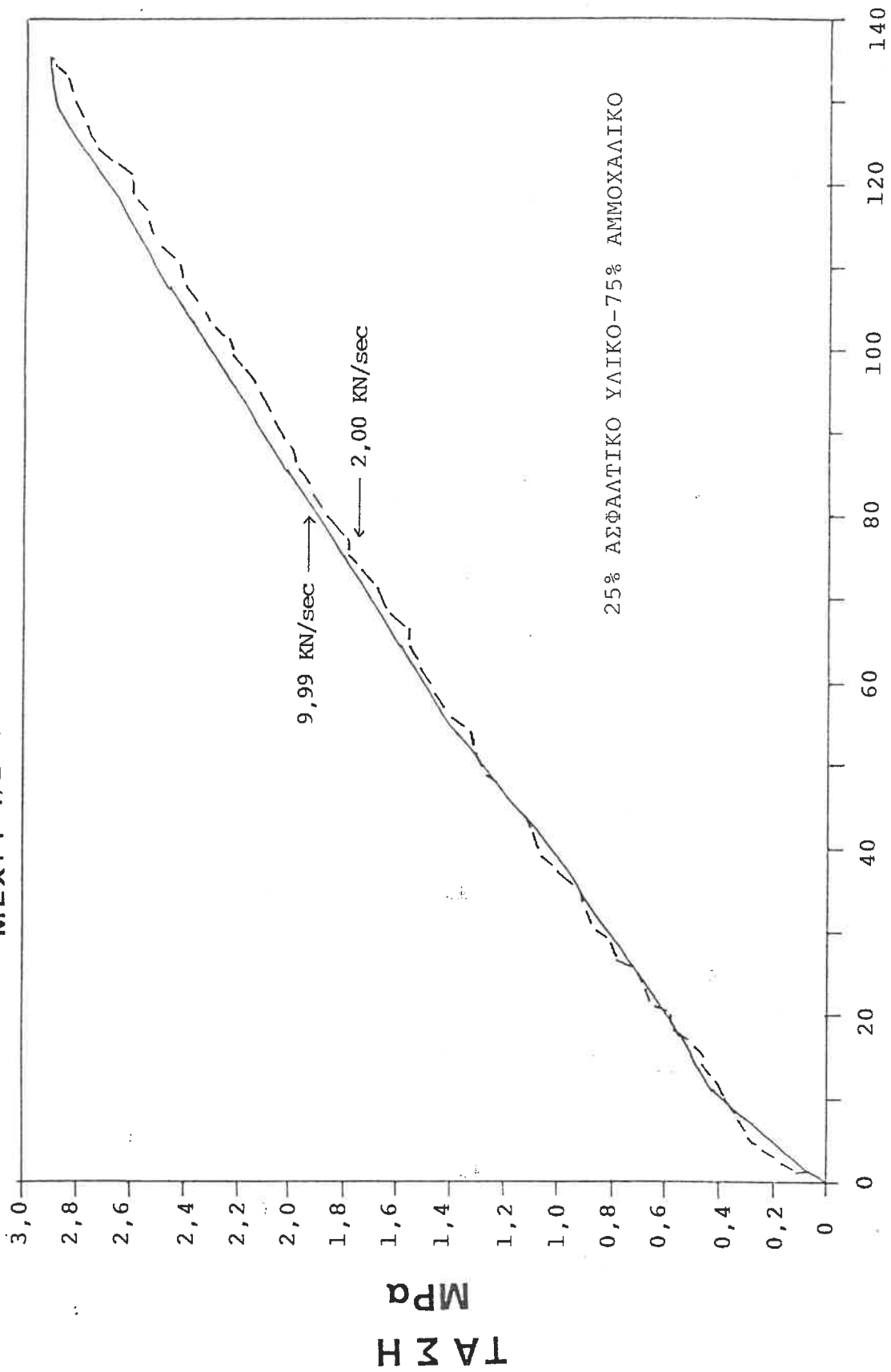
Σχ. 7.24

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΜΕΧΡΙ 1/3 ΘΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



* 10⁻⁶
ΣΧ. 7.25

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

* 10⁻⁶

ΣΧ. 7.26

7.7.1.4. Κατηγορία 50% Ασφαλτικό υλικό - 50% Αμμοχάλικο

Η εξέταση της συμπεριφοράς δύο πρισματικών δοκιμίων μας έδωσε τις δύο καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων που φαίνονται στο σχήμα 7.27 , στο οποίο δεν παρατηρείται αξιοσημείωτη διαφορά στη συμπεριφορά των δύο δοκιμίων.

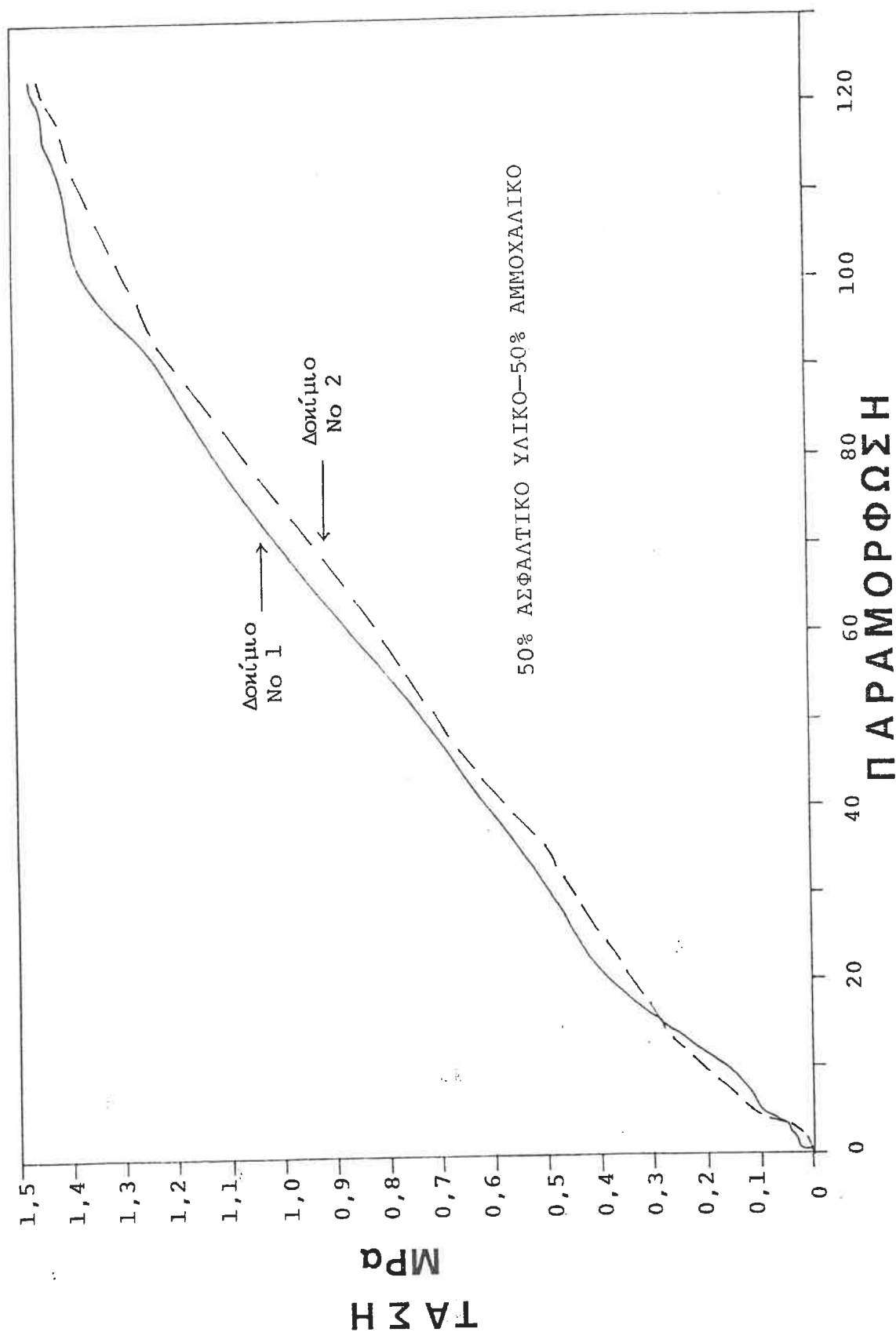
Στο σχήμα 7.28 παριστάνεται η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων ενός δοκιμίου της εξεταζόμενης κατηγορίας. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι κι εδώ είναι φανερή η καμπύλωση του διαγράμματος στην περιοχή που η τάση παίρνει την τιμή 0,4 MPa φαινόμενο το οποίο πιθανόν οφείλεται στην παρουσία ασφάλτου, όπως ερμηνεύθηκε στις προηγούμενες παραγράφους.

Η δεύτερη αξιοσημείωτη περιοχή του διαγράμματος είναι όταν οι τιμές της τάσης γίνουν $1,4 \div 1,5$ MPa. Παρατηρείται και σε αυτή την κατηγορία καμπύλωση, η οποία πιθανόν να οφείλεται σε μικροαστοχίες των δεσμών που αναπτύσσονται παρουσία του τσιμέντου, που έχουν αποτέλεσμα ρηγματώσεις και μικροολισθήσεις των κόκκων.

Στο σχήμα 7.29 φαίνεται η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων που έγινε στο ίδιο δοκίμιο όταν αυτό φορτίστηκε με δύο διαφορετικές ταχύτητες : των 9,99 KN/sec και των 2 KN/sec. Παρατηρείται σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών, φαινόμενο που παρατηρήθηκε και στις προηγούμενες περιπτώσεις, όχι όμως σε τόσο μεγάλο βαθμό, γεγονός που προξενεί ανησυχίες και απαιτεί οπωσδήποτε περαιτέρω έρευνα.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



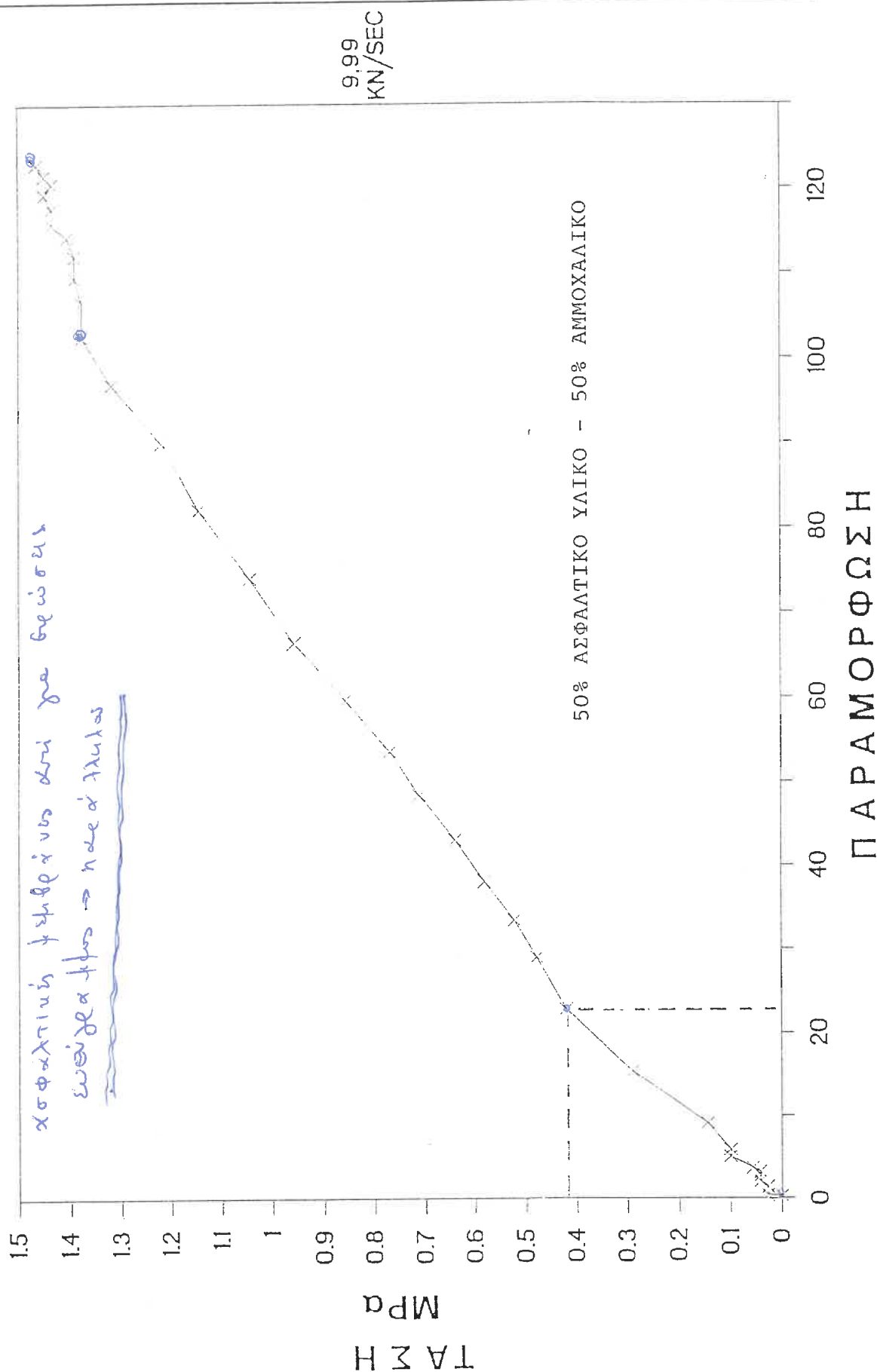
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

* 10⁻⁶

ΣΧ. 7.27

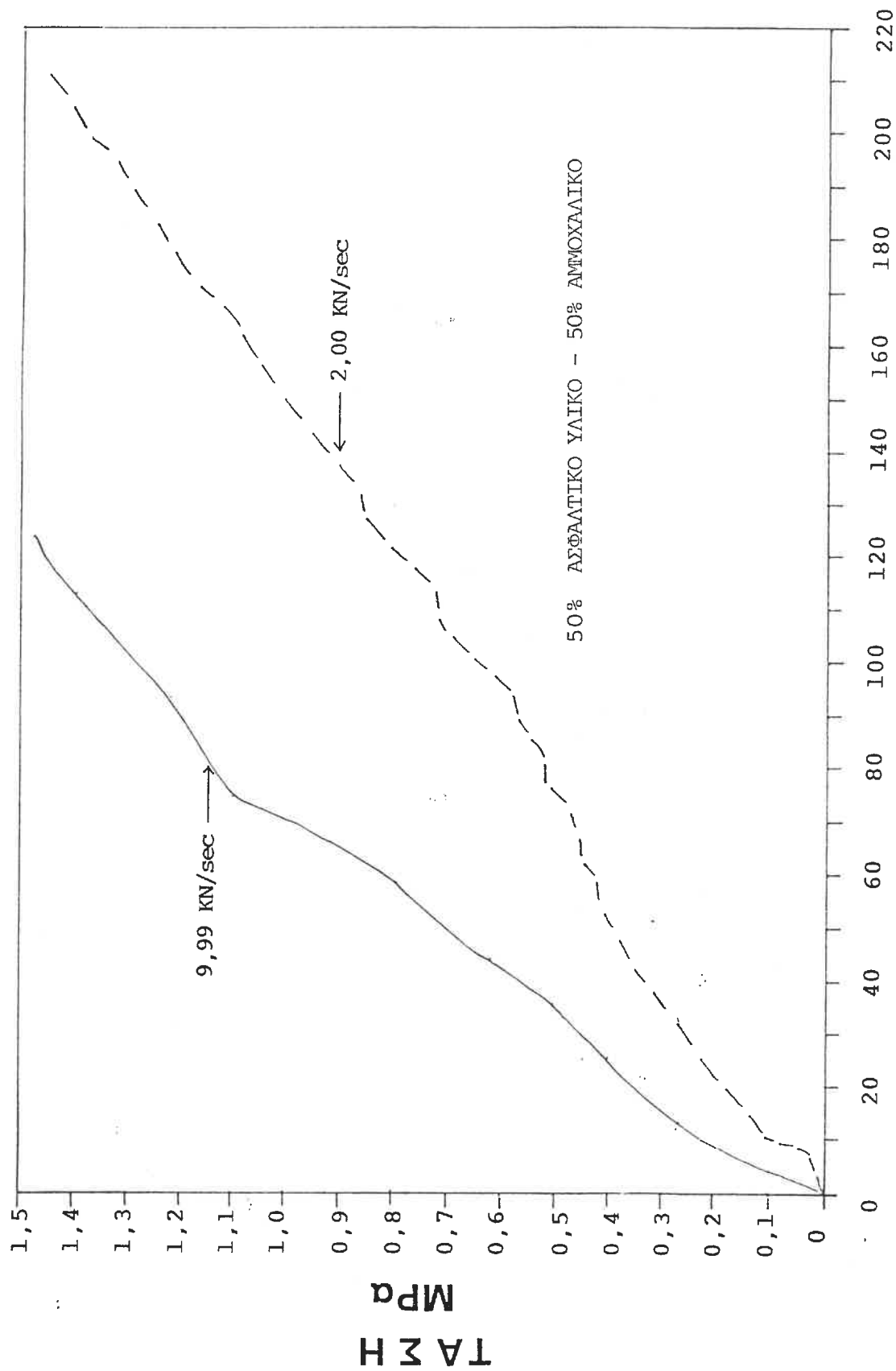
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



$\times 10^{-6}$

ΣΧ. 7.29

7.7.1.5. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων μέχρι θραύσεως

Στα σχήματα 7.30, 7.31, 7.32 παριστάνονται τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων μέχρι θραύσεως των δοκιμίων των κατηγοριών V, I, IV, αντίστοιχα.

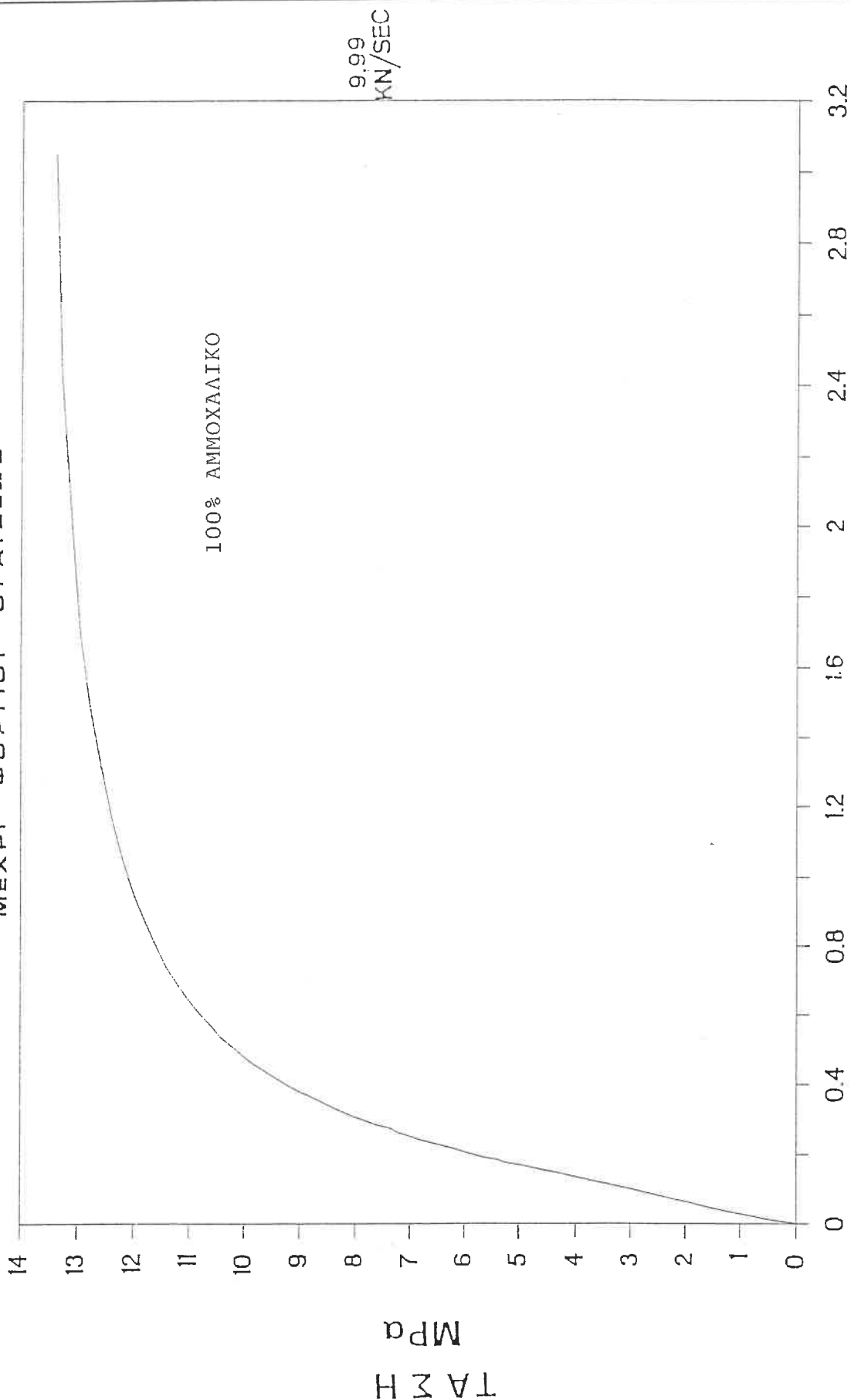
Στο σχήμα 7.33 τα παραπάνω διαγράμματα παριστάνονται όλα μαζί σε ένα σχήμα ώστε να μπορεί να γίνει η σύγκριση μεταξύ τους. Σε όλα τα διαγράμματα παρατηρείται ένας ευθύγραμμος σχεδόν κλάδος μέχρι περίπου το $1/3$ του αντίστοιχου φορτίου θραύσεως. Στη συνέχεια τα διαγράμματα καμπυλώνονται έντονα και μεγαλώνει ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων.

Οι μεγάλες διαφορές στην αντοχή οφείλονται στην ύπαρξη του ασφαλτικού υλικού, το οποίο περιβάλλει τους κόκκους και δεν επιτρέπει στο τσιμέντο να αναπτύξει τόσο ισχυρούς δεσμούς.

Στο σχήμα φαίνονται και οι διαφορές στα μέτρα ελαστικότητας, οι οποίες σχολιάζονται σε επόμενη παράγραφο.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

ΜΕΧΡΙ ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



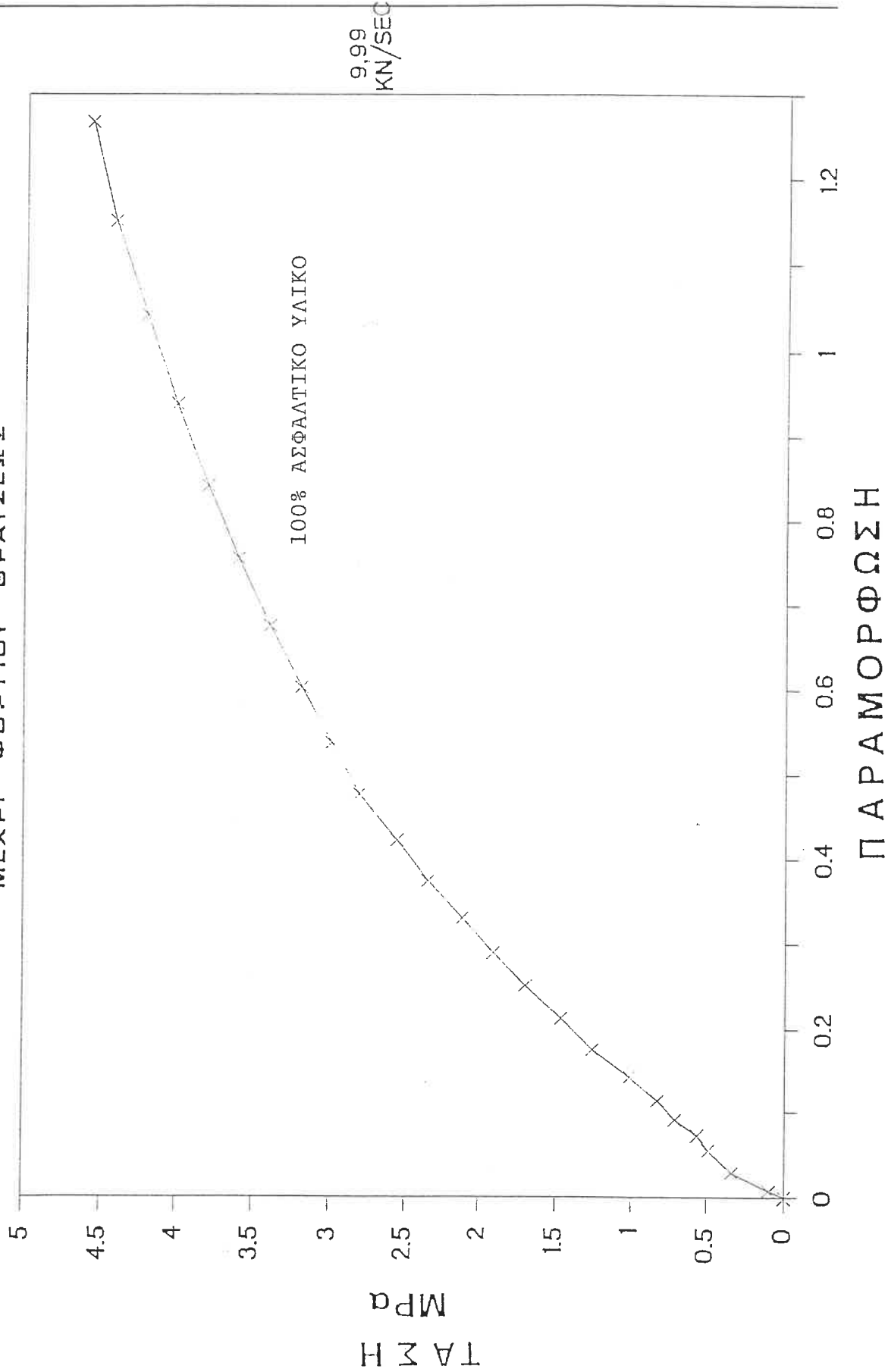
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

$\times 10^{-3}$
ΣΧ. 7.30

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

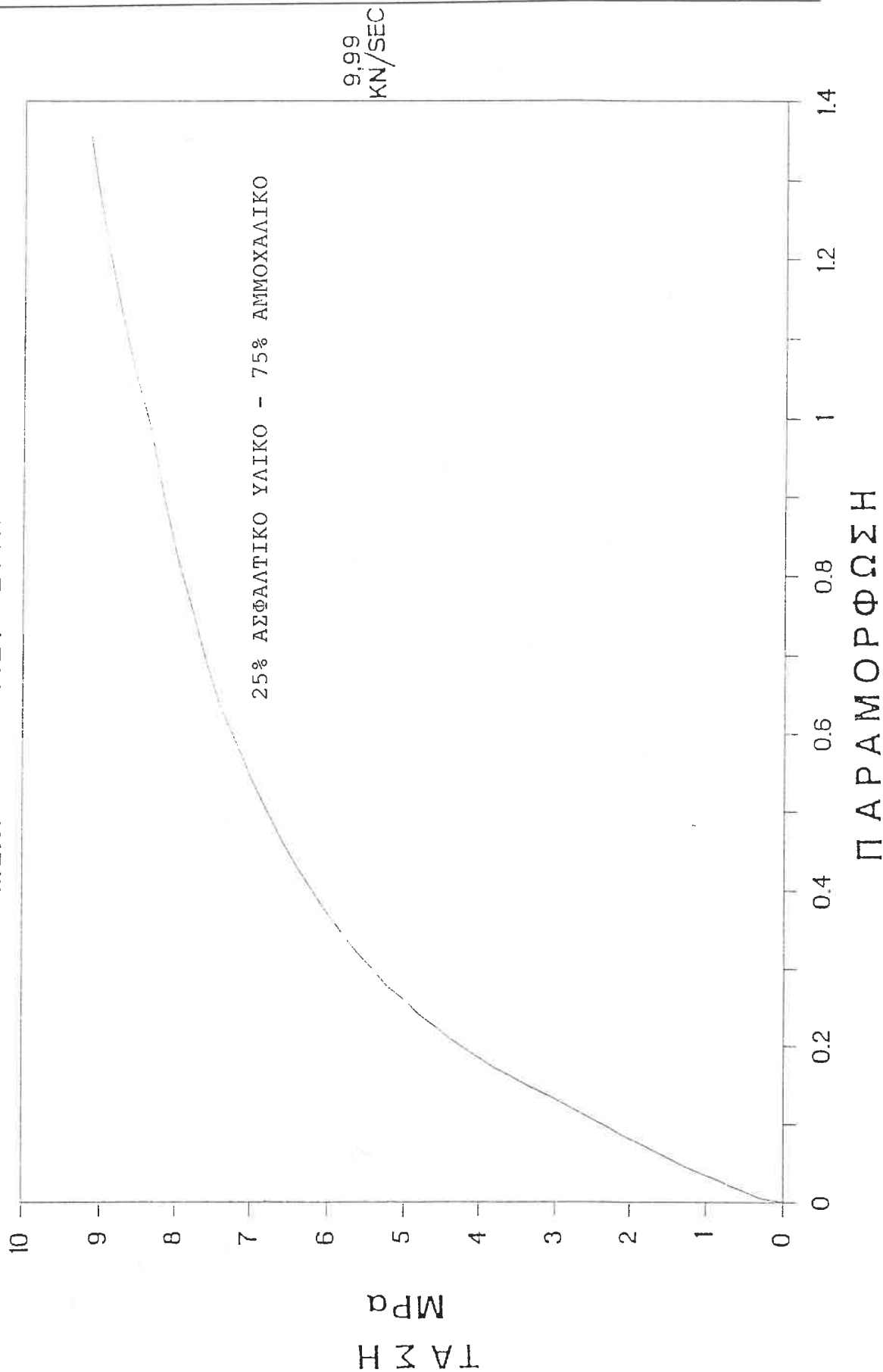
ΜΕΧΡΙ ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



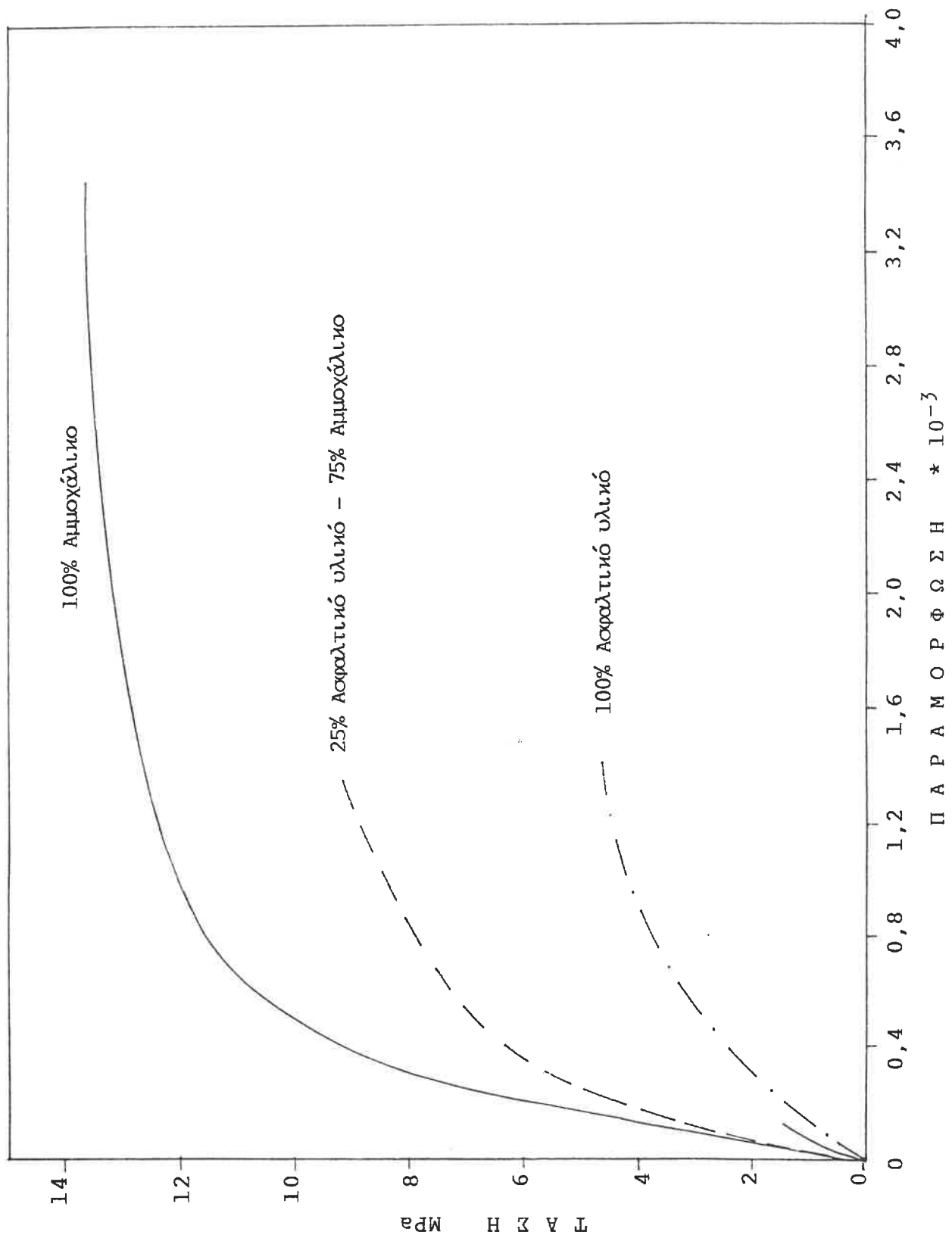
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

* 10⁻³
ΣΧ. 7.31

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΜΕΧΡΙ ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ



ΣΧ. 7.33

7.7.1.6. Σύγκριση-Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών συμπεραίνουμε ότι η σχέση είναι σχεδόν γραμμική μέχρι $1/3$ του φορτίου θραύσεως για την περίπτωση του καθαρού αμμοχάλικου.

Σε όλες όμως τις υπόλοιπες κατηγορίες που περιέχεται ασφαλτικό υλικό το διάγραμμα δεν παρουσιάζεται ευθύγραμμο αλλά εμφανίζονται πανομοιότυπες καμπυλώσεις, το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από το ποσοστό του περιεχομένου ασφαλτικού υλικού.

Η απότομη καμπύλωση εμφανίζεται σε μικρές σχετικά τιμές τάσεως ($0,4 \div 0,5$ MPa) και υποδηλώνει μεγαλύτερη αύξηση των παραμορφώσεων, που πιθανόν να οφείλεται σε αστοχία της λεπτής ασφαλτικής στρώσης που περιβάλλει εν μέρει τους κόκκους των αδρανών.

Η δεύτερη περιοχή που εμφανίζεται αλλαγή της κλίσης των διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεως σε όλες τις κατηγορίες αντιστοιχεί στην περιοχή των τάσεων περίπου του $1/3$ του αντίστοιχου φορτίου θραύσεως. Η ερμηνεία που μπορεί να δοθεί είναι ότι σ' αυτήν την περιοχή οι τάσεις είναι αρκετά μεγάλες, οπότε πραγματοποιούνται οι πρώτες αστοχίες των δεσμών που αναπτύσσονται μεταξύ των κόκκων λόγω του τσιμέντου, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται μικρές ρωγμές και μικροολισθήσεις μεταξύ των κόκκων, οι οποίες καταγράφονται από τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα ως ένδειξη παραμορφώσεως.

7.7.2. Μέτρο ελαστικότητας

Σε όλα τα δοκίμια, στα οποία έγιναν μετρήσεις και σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων, απεικονίστηκε επίσης το μέτρο ελαστικότητας σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη τάση. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται ως το πηλίκο της επιβαλλόμενης κάθε στιγμή τάσης προς τη συνολική προκαλούμενη παραμόρφωση και αντιστοιχεί στο "τέμνον" μέτρο ελαστικότητας όπως ορίζεται στην § 4.2.

Εγιναν μετρήσεις και σχεδιάστηκαν διαγράμματα ως το 1/3 του φορτίου θραύσεως για δύο διαφορετικές ταχύτητες φόρτισης και σε ορισμένα δοκίμια μετρήθηκαν τιμές μέχρι το φορτίο θραύσεως.

7.7.2.1. Κατηγορία 100% Αμμοχάλικο

Στο σχήμα 7.34 παριστάνεται το διάγραμμα του μέτρου ελαστικότητας σε συνάρτηση με την τάση. Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας (τάξεως 50 ± 60 GPa) που αντιστοιχούν σε μικρές τιμές της τάσεως έχουν πολύ μικρή αξιοπιστία διότι τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα δεν έχουν απόλυτη ακρίβεια που απαιτείται για να καταγραφούν τόσο μικρές παραμορφώσεις. Οι απότομες μεταβολές επίσης που παρατηρούνται στο διάγραμμα δεν λαμβάνονται υπόψη, διότι οφείλονται σε μικρές ασάφειες των μηχανοσυστημάτων.

Η γενική μορφή όμως του διαγράμματος μας δείχνει ότι στην αρχή της επιβολής της φόρτισης, στην περιοχή των μικρών τάσεων, το μέτρο ελαστικότητας είναι μεγαλύτερο από ότι στη συνέχεια. Παρόλο που δεν είναι ακριβή τα αποτελέσματα μας η τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι της ίδιας τάξης με το ηλεκτροδυναμικό μέτρο, το οποίο, όπως είδαμε στην § 4.5.1., στηρίζεται στην μέθοδο της ιδιοσυχνότητας, στην οποία η επιβαλλόμενη τάση έχει πολύ μικρή τιμή.

Στο σχήμα 7.35 παριστάνονται τα διαγράμματα μέτρου ελαστικότητας-τάσεως του ίδιου δοκιμίου, για δύο διαφορετικές ταχύτητες φόρτισης. Είναι φανερό ότι στην αργή φόρτιση το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνει χαμηλότερες τιμές.

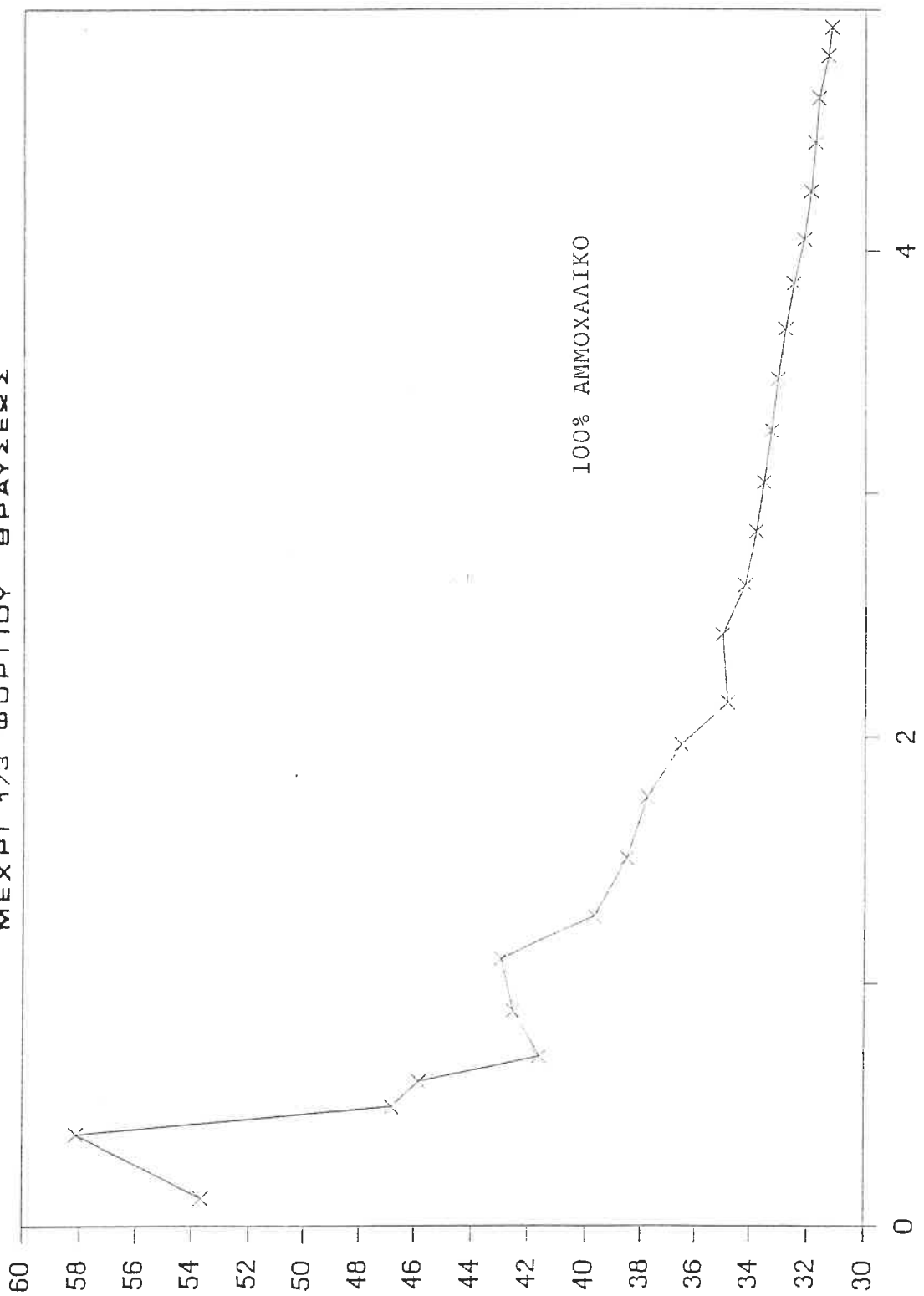
Στο σχήμα 7.36 φαίνεται το διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας τάσεως μέχρι θραύσεως. Παρατηρείται μια σταθερότητα στις τιμές του μέτρου έως περίπου το $1/3$ του φορτίου θραύσεως και στη συνέχεια μια ταχύτατη πτώση που οφείλεται στις μη ελαστικές παραμορφώσεις και στην διάδοση των ρωγμών σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου.

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

GPa

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΤΑΣΕΩΣ

ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



100% ΑΜΟΡΦΑΛΙΚΟ

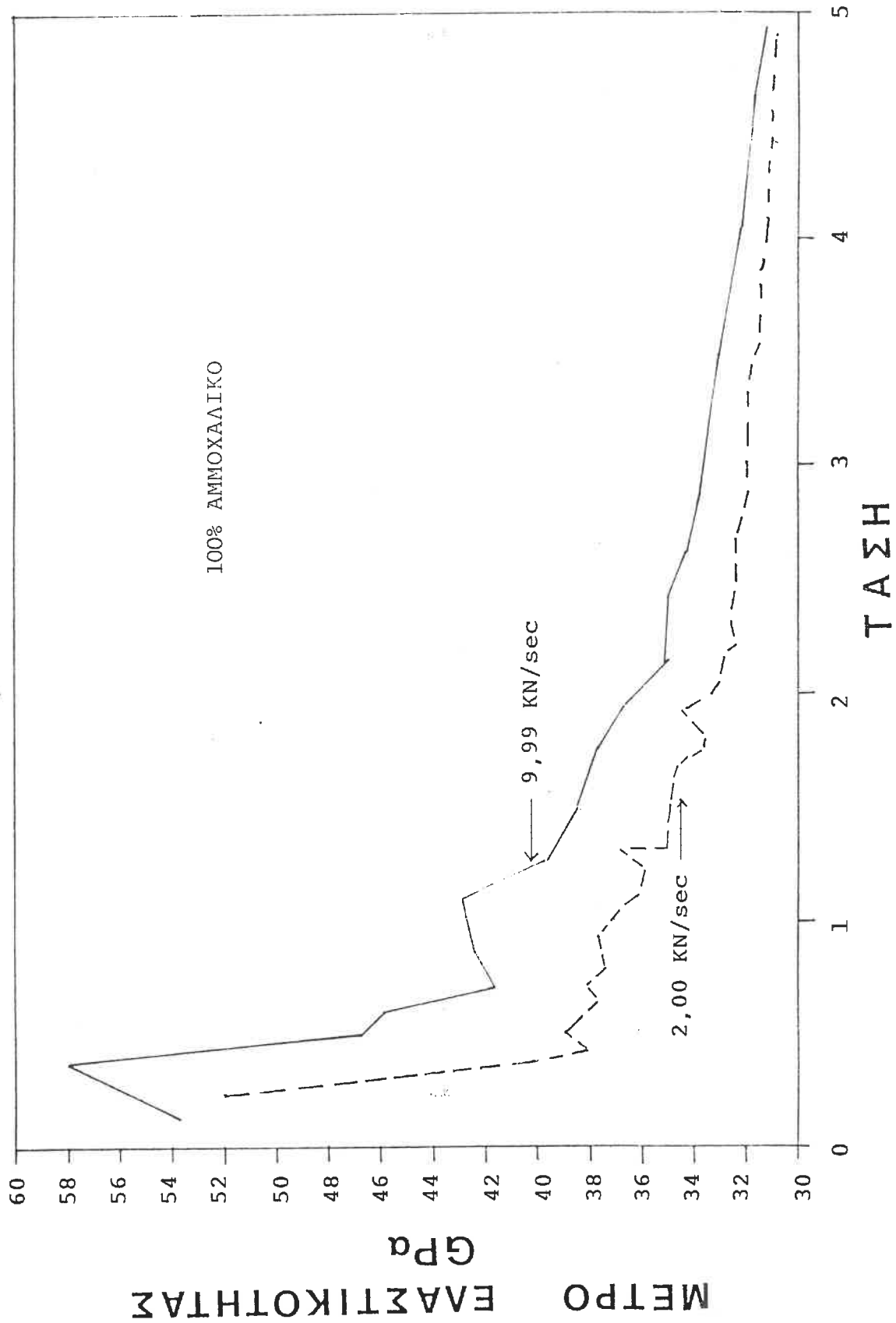
9,99
KN/SEC

Τ Α Σ Η

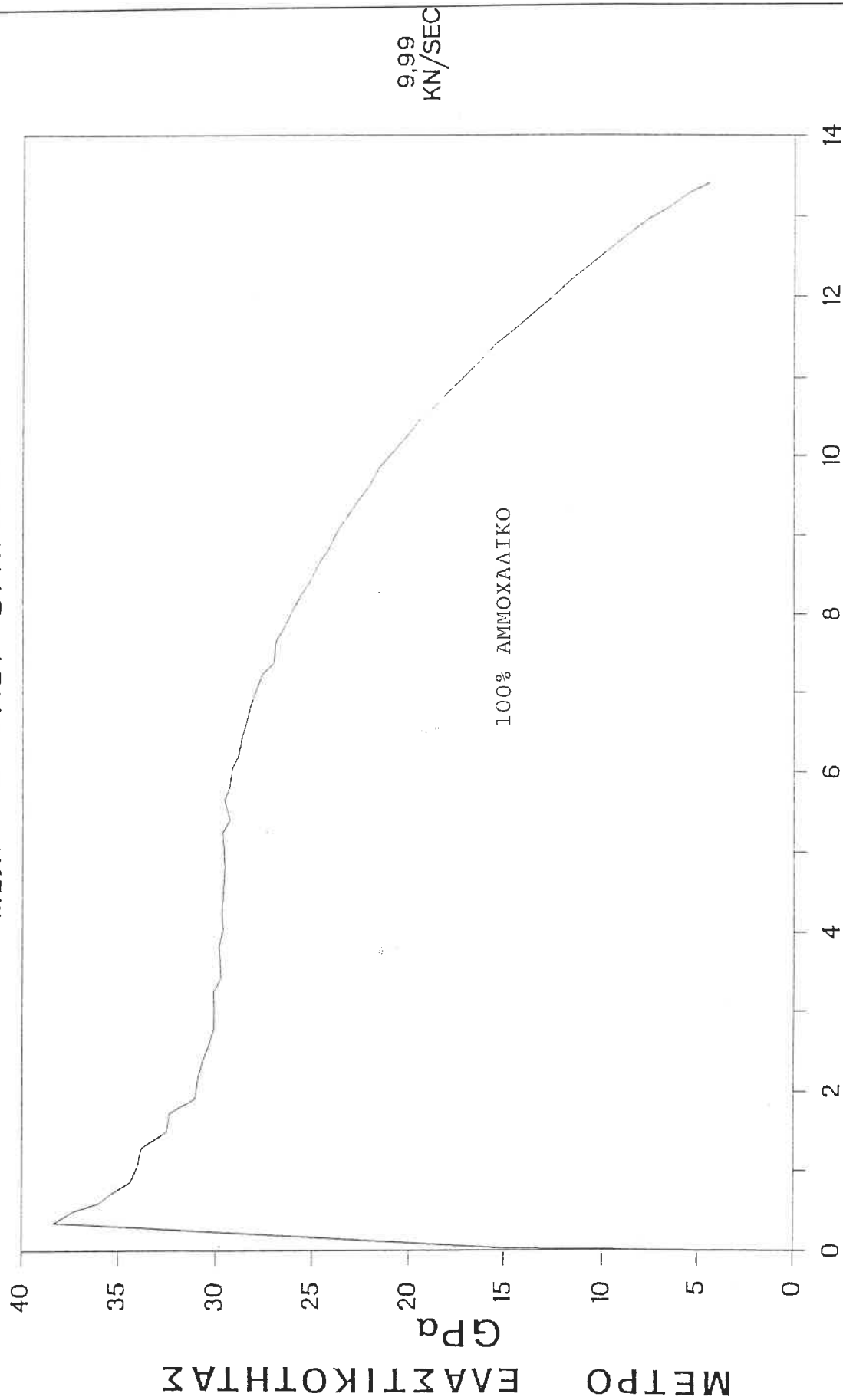
MPa

ΣΧ. 7.34

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΤΑΣΕΩΣ
ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΤΑΣΕΩΣ ΜΕΧΡΙ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



Τ Α Σ Η

ΜΡα

ΣΧ. 7.36

7.7.2.2. Κατηγορία 100% Ασφαλτικό υλικό

Στο σχήμα 7.37 παριστάνεται το διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας-τάσεως για 100% ασφαλτικό υλικό. Αν εξαιρεθούν οι αρχικές τιμές στις οποίες υπάρχει χαμηλός βαθμός αξιοπιστίας, το διάγραμμα παρουσιάζει μια ομοιομορφία, χωρίς όμως να είναι απολύτως σταθερό. Αυτό οφείλεται στον όχι σταθερό ρυθμό αυξήσεως των παραμορφώσεων, κάτι που φαίνεται και από την καμπυλότητα του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων.

Στο σχήμα 7.38 απεικονίζονται τα διαγράμματα μέτρου ελαστικότητας-τάσεως του ίδιου δοκιμίου για δύο ταχύτητες φορτίσεως. Παρόλες τις διακυμάνσεις είναι φανερό ότι το μέτρο ελαστικότητας είναι μεγαλύτερο στην ταχύτερη φόρτιση.

Στο σχήμα 7.39 εικονίζεται το διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας-τάσεως μέχρι τη θραύση του δοκιμίου, στο οποίο φαίνεται ο σταθερός ρυθμός της ελάττωσης των τιμών του μέτρου ελαστικότητας.

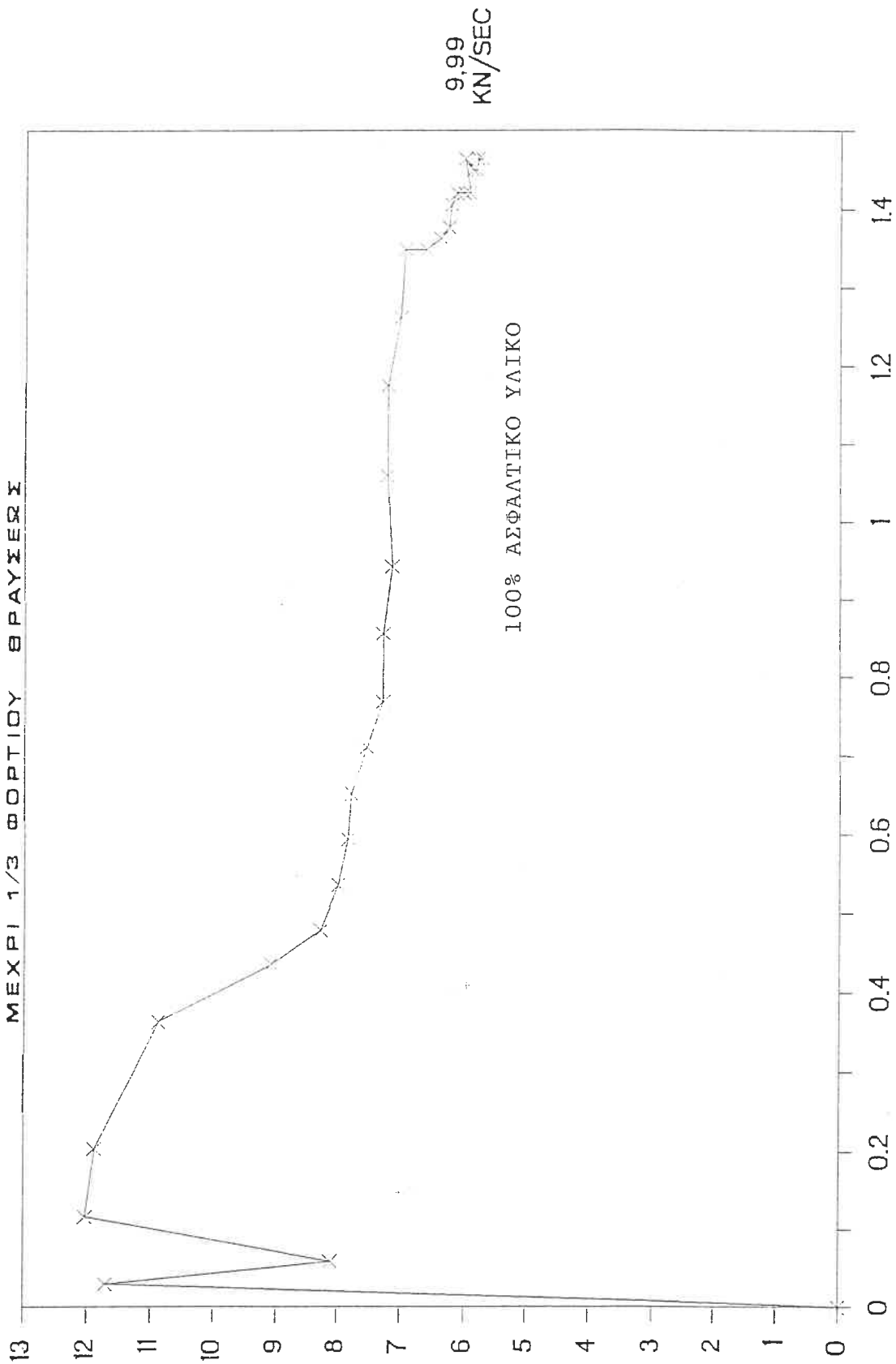
Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η φόρτιση μέχρι το $1/3$ του φορτίου θραύσεως για το 100% ασφαλτικό υλικό διήρκησε περίπου 1 sec με την ταχύτητα 9,99 KN/sec, μπορούμε να προσομοιάσουμε την δυναμική φόρτιση συχνότητας 1 Hz και να συγκρίνουμε το μέτρο ελαστικότητας του υλικού που διαθέτουμε με το μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος σε συχνότητα 1 Hz. Στο σχήμα 7.39β, βλέπουμε ότι για θερμοκρασία 20 °C και συχνότητα 1 Hz, το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος είναι 3 GPa, το οποίο είναι πολύ μικρότερο από το μέτρο ελαστικότητας του υλικού που εξετάσαμε.

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

GPa

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΤΑΣΕΩΣ

ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



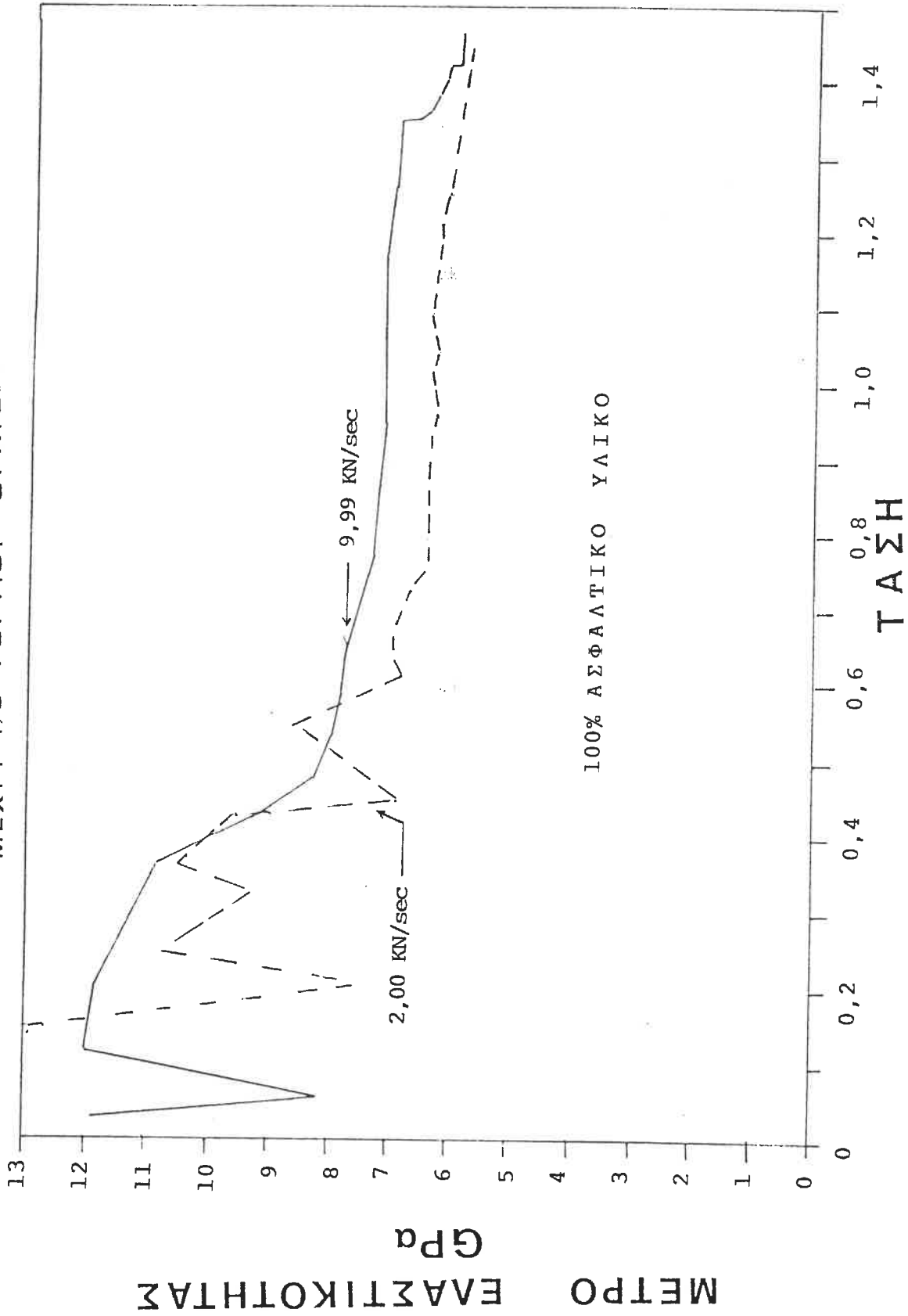
ΤΑΣΗ

MPa

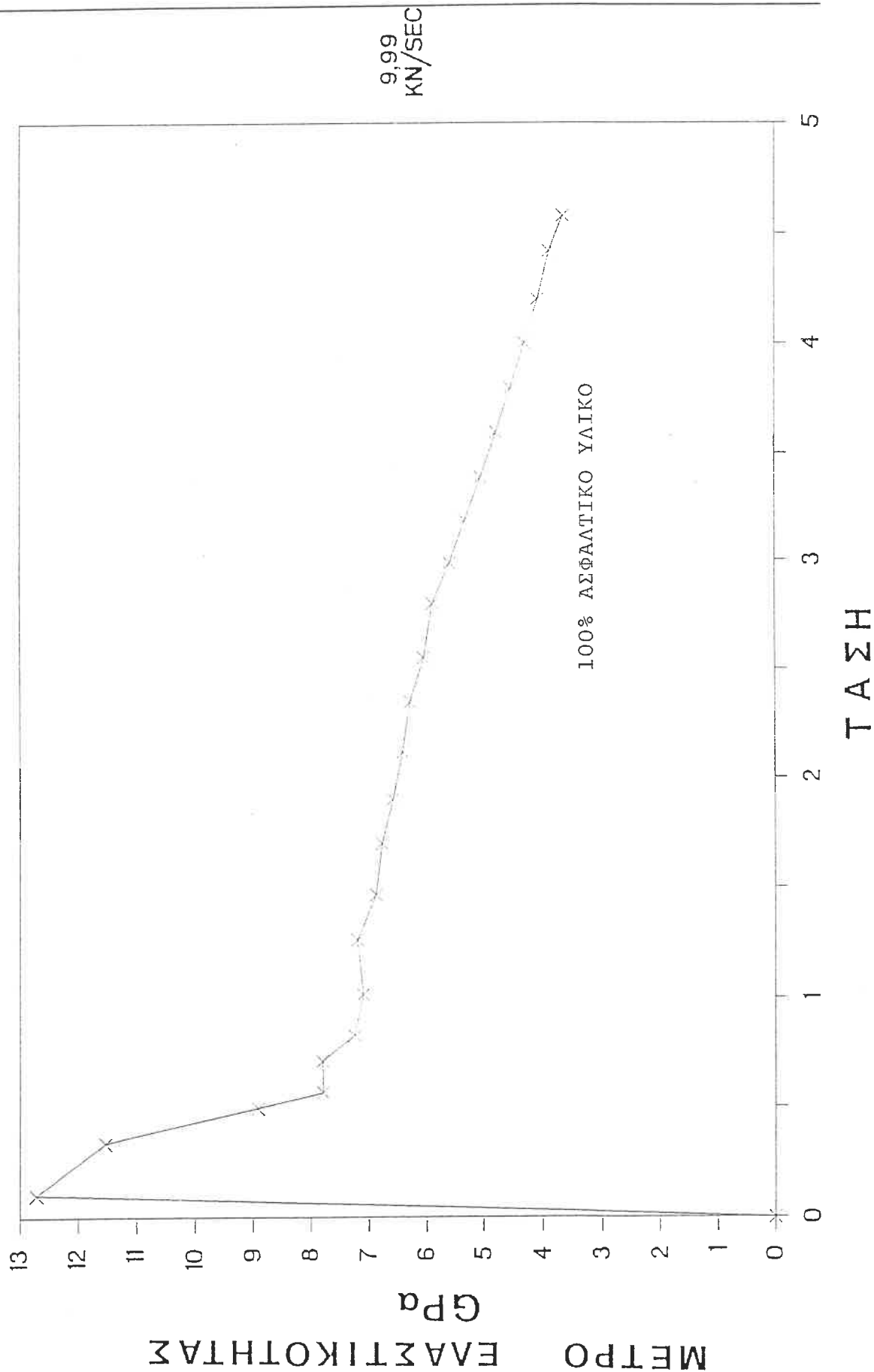
ΣΧ. 7.37

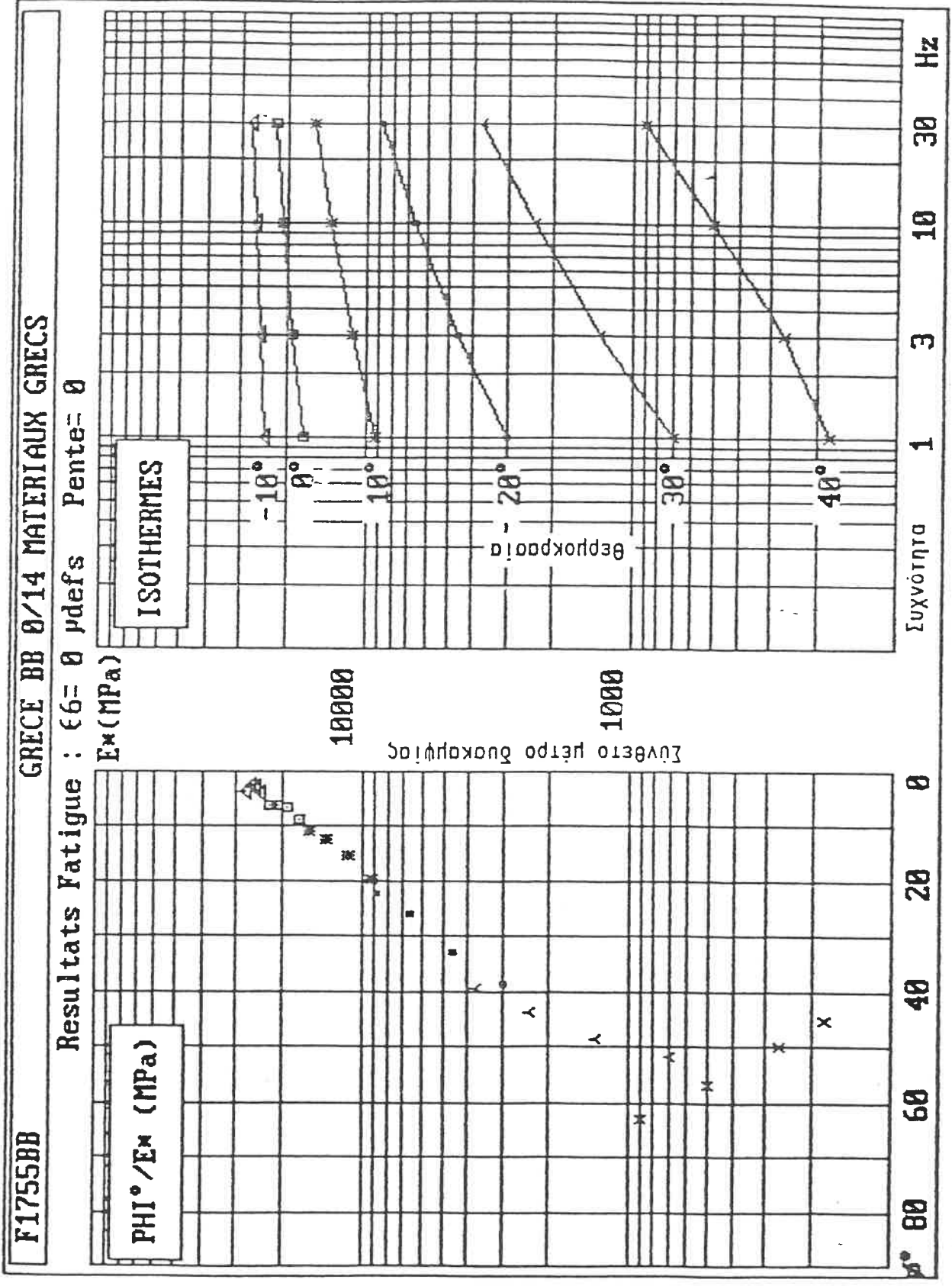
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΤΑΣΕΩΣ

ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΤΑΣΕΩΣ ΜΕΧΡΙ ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ





ΣΧ. 7.39β Αποτελέσματα μετρήσεων σύνθετου μέτρου δυσκαμψία ασφαλτομίγματος με ελληνικά ασβεστολιθικά αδρανή και άσφαλτο κρατικού διυλιστηρίου [6]

7.7.2.3. Κατηγορία 25% Ασφαλτικό υλικό - 75% Αμμοχάλικο

Στο σχήμα 7.40 παριστάνεται το διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας-τάσεως. Παρουσιάζεται αρκετά μεγάλη σταθερότητα στις τιμές του μέτρου για πολύ ευρύ πεδίο τάσεων. Αυτό οφείλεται στο μικρό ποσοστό του περιεχομένου ασφαλτικού υλικού, οπότε το υλικό συμπεριφέρεται με παραπλήσιο τρόπο με το καθαρό αμμοχάλικο.

Στο σχήμα 7.41 φαίνεται η πτώση των τιμών του μέτρου ελαστικότητας όταν η ταχύτητα φόρτισης είναι 2,00 KN/sec σε σχέση με τις τιμές του μέτρου όταν η ταχύτητα είναι 9,99 KN/sec.

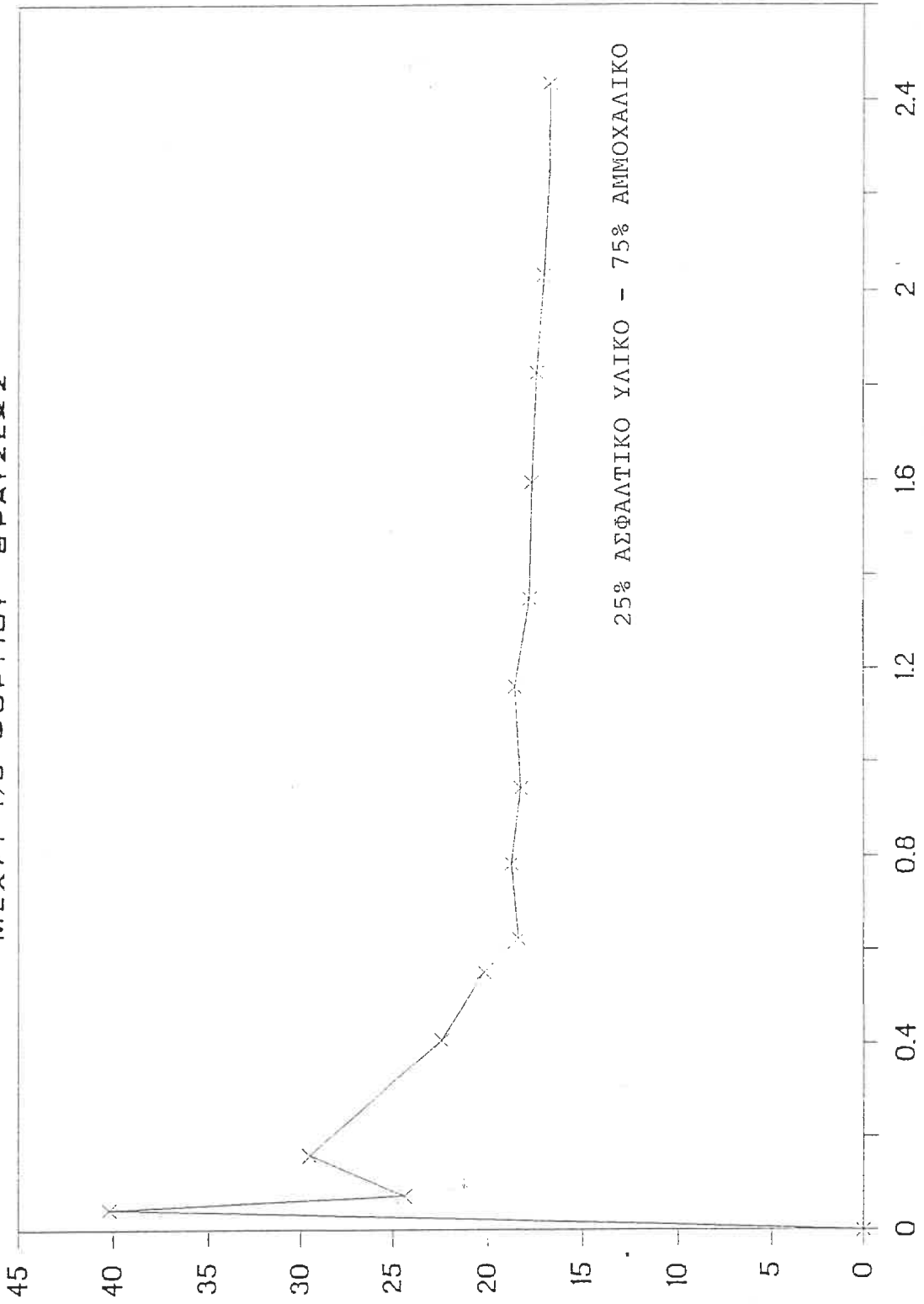
Στο σχήμα 7.42 παριστάνεται η πτώση των τιμών του μέτρου ελαστικότητας σε συνάρτηση με το φορτίο. Στην περιοχή θραύσης μάλιστα, οι τιμές του έχουν πέσει στο ήμισυ των αρχικών.

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

GPa

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΤΑΣΕΩΣ

ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



ΤΑΣΗ

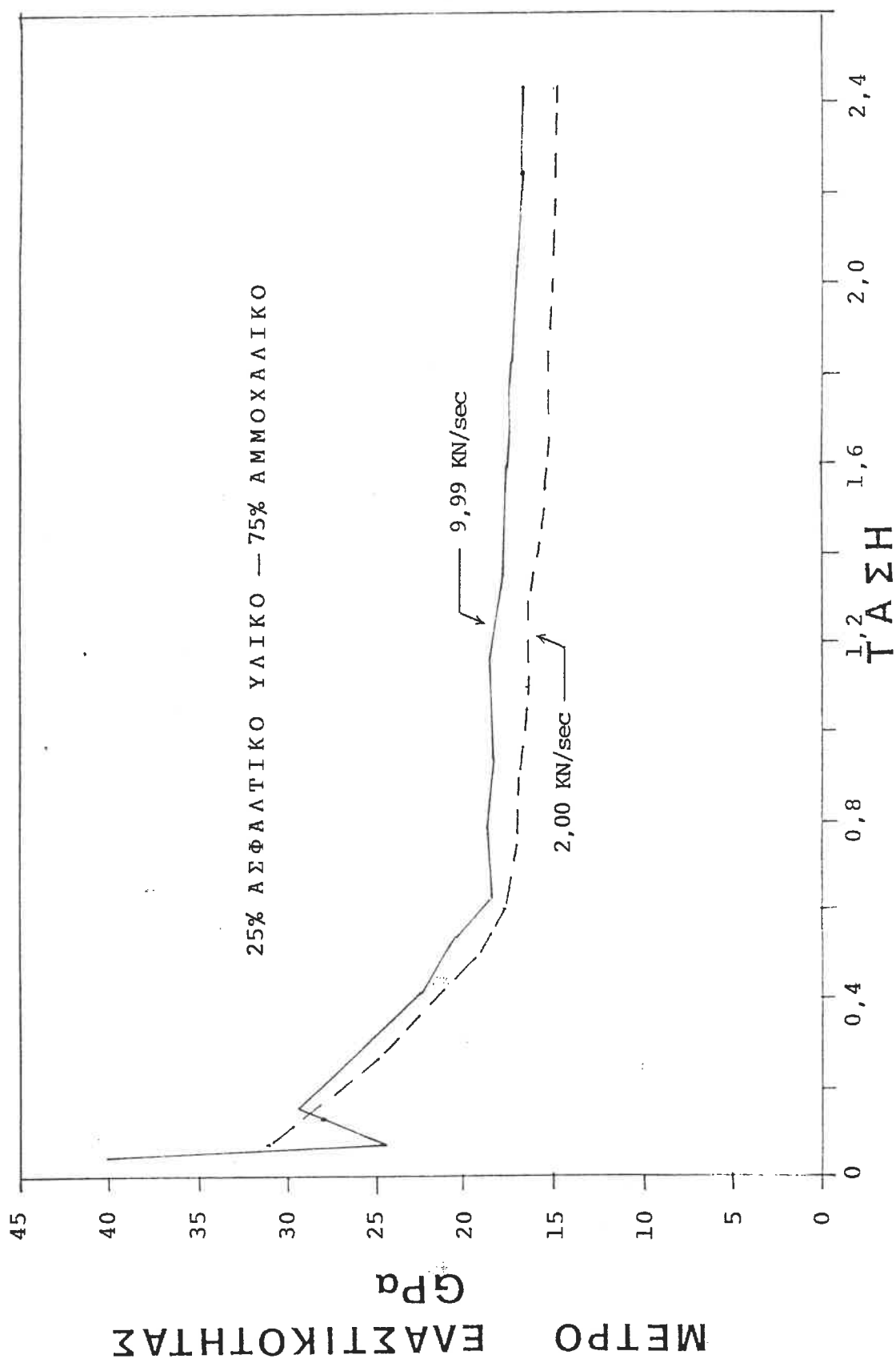
MPa

ΣΥ 740

9.99
KN/SEC

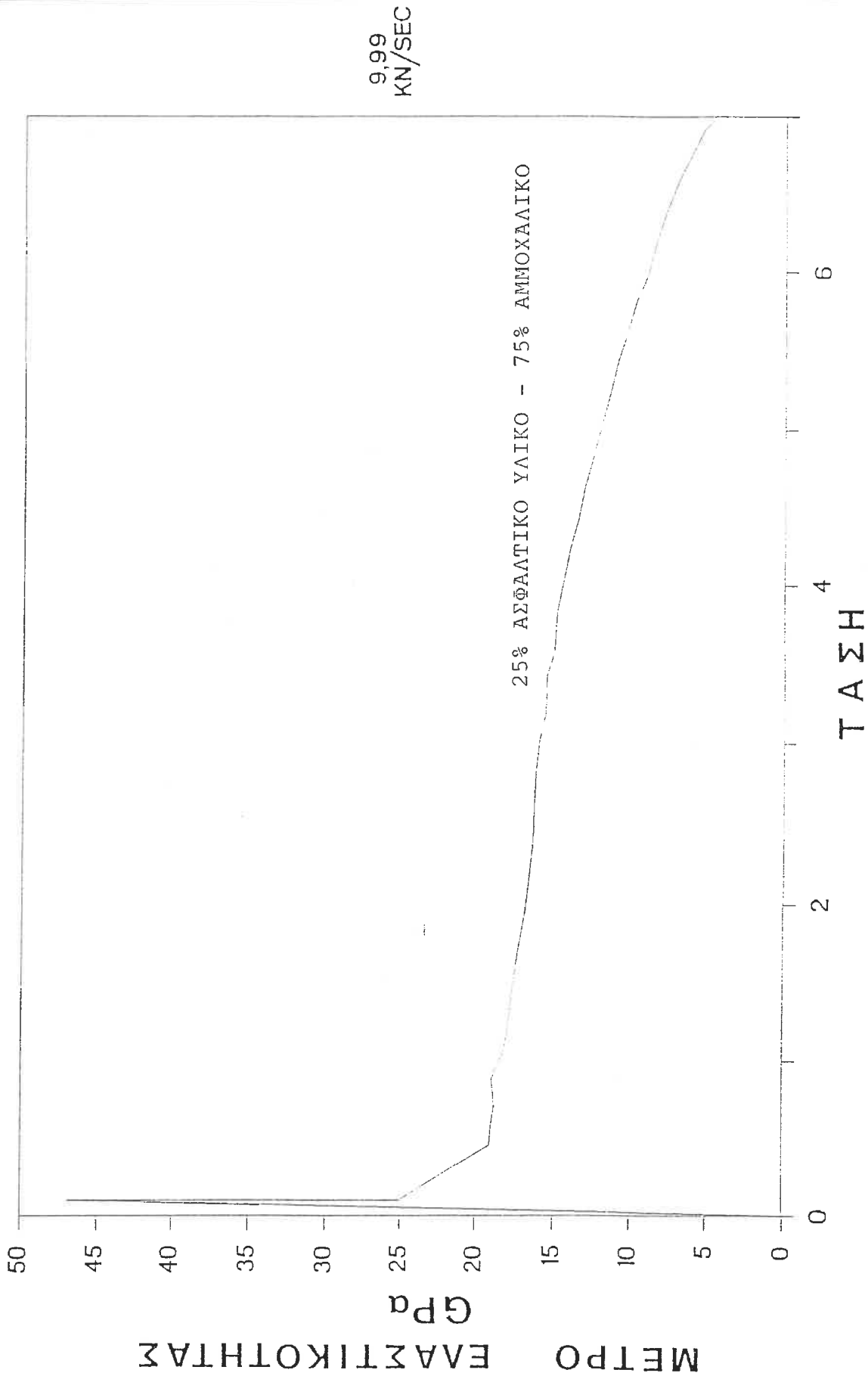
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΤΑΣΕΩΣ

ΜΕΧΡΙ 1/3 ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



ΜΡα
ΣΧ. 7.41

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΤΑΣΕΩΣ ΜΕΧΡΙ ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

7.7.2.4. Σύγκριση-Συμπεράσματα

Στο σχήμα 7.43 φαίνονται οι καμπύλες του μέτρου ελαστικότητας σε συνάρτηση με την τάση που σχεδιάστηκαν για τρία δοκίμια, τα οποία καταπονήθηκαν μέχρι την τάση θραύσεως.

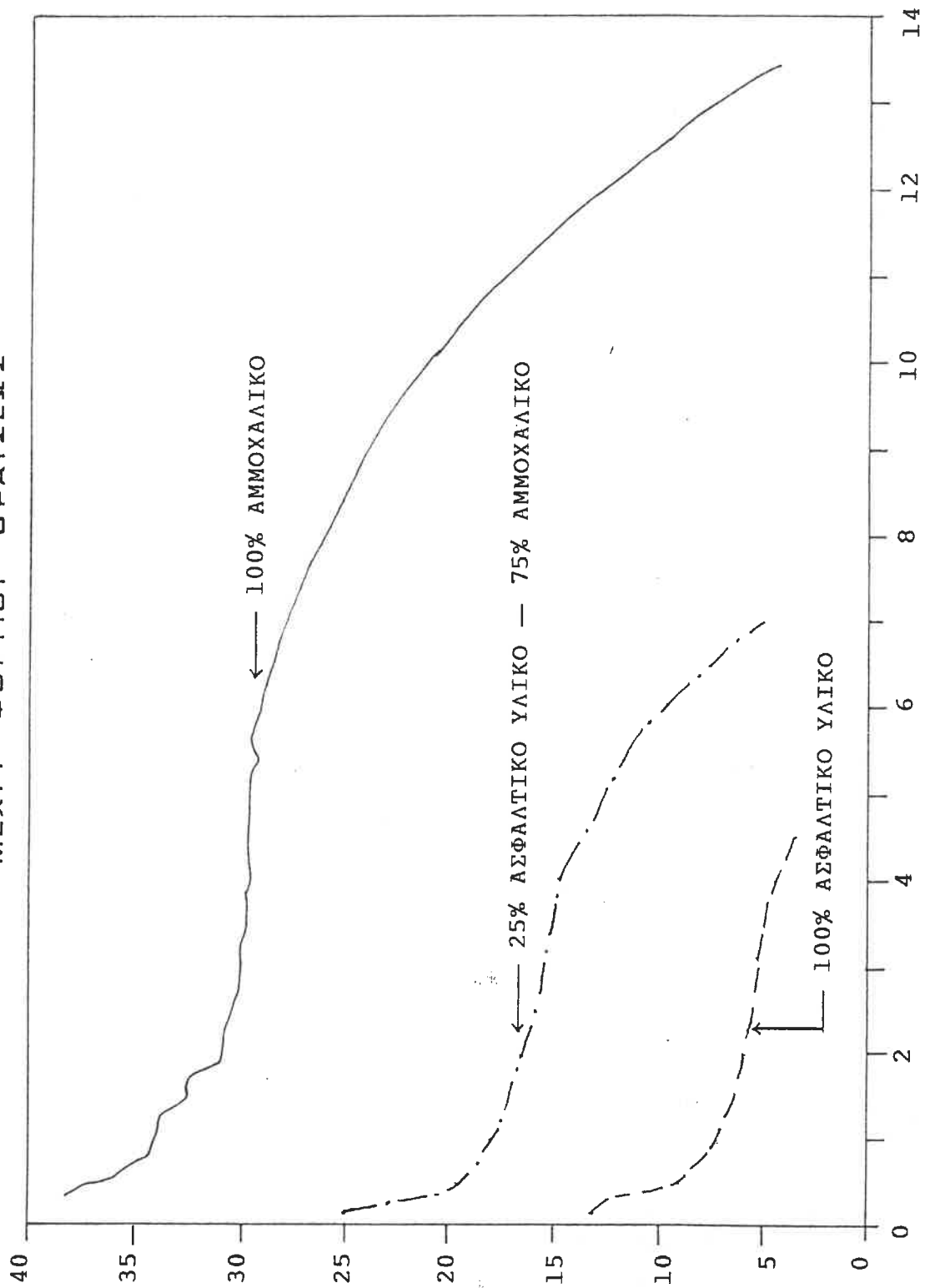
Η μορφή της καμπύλης είναι η ίδια και στις τρεις περιπτώσεις. Στην αρχή παρατηρούνται απότομες, αυξημένες τιμές στο μέτρο ελαστικότητας, που το μέγεθός τους οφείλεται σε όχι ακριβή λειτουργία των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων.

Παρά το γεγονός όμως αυτό, η ένδειξη ότι οι τιμές του μέτρου, για μικρές τάσεις, είναι μεγαλύτερες απ' ότι στη συνέχεια, έρχεται σε συμφωνία με το γεγονός ότι το ηλεκτροδυναμικό μέτρο ελαστικότητας, που αντιστοιχεί σε πολύ μικρές τιμές τάσεων, είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο στατικό.

Στη συνέχεια τα διαγράμματα παρουσιάζουν κάποια σταθερότητα για ένα κάπως ευρύ πεδίο τάσεων, όμως ακολουθούν θεαματικές πτώσεις των καμπύλων, διότι τα δοκίμια βρίσκονται πλέον στην πλαστική περιοχή, όπου εμφανίζονται ρωγμές και λύεται η συνέχεια της μάζας τους.

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

GPa



9,99
KN/SEC

ΤΑΣΗ

mm/mm

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΤΑΣΕΩΣ
ΜΕΧΡΙ ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

7.7.3. Λόγος Poisson

Σε ορισμένα δοκίμια από τις τέσσερις κατηγορίες που εξετάζονται προσαρμόστηκαν στις παράπλευρες επιφάνειές τους ηλεκτρομηκυνσιόμετρα σε διεύθυνση κάθετη προς την διεύθυνση επιβολής του φορτίου, ώστε να μπορέσουν να μετρηθούν οι οριζόντιες παραμορφώσεις.

Με αυτόν τον τρόπο εξάγεται ο λόγος Poisson, που ορίζεται ως το πηλίκο της ανηγμένης παραμόρφωσης, που προκαλείται κατά την κάθετη διεύθυνση, προς αυτήν στην οποία επιβάλλεται το φορτίο, προς την ανηγμένη παραμόρφωση που προκαλείται κατά την διεύθυνση επιβολής του φορτίου.

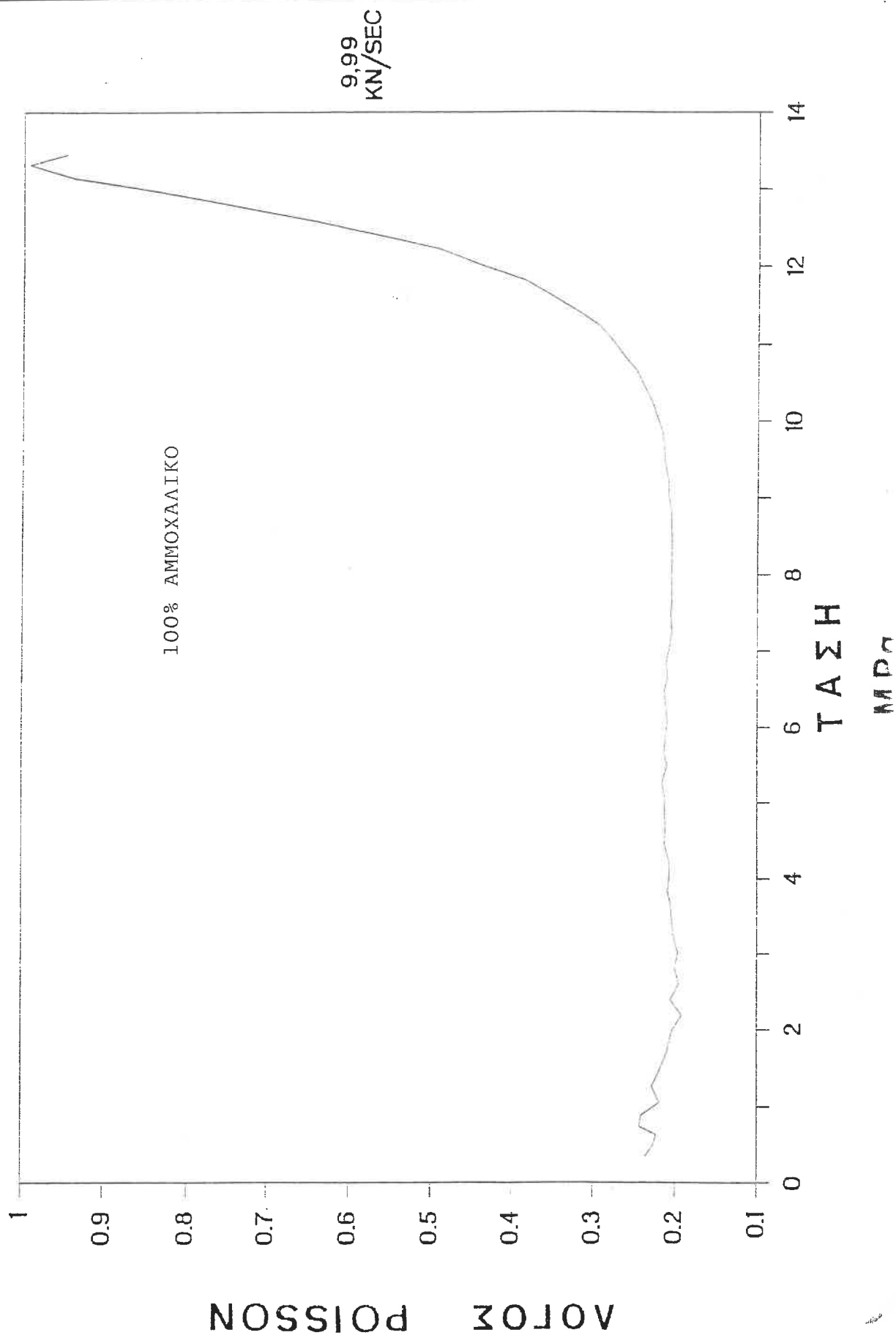
Στα δοκίμια που εξετάστηκαν, πραγματοποιήθηκε καταγραφή του λόγου Poisson για φόρτιση μέχρι του $1/3$ του φορτίου θραύσεως, για δύο διαφορετικές ταχύτητες επιβολής της φορτίσεως, τα αποτελέσματα των οποίων δεν είχαν αξιοσημείωτες διαφορές.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε φόρτιση των δοκιμίων έως το φορτίο θραύσεως και τα αποτελέσματα του λόγου του Poisson φαίνονται στα Σχήματα 7.44, 7.45 και 7.46. Στα διαγράμματα που παρατηρείται απότομη αύξηση στην αρχική περιοχή του διαγράμματος, οι τιμές δεν έχουν αξιοπιστία διότι τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα αδυνατούν να καταγράψουν τόσο μικρές παραμορφώσεις.

Σε όλα τα διαγράμματα φαίνεται ότι ο λόγος Poisson έχει σταθερή τιμή για ένα ευρύτατο πεδίο τάσεων. Όταν οι τιμές της τάσης βρίσκονται μεταξύ του $1/3$ και του $1/2$ του φορτίου θραύσης παρατηρείται μια μικρή, αλλά σταθερή αύξηση του λόγου Poisson, λόγω του ότι το δοκίμιο αρχίζει και εισέρχεται στην πλαστική περιοχή και καταγράφονται παραμορφώσεις της δημιουργίας ρωγμών.

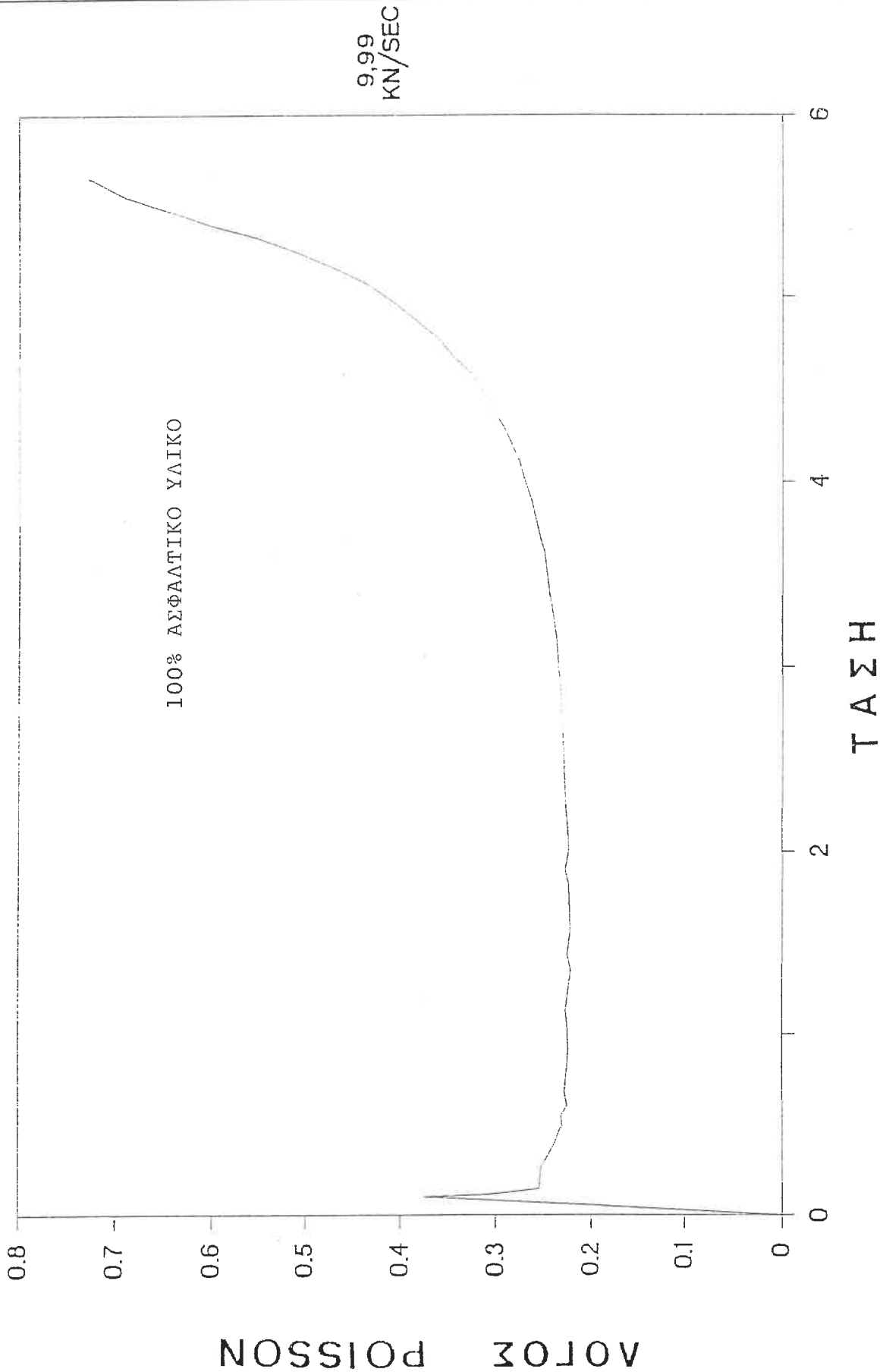
Στην περιοχή δε μετά από τα $2/3$ του φορτίου θραύσεως παρατηρείται ραγδαία αύξηση του λόγου Poisson, η οποία ερμηνεύεται από τη δημιουργία ανοικτών ρωγμών στη μάζα του δοκιμίου, το εύρος των οποίων καταγράφεται ως οριζόντια παραμόρφωση. Έτσι το δοκίμιο παρότι θλίβεται, διογκώνεται λόγω της δημιουργίας ρωγμών.⁽⁴¹⁾

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΛΟΓΟΥ POISSON- ΤΑΣΕΩΣ ΜΕΧΡΙ ΦΟΡΤΙΟΥ ΒΡΑΥΣΕΩΣ



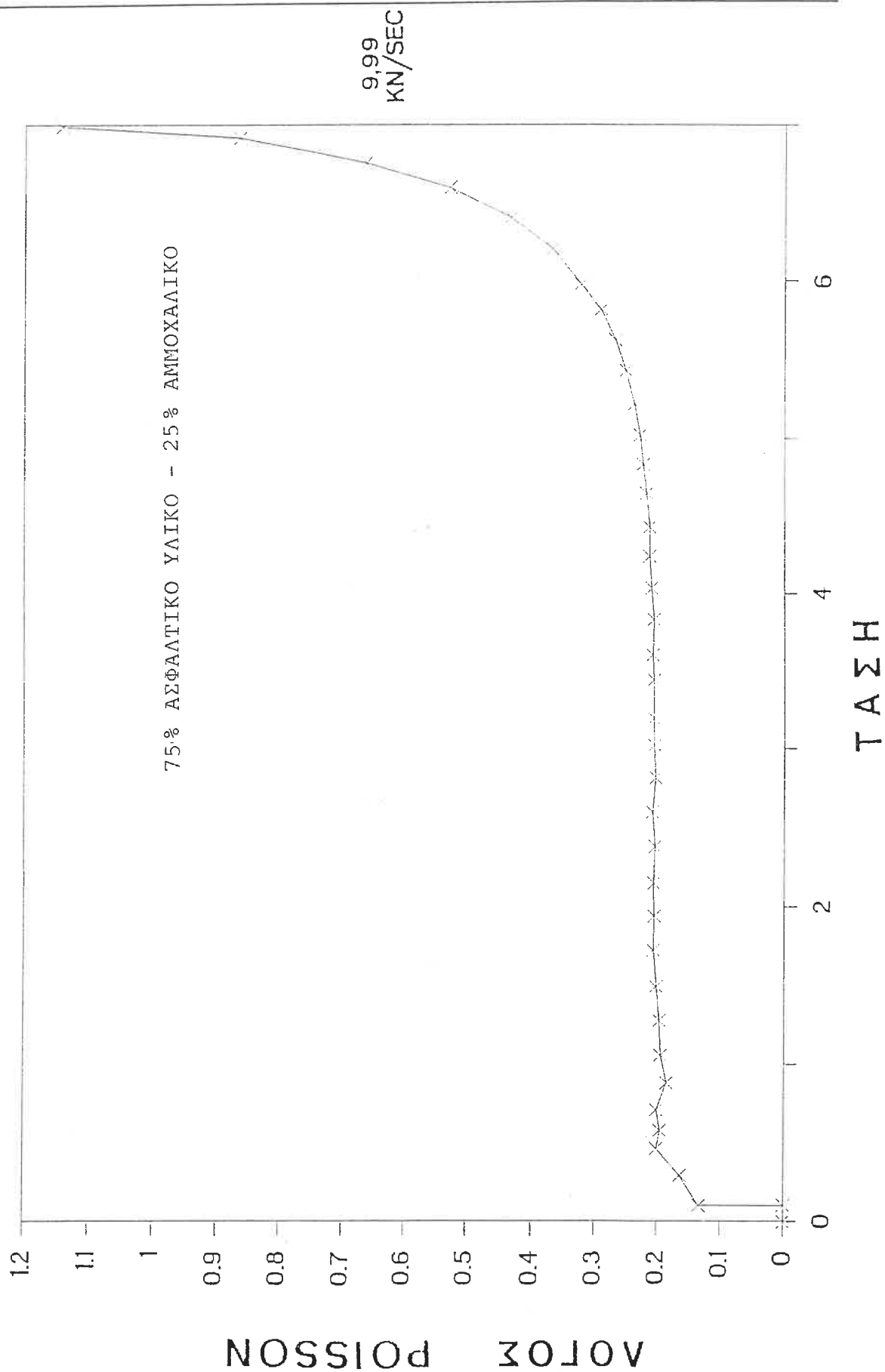
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΛΟΓΟΥ POISSON - ΤΑΣΕΩΣ
ΜΕΧΡΙ ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΛΟΓΟΥ POISSON-ΤΑΣΕΩΣ ΜΕΧΡΙ ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ

75% ΑΣΦΑΛΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ - 25% ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

7.8. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΤΡΟ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

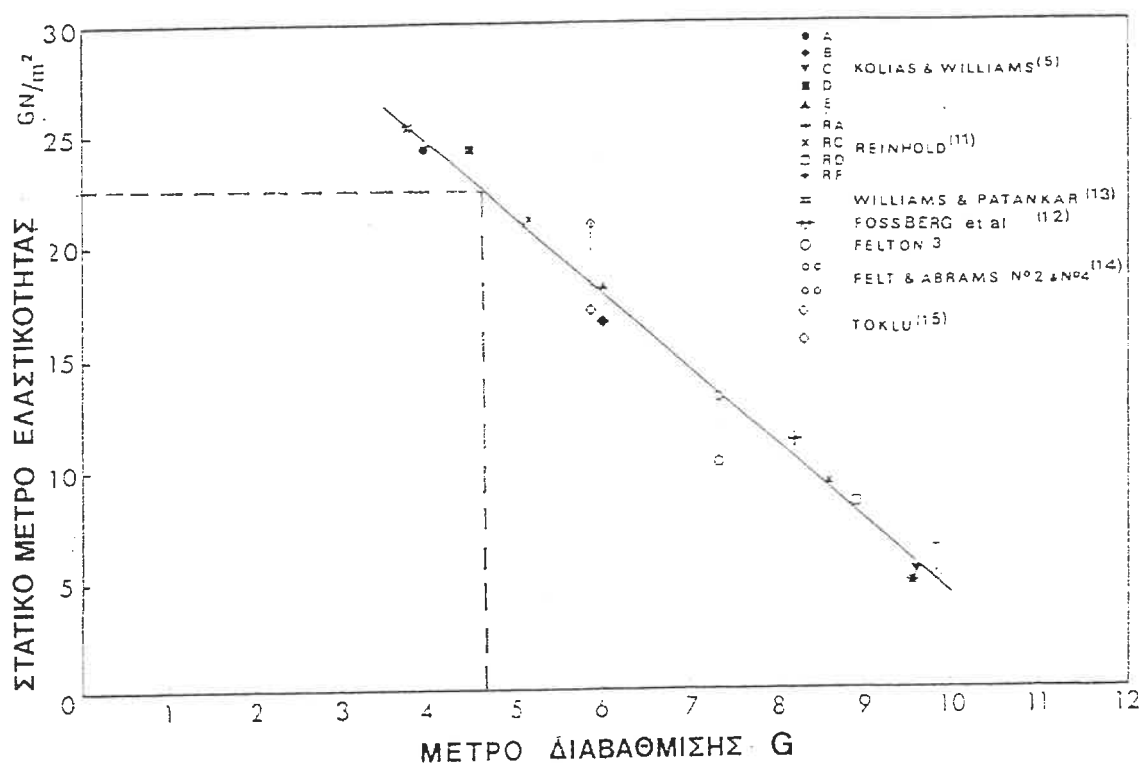
Υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας της κατηγορίας V, δηλαδή του καθαρού αμμοχάλικου σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφηκε στην § 4.4.

διερχομένο ποσοστό από το κόσκινο	37,5 mm (1 1/2 in)	=	100			
>>	>>	>>	>>	19 mm (3/4 in)	=	100
>>	>>	>>	>>	9,5 mm (3/8 in)	=	86,25
>>	>>	>>	>>	4,75mm (No 4)	=	59,75
>>	>>	>>	>>	2,36mm (No 8)	=	35,5
>>	>>	>>	>>	1,18mm (No 16)	=	26,25
>>	>>	>>	>>	600 μm (No 30)	=	18,75
>>	>>	>>	>>	300 μm (No 50)	=	15,25
>>	>>	>>	>>	150 μm (No 100)	=	11,25
>>	>>	>>	>>	75 μm (No 200)	=	8,25
					Σύνολο	<u>461,25</u>

$$\text{Μέτρο διαβάθμισης} = \frac{461,25}{100} \implies \boxed{G = 4,6125}$$

Από το διάγραμμα του σχήματος 7.47 προσδιορίζεται το στατικό μέτρο ελαστικότητας που αντιστοιχεί στην μονοαξονική φόρτιση των 6 MPa

$$E_p = 22,45 \text{ GPa}$$

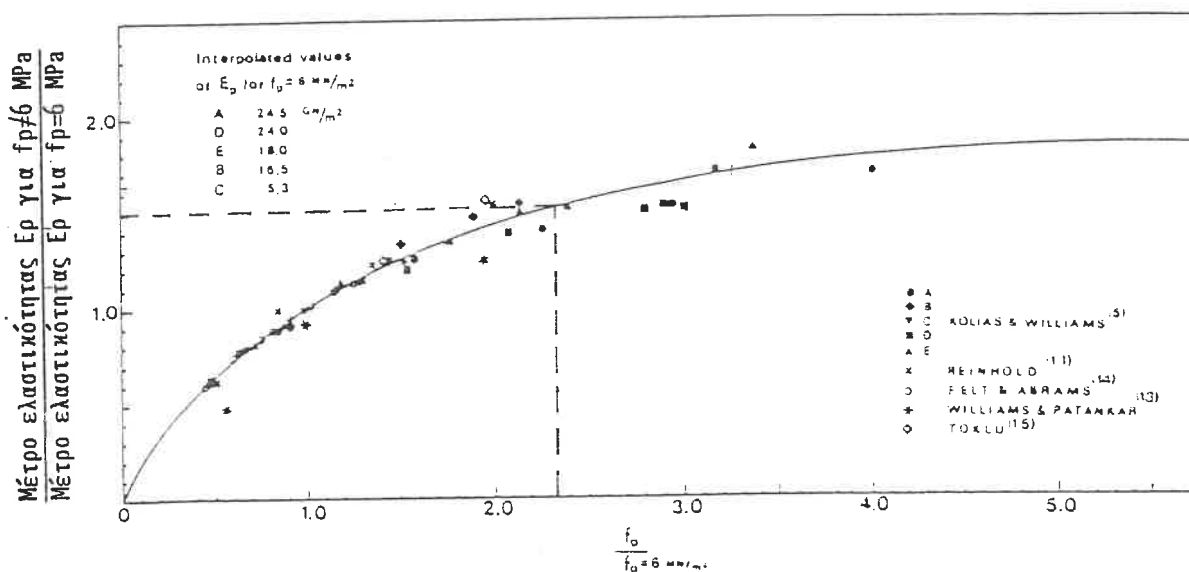


Σχήμα 7.47

Η αντοχή του πρισματικού δοκιμίου στο οποίο μετρήθηκε το μέτρο ελαστικότητας βρέθηκε 13,8 MPa.

Στο παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 7.48 για λόγο

$$\frac{f_p \neq 6 \text{ MPa}}{f_p = 6 \text{ MPa}} = \frac{13,8}{6} = 2,3 \text{ βρίσκω ότι } \frac{E_p \text{ για } f_p \neq 6 \text{ MPa}}{E_p \text{ για } f_p = 6 \text{ MPa}} = 1,5$$



Σχ. 7.48

Άρα

$$E_p = 1,5 * 22,45 \implies E_p = 33,7 \text{ GPa}$$

Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας που υπολογίσαμε με αυτή τη μέθοδο δεν παρουσιάζει σημαντική διαφορά από την τιμή 32,17 δηλ. τον μ.ο. των μέτρων ελαστικότητας που μετρήθηκαν και τα αποτελέσματά του φαίνονται στον Πίν. 7.8. Επομένως επιβεβαιώνεται ότι οι τιμές, που παραθέτονται για το στατικό μέτρο ελαστικότητας, έχουν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας.

7.9. ΗΛΕΚΤΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Στην § 4.5.1.1. περιγράφηκε ο εξοπλισμός και η διαδικασία για την τέλεση αυτής της δοκιμής.

Χρησιμοποιούνται πρισματικά δοκίμια 100mm*100mm*500mm στα οποία μετράται η συχνότητα συντονισμού.

Ο υπολογισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας γίνεται με χρήση του τύπου

$$E_D = 4f^2 * l^2 * \rho$$

f : η συχνότητα συντονισμού σε Hz

l : το μήκος του δοκιμίου σε mm (σταθερό $l = 500\text{mm}$)

ρ : η πυκνότητα του υλικού του δοκιμίου σε Kg/m^3

Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στον πίνακα 7.10.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Κατηγορία	Πρίσμα	Ανάγνωση οργάνου	Συχνότητα συντονισμού Hz	Πυκνότητα Kg/m ³	Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας MPa	μ.ο. MPa	S MPa	σ.μ. %
I	1	15,00	3180	2158	21823	21180	1090	5,1
	2	14,95	3162	2174	21736			
	3	15,00	3180	2152	21762			
	4	15,00	3180	2180	22045			
	5	14,40	2972	2140	18902			
	6	14,76	3094	2174	20811			
II	1	15,96	3546	2180	27412	27008	-	-
	2	15,86	3510	2156	26562			
III	1	16,16	3634	2182	28821	28821	-	-
IV	1	17,32	4208	2204	39027	39782	4797	12,1
	2	16,88	3996	2170	34650			
	3	17,67	4403	2332	45201			
	4	17,60	4362	2342	44561			
	5	17,52	4263	2344	42598			
	6	16,68	3675	2174	32644			
V	1	18,73	5099	2482	64531	66457	2263	3,4
	2	18,72	5092	2482	64354			
	3	18,75	5113	2498	65305			
	4	18,80	5148	2496	66148			
	5	18,86	5194	2500	67444			
	6	19,00	5302	2524	70952			

Πιν. 7.10

Στον πιν. 7.11 φαίνονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του στατικού και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας.

Κατηγορία	Στατικό μέτρο ελαστικότητας E_s			Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_d		
	μ.ο. GPa	S GPa	σ.μ. %	μ.ο. GPa	S GPa	σ.μ. %
I	7,33	0,47	6,4	21,18	1,09	5,1
II	--	--	--	27,01	--	--
III	14	--	--	28,82	--	--
IV	19	3,56	18,7	39,78	4,8	12,1
V	32,17	2,1	6,5	66,46	2,26	3,4

Πιν. 7.11

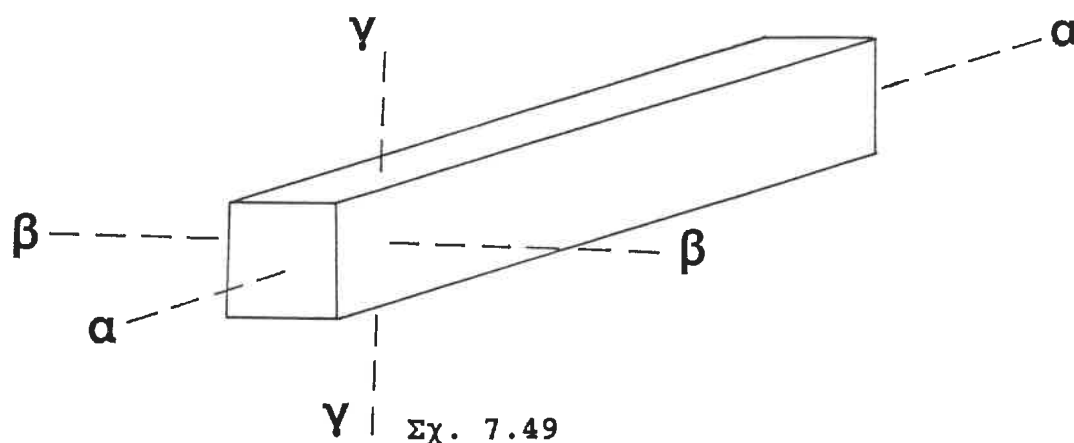
Παρατηρείται μια πολύ μεγάλη αύξηση της τιμής του δυναμικού μέτρου σε σχέση με το στατικό της αντίστοιχης κατηγορίας, μια αύξηση πολύ μεγαλύτερη (διπλάσια) από αυτή που έχει παρατηρηθεί από διάφορους ερευνητές στο παρελθόν.

Το γεγονός δε, ότι το στατικό μέτρο ελαστικότητας της κατηγορίας V, δεν έχει ουσιαστική διαφορά από το μέτρο που εκτιμήθηκε από την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού, όπως είδαμε στην § 7.8, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο βαθμός αξιοπιστίας των τιμών του στατικού μέτρου ελαστικότητας είναι υψηλός.

Καταλήγουμε λοιπόν στην απόρριψη των τιμών του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, οι οποίες πρέπει να οφείλονται σε λανθασμένες ενδείξεις της συσκευής, στην οποία έγινε η μέτρηση.

7.10. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΤΩΝ ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Σε όλα τα πρισματικά δοκίμια στα οποία μετρήθηκε το ηλεκτροδυναμικό μέτρο ελαστικότητας, έγινε και μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων σε διάφορες διευθύνσεις.



Στον πιν. 7.12 φαίνονται οι ταχύτητες που μετρήθηκαν στις τρεις διευθύνσεις που παρίστανται στο σχ. 7.49.

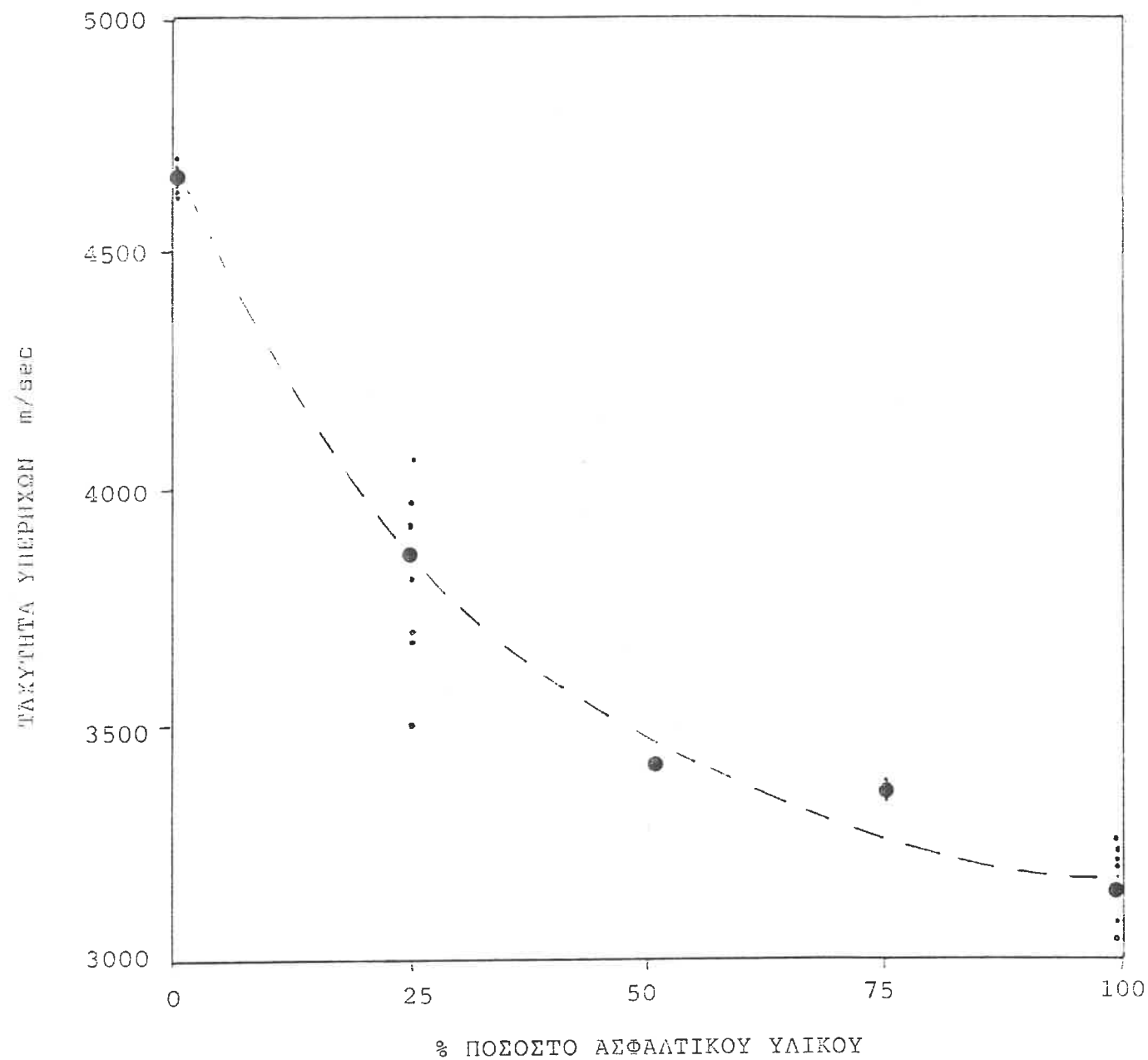
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Κατηγορία	Αριθμ. Δοκιμ.	Διεύθυνση α-α				Διεύθυνση β-β				Διεύθυνση γ-γ			
		Ταχύτητα m/sec	μ.ο. m/sec	S m/sec	σ.μ. %	Ταχύτητα m/sec	μ.ο. m/sec	S m/sec	σ.μ. %	Ταχύτητα m/sec	μ.ο. m/sec	S m/sec	σ.μ. %
I	1	3211	3176	84	2,6	3436	3412	173	5,1	3048	3189	125	3,9
	2	3236				3597				3344			
	3	3255				3597				3367			
	4	3236				3460				3165			
	5	3040				3268				3144			
	6	3080				3115				3057			
II	1	3378	3361	--	--	3510	3510	--	--	3300	3374	--	--
	2	3544				3510				3448			
III	1	3430	3430	--	--	3690	3690	--	--	3521	3521	--	--
IV	1	3811	3860	140	3,6	3906	3985	185	4,6	3831	3753	227	6,1
	2	3682				3731				3610			
	3	4062				4202				3984			
	4	3975				4065				3817			
	5	3931				4202				3953			
	6	3701				3802				3322			
V	1	4677	4658	28	0,6	4854	4845	60	1,2	4545	4598	55	1,2
	2	4634				4808				4695			
	3	4655				4926				4566			
	4	4613				4854				4566			
	5	4700				4950				4566			
	6	4669				4975				4651			

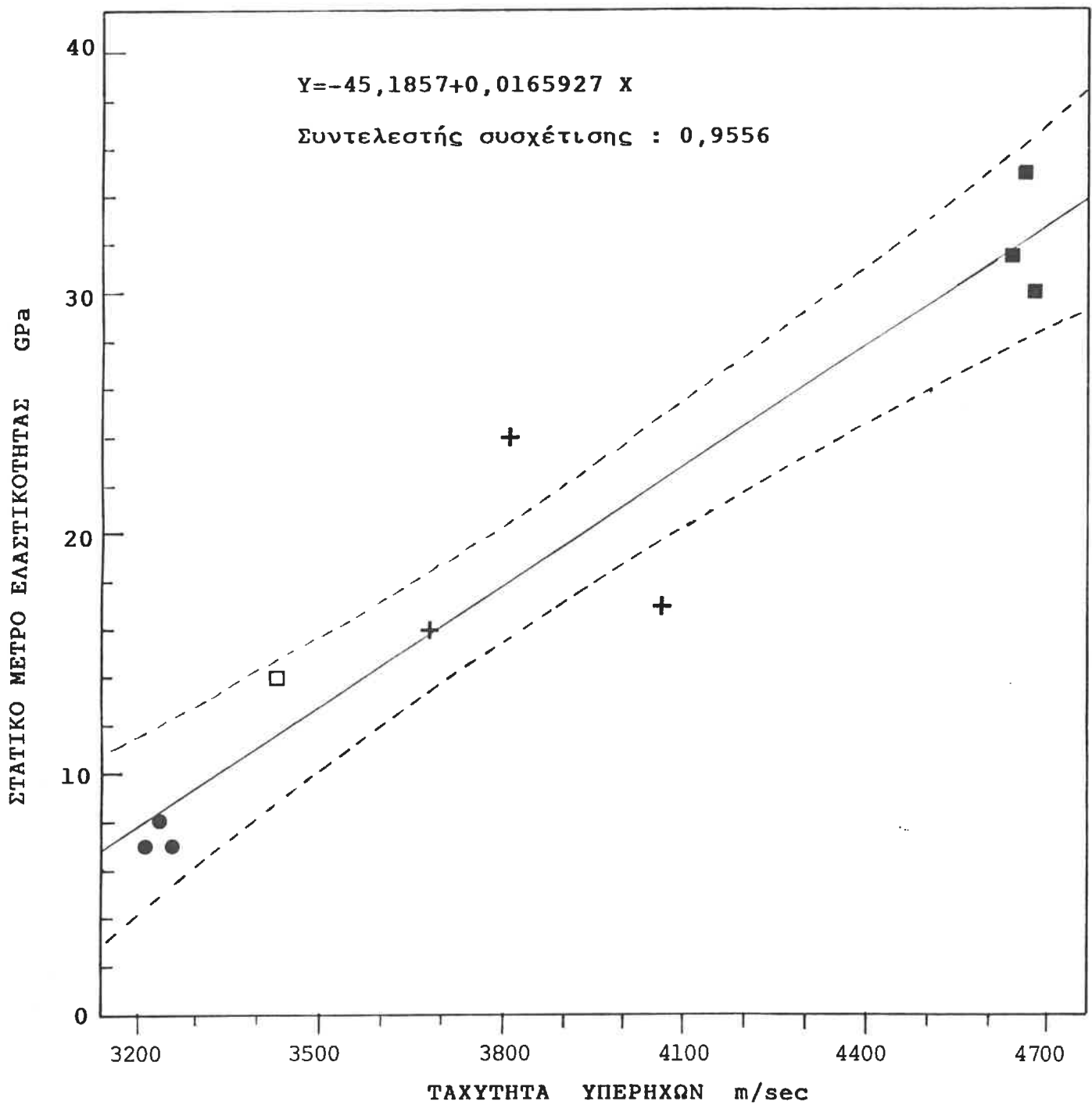
Πιν. 7.12

Στο σχήμα 7.50 παριστάνεται η ταχύτητα των υπερήχων σε συνάρτηση με το ποσοστό του ασφαλικού υλικού. Είναι φανερό ότι η ταχύτητα διάδοσης είναι πολύ μεγαλύτερη στο καθαρό αμμοχάλικο απ' ότι είναι στο καθαρό ασφαλικό υλικό. Αυτό οφείλεται στο ότι η πυκνότητα σταδιακά μειώνεται όσο αυξάνεται το ασφαλικό υλικό και στο ότι στο αμμοχάλικο υπάρχει πολύ καλή σύνδεση των κόκκων μεταξύ τους, λόγω της δράσεως του τσιμέντου, η οποία δεν είναι τόσο μεγάλη όταν παρουσιάζεται το ασφαλικό υλικό.

Στο σχήμα 7.51 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας και της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων διαμέσου των πραγματικών δοκιμίων.

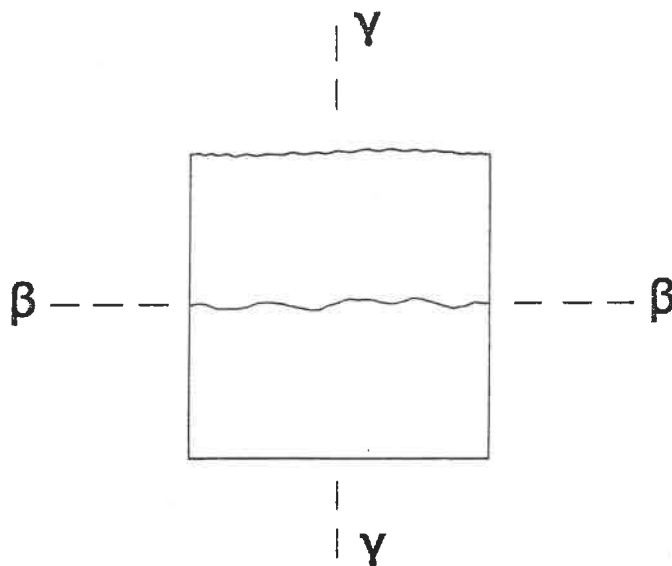


Σχ. 7.50



Σχ. 7.51

Μια παρατήρηση που θα μπορούσε ακόμη να γίνει, αφορά την ταχύτητα διάδοσης κατά τις διευθύνσεις $\beta\text{-}\beta$ και $\gamma\text{-}\gamma$.



Σχ. 7.52

Κατά τη διεύθυνση $\gamma\text{-}\gamma$, σε όλες τις κατηγορίες, παρατηρούνται μικρότερες ταχύτητες διάδοσης των υπερήχων κατά $5 \div 7\%$ σε σχέση με τις ταχύτητες που μετρήθηκαν στη διεύθυνση $\beta\text{-}\beta$. Οι δύο αυτές ταχύτητες είναι συγκρίσιμες διότι το μήκος που διατρέχουν οι υπέρηχοι είναι το ίδιο (100 mm).

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την ύπαρξη μιας ασυνέχειας που παρατηρείται καθ' ύψος του δοκιμίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.52 η οποία οφείλεται στην ύπαρξη 2 διαφορετικών στρώσεων διάστρωσης και συμπύκνωσης. Παρόλο που πραγματοποιείται εκτράχυνση της πρώτης στρώσης πριν την διάστρωση της δεύτερης, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει απόλυτη συνεργασία μεταξύ των στρώσεων. Η ύπαρξη αυτής της

ανωμαλίας επιφέρει μεγαλύτερο χρόνο διάδοσης των υπερήχων κατά την διεύθυνση γ-γ και επομένως μικρότερη ταχύτητα.

Η ακριβής διαδικασία μέτρησης της ταχύτητας των υπερήχων προϋποθέτει πολύ καλή επαφή των μεταδοτών στις επιφάνειες του δοκιμίου. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.52, η επάνω επιφάνεια του δοκιμίου, δεν είναι απολύτως επίπεδη, παρόλο που καταβλήθηκε ιδιαίτερη προσπάθεια κατά τη διάρκεια της παρασκευής, με την χρησιμοποίηση πλάκας συμπύκνωσης. Αυτές οι μικροανωμαλίες μπορεί να επιφέρουν μεγαλύτερο χρόνο διάδοσης με αποτέλεσμα, μικρότερη ταχύτητα των υπερήχων.

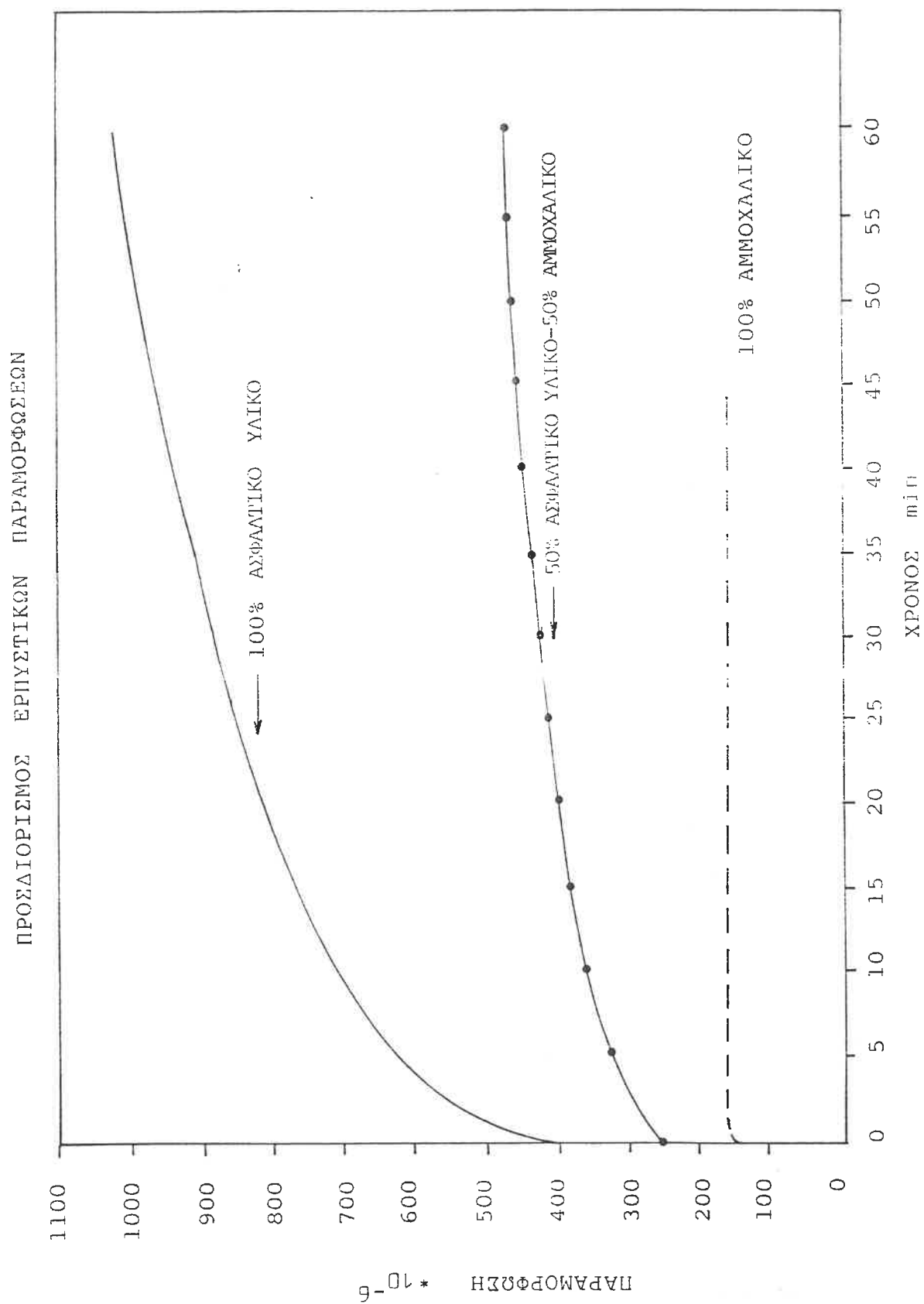
7.11 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΡΠΥΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Ο τρόπος εκτέλεσης του πειράματος περιγράφεται στην § 6.8. Τα αποτελέσματα του φαίνονται στο σχήμα 7.53.

Παρατηρείται μεγάλη αύξηση στις παραμένουσες παραμορφώσεις στα υλικά που περιέχουν ασφαλικό υλικό.

Για την κατηγορία 100% ασφαλικό υλικό εμφανίζεται η παραμόρφωση, μετά από 1 ώρα συνεχές θλιπτικό φορτίο, να είναι 2,5 φορές μεγαλύτερη από αυτή που εμφανίζεται αμέσως μετά την επιβολή του φορτίου.

Τα ερπυστικά φαινόμενα περιορίζονται στην κατηγορία 50% ασφαλικό υλικό -50% αμμοχάλικο και ουσιαστικά μηδενίζονται στην περίπτωση του καθαρού αμμοχάλικου. Η τελευταία κατηγορία αντιπροσωπεύει το ισχνό σκυρόδεμα, το οποίο δεν παρουσιάζει ερπυστικές παραμορφώσεις σε τόσο μικρά χρονικά διαστήματα όπως αυτά της μιάς ώρας (45) στο χαμηλό αυτό επίπεδο φόρτισης. (< 1/3 Ρθρ.)



ΣΧ. 7.53

7.12. ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Γίνεται απόπειρα μέτρησης του μέτρου ελαστικότητας όταν επιβάλλονται εφελκυστικά φορτία με τη διαδικασία που περιγράφεται στην § 6.9.

Το πρισματικό δοκίμιο είναι της κατηγορίας IV, δηλ. 25% Ασφαλτικό υλικό - 75% Αμμοχάλικο.

Επιβάλλεται στο φορτίο εφελκυστική τάση 0,246 MPa και η παραμόρφωση που μετράται από τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα είναι $14 \cdot 10^{-6}$.

Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού είναι :

$$E = 17571 \text{ MPa}$$

Το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου No 3 που υπολογίστηκε με την παραπάνω μέθοδο είναι περίπου ίσο με το μέτρο που υπολογίστηκε για το ίδιο δοκίμιο στη δύναμη της θλίψης (17000 MPa).

Αποδεικνύεται λοιπόν ότι το μέτρο ελαστικότητας είναι το ίδιο για τον εφελκυσμό και για τη θλίψη.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

H Λ Ι Κ Ι Α	H Σ Ε Ρ Σ	K Α Μ Τ Ι Η Γ Γ Ο Α Ρ Τ Ι Ο Α Σ	Θλίψη			Διάρρηξη			Κάμψη			Θλίψη ισοδύναμων κύβων			Στατικό μέτρο ελαστικότητας			Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας		
			κύβων			κύβων														
			fp	S	σ.μ	fs	S	σ.μ	fb	S	σ.μ	feq	S	σ.μ	Es	S	σ.μ	Ea	S	σ.μ
			MPa	MPa	%	MPa	MPa	%	MPa	MPa	%	MPa	MPa	%	GPa	GPa	%	GPa	GPa	%
7		I	5,03 (3)	0, 14	2,8	0,43 (3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		III	8,39 (3)	0,095	1,1	0,56 (3)	0,02	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		V	15, 9 (3)	0, 46	2,9	0,74 (3)	0,01	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28		I	6, 3 (3)	2, 25	4	0,71 (3)	0,05	7,4	0,49 (3)	0,01	2,6	6,1 (3)	0,14	2,2	7,33 (3)	0,47	6,4	21,18 (6)	1,09	5,1
		II	-	-	-	-	-	-	0,51 (5)	0,02	3,5	6,6 (3)	0,25	3,8	-	-	-	27,01 (2)	-	-
		III	10,74 (3)	0, 22	2	0,87 (3)	0,04	4,4	0,49 (3)	0,02	4,7	7,2 (3)	0,60	8,4	14 (2)	-	-	28,82 (1)	-	-
		IV	-	-	-	-	-	-	0,61 (3)	0,04	8,8	8,9 (3)	1,31	14,8	19 (3)	3,56	18,7	39,78 (6)	4, 8	12,1
		V	19,56 (3)	0, 55	2,8	1,32 (3)	0,11	8,3	0,837 (3)	0,03	3,5	18,52 (3)	0,75	4,1	32,17 (3)	2, 1	6,5	66,46 (6)	2,26	3,4

Πιν. 7.13

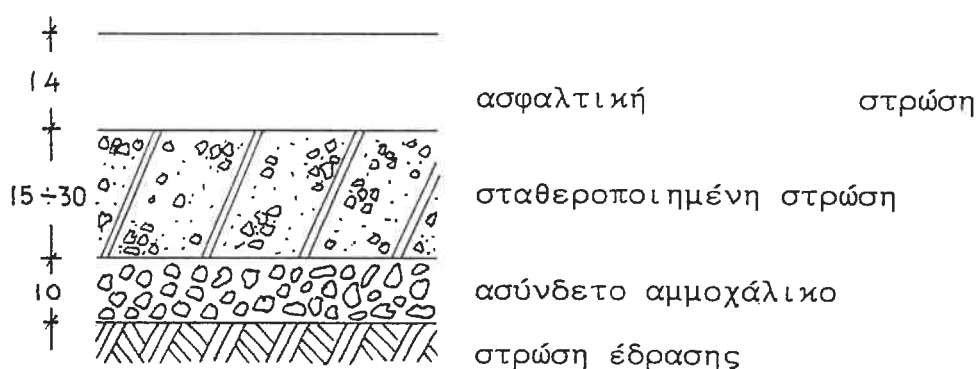
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ

Ανάλυση οδοστρωμάτων

8. ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που εξείχθησαν από το πειραματικό μέρος, επιχειρείται ανάλυση οδοστρώματος με χρήση Η/Υ.

Η μορφή του οδοστρώματος είναι η ακόλουθη :



Η ασφαλτική στρώση έχει πάχος 14 cm και μέτρο ελαστικότητας 3000 MPa και λόγο Poisson 0,35.

Η σταθεροποιημένη στρώση έχει μεταβλητό πάχος, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm, σταθερό λόγο Poisson 0,20 και διαφορετικό κάθε φορά μέτρο ελαστικότητας που κυμαίνεται μεταξύ των ορίων 5.000 MPa και 40.000 MPa, ώστε να καλύπτονται όλες οι περιπτώσεις των διαφόρων κατηγοριών των υλικών που εξετάστηκαν.

Η στρώση με το ασύνδετο αμμοχάλικο είναι σταθερού πάχους 10cm και έχει μέτρο ελαστικότητας 150 MPa και λόγο Poisson 0,35.

Για τη στρώση έδρασης λαμβάνεται λόγος Poisson 0,35 και δύο διαφορετικές τιμές CBR (και επομένως διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας), $CBR_1 = 5$ και $CBR_2 = 10$ (μέτρα ελαστικότητας 50 MPa και 100 MPa αντίστοιχα), ώστε να εξετάζεται η επιπόνηση των στρώσεων του οδοστρώματος για δύο εντελώς διαφορετικές κατηγορίες εδαφών που αποτελούν τη στρώση έδρασης.

Το φορτίο που καταπονεί το οδόστρωμα οφείλεται σε απλό τροχό με ακτίνα επαφής 12,5 cm και πίεση ελαστικού 7 bars (0,7 MPa). Θεωρείται ότι υπάρχει πλήρης συνεργασία μεταξύ των στρώσεων του οδοστρώματος.

Το κρίσιμο εντατικό μέγεθος που εξετάζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται στον πυθμένα της σταθεροποιημένης στρώσης.

Στα σχήματα 8.2 και 8.3 φαίνονται οι τιμές της εφελκυστικής αυτής τάσης σε συνάρτηση με το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας της σταθεροποιημένης στρώσης για δύο διαφορετικές τιμές CBR.

Στο σχήμα 8.3 φαίνεται ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις έχουν μικρότερες τιμές στις αντίστοιχες τιμές του πάχους και του μέτρου ελαστικότητας, από τις τιμές του σχήματος 8.2, γεγονός που οφείλεται στην υψηλότερη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης. Για διπλάσια τιμή CBR οι εφελκυστικές τάσεις μειώνονται κατά 12 ÷ 15 %.

Παρατηρείται επίσης ότι όσο αυξάνεται το πάχος της σταθεροποιημένης στρώσης γίνεται μεγαλύτερος ο ρυθμός που μειώνονται οι εφελκυστικές τάσεις. Όταν το πάχος μεταβληθεί από 15 σε 30 cm οι εφελκυστικές τάσεις μειώνονται $2,2 \div 2,7$ φορές.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση γίνεται όταν το πάχος της σταθεροποιημένης στρώσης παραμένει σταθερό και μεταβάλλεται μόνο το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης. Σ' αυτήν την περίπτωση αυξάνονται οι τιμές της εμφανιζόμενης εφελκυστικής τάσης, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της δυσκαμψίας της στρώσης, που σημαίνει ότι το σύνολο των εξωτερικών φορτίων αναλαμβάνονται από αυτή τη στρώση, με συνέπεια την ελαχιστοποίηση της επιπόνησης των άλλων στρώσεων.

Στα σχήματα 8.2 και 8.3 σχεδιάστηκε επίσης η καμπύλη αντοχής των υλικών που διαθέτουμε σε διάρρηξη. Όπως είδαμε στην § 6.6.2 η δοκιμή της διάρρηξης προσομοιάζει τη δοκιμή του εφελκυσμού παρόλο που υπάρχει διαξονική εντατική κατάσταση. Θα ήταν προτιμότερο να παριστάνονταν τα αποτελέσματα της δοκιμής της κάμψης, διότι η δοκιμή αυτή προσομοιάζει καλύτερα την πραγματική εντατική κατάσταση, που είναι διαξονική κάμψη, αλλά στην παρούσα εργασία τα αποτελέσματα αυτής της δοκιμής έχουν μικρό βαθμό αξιοπιστίας, όπως αναφέρεται στην § 7.5.

Φαίνεται καθαρά ότι και στις δύο περιπτώσεις η εντατική κατάσταση δεν ξεπερνάει την αντοχή, παρόλο που σε μερικές περιπτώσεις αγγίζει τα όρια της.

Για την διαστασιολόγηση όμως της στρώσης με συγκεκριμένο μέτρο ελαστικότητας, θα πρέπει να γίνει επιλογή του πάχους που αντιστοιχεί σε εφελκυστική τάση λιγότερη από το 1/2 της αντοχής, ώστε ο νόμος της κόπωσης να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις επιτρεπόμενες επαναλήψεις φορτίσεων. Αυτός ο νόμος έχει τη μορφή για τις σταθεροποιημένες στρώσεις :

$$\frac{\sigma}{f} = 1 - a * \log N \quad (5)$$

όπου

σ = η επιβαλλόμενη τάση

f = η αντοχή σε μονοτονική φόρτιση

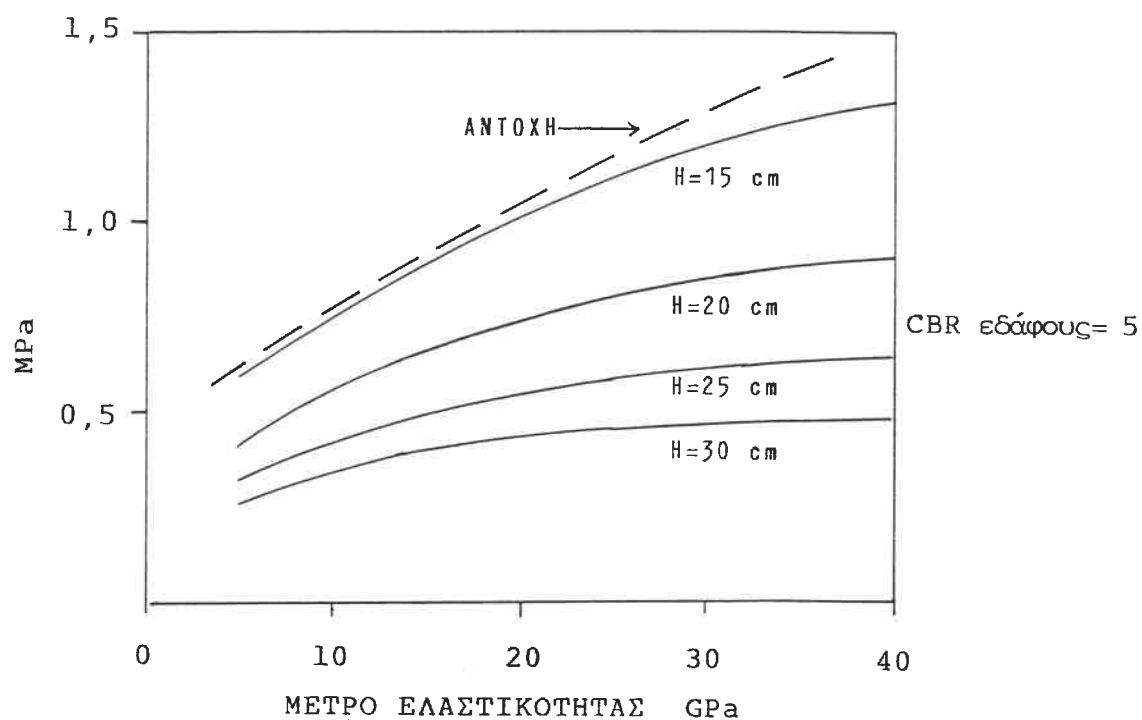
f = 0,80 έως 1,17 MPa σε κάμψη σε 90 ημέρες

a = η κλίση της γραμμής της κόπωσης σε ημιλογαριθμική κλίμακα

a = 1/12 για κατεργασμένα με τσιμέντο αμμοχάλικα

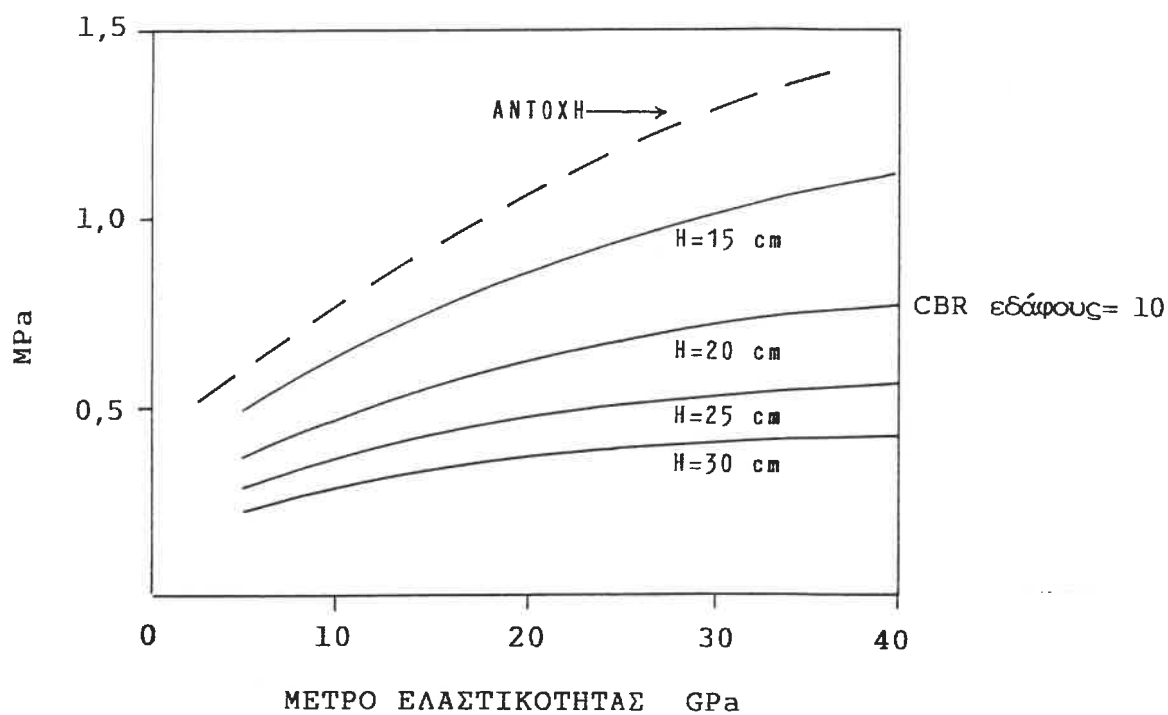
Πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα περίπτωση τα σταθεροποιημένα υλικά περιέχουν άσφαλτο, η συμπεριφορά της οποίας θα πρέπει να εξετασθεί αναλυτικά για την επαλήθευση του παραπάνω νόμου.

ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ
ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ



Σχ. 8.2

ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ
ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ



Σχ. 8.3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ

Συμπεράσματα - Προτάσεις

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

9.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από το σύνολο της πραγματοποιηθείσας πειραματικής διαδικασίας εξάγεται το γενικό συμπέρασμα ότι η κατεργασία με τσιμέντο μιγμάτων θρυμματισμένου ασφαλτομίγματος - θραυστού αμμοχάλικου παρουσιάζει ικανοποιητικά μηχανικά χαρακτηριστικά, και επομένως παρόμοια μίγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή σταθεροποιημένων στρώσεων οδοστρωμάτων.

Η σχετικά μεγάλη μείωση του στατικού μέτρου ελαστικότητας των μιγμάτων, που περιέχουν αυξημένες ποσότητες θρυμματισμένου ασφαλτομίγματος, έχει μεγάλη σημασία στη συμπεριφορά των στρώσεων αυτών υπό συνθήκες φορτίσεως μακράς διάρκειας, όπως είναι οι επιπονήσεις από θερμοκρασιακές μεταβολές, από συστολή ξηράνσεως και από ακίνητα ή βραδύτατα κινούμενα οχήματα. Για να εξακριβωθούν τα πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα αυτών των μιγμάτων θα πρέπει να γίνει σύγκριση του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αντοχή σε εφελκυσμό ή κάμψη με αντίστοιχους λόγους συνηθισμένων σταθεροποιημένων με τσιμέντο υλικών.

Παρατηρήθηκαν επίσης μεγάλες ερπυστικές παραμορφώσεις στα μίγματα με υψηλή περιεκτικότητα θρυμματισμένου ασφαλτομίγματος, υπό συνθήκες φορτίσεως μακράς διάρκειας.

Η απόπειρα προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας στην θεωρία υπολογισμού που βασίζονται στην θεωρία περιγραφής των υλικών που αποτελούνται από δύο ή τρεις φάσεις, δεν στέφθηκε με επιτυχία.

Παρόμοια ανεπιτυχή αποτελέσματα είχαν και οι δοκιμές κάμψεως και προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, οι τιμές των οποίων απορρίφθηκαν ως μη έγκυρες, οφειλόμενες στην ελλειπή λειτουργία των μηχανημάτων εκτελέσεως των δοκιμών.

Η εισαγωγή των αποτελεσμάτων της πειραματικής έρευνας σε Η.Υ. μας έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα αναλύσεως οδοστρώματος, που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα εξεταζόμενα υλικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ανακαινήσεις ή ενισχύσεις υπάρχουσών οδοστρωμάτων προσφέροντας τεχνικά ορθές και οικονομικά φθηνές κατασκευές.

9.2. ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η εργασία αυτή αποτελεί μια προκαταρκτική διερεύνηση των δυνατοτήτων χρησιμοποίησης των συγκεκριμένων υλικών, η οποία όμως απαιτεί συμπληρώσεις για την πληρέστερη αξιολόγηση των διαφόρων μηχανικών χαρακτηριστικών.

Θα πρέπει αρχικά να επαναληφθούν οι δοκιμές της κάμψης και του υπολογισμού του ηλεκτροδυναμικού μέτρου ελαστικότητας, ώστε να βρεθούν αξιόπιστα αποτελέσματα, για να καλυφθεί το κενό των γνώσεων για τα βασικά αυτά μηχανικά χαρακτηριστικά.

Θα πρέπει επίσης να γίνουν πειράματα με δυναμικό τρόπο επιβολής της φόρτισης, ώστε να προσομοιάζεται η πραγματική επιπόνηση των οδοστρωμάτων από τα φορτία κυκλοφορίας. Η φόρτιση των 9,99 KN/sec που πραγματοποιήθηκε στα πειράματά μας, όπως και η φόρτιση για τον προσδιορισμό του ηλεκτροδυναμικού μέτρου ελαστικότητας, που ήταν της τάξεως $3000 \div 5000$ Hz, δεν είναι αντιπροσωπευτικές της πραγματικής καταστάσεως που είναι από 1 έως 10 Hz.

Δεδομένου ότι οι ιδιότητες της ασφάλτου εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, θα πρέπει να ερευνηθούν οι ιδιότητες των υλικών για διάφορες αντιπροσωπευτικές τιμές θερμοκρασιών των Ελληνικών οδοστρωμάτων όπως π.χ. 0 °C, 5 °C, 10 °C, 20 °C, 40 °C, 60 °C.

Πρέπει να ερευνηθεί επίσης η αντοχή σε κόπωση αυτών των υλικών, για τον προσδιορισμό της οποίας απαιτείται ειδικός εξοπλισμός.

Τέλος, λόγω του ότι παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές στον τύπο των ασφαλτομιγμάτων που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα, θα πρέπει κάθε φορά να ερευνώνται οι ιδιότητες των διαφόρων μιγμάτων των θρυμματισμένων ασφαλτομιγμάτων και του αμμοχάλικου.

B I B Λ Ι Ο Γ Ρ Α Φ Ι Α

- (1) Williams R.I.T. *Properties of cement stabilised materials*. The Journal of the Institution of the Highway Engineers. Febr. 1972.
- (2) ACI MATERIALS JOURNAL COMMITTEE REPORT, *State - of - Art on Soil Cement*. July - August 1990.
- (3) Portland - Cement - Association. *Soil - Cement Construction Handbook*. 1979.
- (4) PIARC. *Semi - Rigid Pavements*. 1991.
- (5) Κόλιας Σ., Λοΐζος Αν. *Σημειώσεις οδοστρωμάτων*. 1991.
- (6) Κουφόπουλος Τ. *Προσδιορισμός ελαστικών σταθερών και ειδικής ικανότητας αποσβέσεως δια δυναμικών μεθόδων*. Δελτίον του Εργαστηρίου Δημοσίων Εργων. Τεύχος 5-6.
- (7) Mindess S, Young J.F. *Concrete*. Prentice - Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jercey 07632.
- (8) Πρασιανάκης Ι., Κωνσταντέλος Β., Μήλιος Ι. *Πειραματική Αντοχή Υλικών*. Αθήνα 1988.
- (9) Malhotra V.M. *Testing Hardened Concrete. Nondestructive Methods*. The IOWA State University Press, American Concrete Institute 1976.
- (10) Taylor G.D. *Materials of construction*. Longman 1974.
- (11) RILEM RECOMENDATION NON-DESTRUCTIVE METHODS. *Recomendations for the Use of Resonant Frequency Method in Testing Concrete Specimens*.
- (12) Swamy S.N. *Dynamic Poisson's Ratio of Portland Cement-Paste Mortar and Concrete*. Cement and Concrete Research. Vol. 1, p.p. 559-583.

- (13) Kolias S., Williams R.I.T. *Relationships between the static and the dynamic moduli of elasticity in cement stabilised materials*. *Materiaux of Constructions*, Vol. 13 - No 73.
- (14) British Standard 1881 Part 5. 1970.
- (15) Williams R.I.T., Patankar V.D. *The effect of Cement type, Aggregate type and Mix Water Content on the properties of Lean Concrete Mixes*. *Roads and Road Construction*. February and March 1968.
- (16) Lilley A.A., Williams R.I.T. *Cement Stabilised Materials in Great Britain*. *Highway Research Record* 442, Washington, p.p. 70-82.
- (17) Beckwith T.G., Buck N.L. *Mechanical Measurements* Addison - Wesley Publishing Company, Inc. 1965.
- (18) British Cement Association. *Mix in place Road Recycling : The "green" solution*. B.C.A Reprint 1991.
- (19) Patankar V.D. , Williams R.I.T. *Bitumen in dry lean Concrete*. *Highways and Traffic Engineering*. Jan. 1970.
- (20) Terzaghi K., Peck R.B. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Sons, Inc. 1954.
- (21) Γιαζέτας Γ. *Σημειώσεις Εδαφομηχανικής*. Ε.Μ.Π. 1988.
- (22) Andersson R., Carlsson V. *Interaction Between Mix Design, Construction and Properties for RCCP*. 6th International Symposium on Concrete Roads. Madrid 8-10 Oct. 1990.
- (23) Λοΐζος Αντ. *Εδαφομηχανική-Θεμελιώσεις*. Ε.Μ.Π. 1975.
- (24) Nanni A. *Splitting - Tension Test for Fiber - Reinforced Concrete*. *ACI Materials Journal*, July-August 1988.

- (25) Anagnos N.J., Kennedy W.T. *Practical Method of Conducting the Indirect Tensile Test.* Center for Highway Research. The University of Texas at Austin August 1972.
- (26) Hadley O.W. , Vahida H. *Fundamental Comparison of the Flexural and Indirect Tensile Tests.* Transportation Research Record 911.
- (27) Greer Charles W. Jr. *Variation of Laboratory Concrete Flexural Strength Tests.* American Society of Testing and Materials 1983.
- (28) AIPCR - PIARC. *Recommentation for Testing Hydraulic and Pozzolanic Binder treated Materials* 1987.
- (29) Hobbs D.W. *The Strength and Deformation of Concrete under Short - Term Loading : A Review.* Cement and Concrete Association September 1973.
- (30) Manns W. *Influence of Elasticity of Cement Paste and Aggregate on the Elastic Rehaviour of Concrete and Mortar.* Structure, Solid Mechanics and Engineering Design. Wiley - Interscience 1969.
- (31) Monteiro J.M. Paulo. *A note on the Hirsch Model.* Cement and Concrete Reserch, Vol. 21, 1991.
- (32) Κουφόπουλος Τ. *Επί του Μέτρου Ελαστικότητας Υλικού Δύο Φάσεων.* Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Εργων. ΑΘΗΝΑΙ 1966.
- (33) Κουφόπουλος Τ. *Λεξικό Τεχνολογίας Σκυροδέματος.* Εκδοση Εργαστηρίων Σκυροδέματος, Αθήνα 1992.
- (34) Hancen C. Torben. *Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar and Cement Paste.* Journal of the American Concrete Institute, Proceedings Vol. 62, No 2, February 1965, p.p. 193-216.

- (35) Kolias S. and Williams R.I.T. *Estimation of the Modulus of Elasticity of Cement Stabilised Materials*. Geotechnical Testing Journal, Vol. 7, No 1. March 1984, p.p. 26-35.
- (36) Hammitt M. George. *Concrete Strength Relationships*. National Technical Information Service. December 1974.
- (37) Robinson S.G. *Methods of detecting the Formation and Propagation of Microcracks in Concrete*. Proceedings of an International Conference. London, September 1965.
- (38) Newman K. *The Structure and Properties of Concrete - an Introductory Review*. Proceedings of an International Conference. London, September 1965.
- (39) Popovics S. *Relations Between Various Strengths of Concrete*. Highway Research Record, No 210, 1967.
- (40) Κόλιας Σ. Βασιλείου Κ., Γιώτης Α. *Δυνατότητα Ανακυκλώσεως και Ενισχύσεως Ασφαλτικών Οδοστρωμάτων με Κατεργασία με Τσιμέντο*. Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Εργων. Νο 3-4, Ιούλιος-Δεκέμβριος 1983.
- (41) Τάσιος Θ.Π. *Μαθήματα ωπλισμένου σκυροδέματος*. Τόμος Ι : Μέρος Α', σελ. 39-40.
- (42) Parrot L.J. *Simplified Methods of Predicting the deformation of Structured Concrete*. Cement and Concrete Association. Oct. 1979.
- (43) Marais C.P. *Some Engineering Properties of Cement Treated Crusher - Run Materials*. NIRR - PCI Symposium on Cement - Treated Crusher - Run Bases. Feb. 1973, Johannesburg.
- (44) Raad Rutfi. *A Mechanistic Model for Strength and Fatigue of Cement - Treated Soils*. American Society for Testing and Materials. 1982.
- (45) Bonnot J. *Assesing the Properties of Materials for the structural Design of Pavements*. Third ICSDAP VI Sep. 1972.

- (46) Mamlouk S.M., Sarofim T.R. *Modulus of Asphalt Mixtures -An Unresolved Dilemma.* Transportation Research Record 1171.
- (47) Τσαμασφύρος Γ., Παπανικολάου Γ., *Μηχανική των Παραμορφωσίμων Στερεών Ι.* Σελ. 168 , Αθήνα 1985.
- (48) Kalankamary P. George. *Cracking in Cement - Treated Bases and Means for Minimizing it.* Highway Research Record. No 255.
- (49) Pretorius P.C. Brumette, Kruger, Stoffberg, Hugo, Monismith C.L. *Prediction of Shrinkage Stresses in Pavements Containing Soil-Cement Bases.* Highway Research Record - No 362 1971.
- (50) George K.P. *Cracking in Pavements Influenced by Viscoelastic Properties of Soil-Cement.* Highway Research Record - No 263.
- (51) Nagih M. El-Rowi, Haliburton T.A., James L.R. *Effect of Compaction Method on Strength Parameters of Soil-Cement Mixtures.* Highway Research Record - No 255.
- (52) Kalankamary P.G. *Shrinkage Characteristics of Soil-Cement Mixtures.* Highway Research Record - No 255.