

**ΟΙ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ
ΕΠΙ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ
ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ «GREAT LIMESTONE»
ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ NORTHUMBERLAND ΣΤΗΝ ΑΓΓΛΙΑ**

Του Κ.Ι. ΣΑΧΠΑΖΗ
M.Sc. Μηχανικού Γεωλόγου

Ανάτυπο από το
ΔΕΛΤΙΟΝ
ΚΕΝΤΡΟΥ ΕΡΕΥΝΩΝ
ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ
(Τεύχος 3-4/1986)

ΑΘΗΝΑ, 1986

ΟΙ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ «GREAT LIMESTONE» ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ NORTHUMBERLAND ΣΤΗΝ ΑΓΓΛΙΑ

Του Κ.Ι. ΣΑΧΠΑΖΗ
M.Sc. Μηχανικού Γεωλόγου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο Ασβεστολιθικός σχηματισμός γνωστός σαν «Great Limestone» του Μπερνισίου, έχει διαιρεθεί σε τέσσερις βαθμίδες μεταμόρφωσης: α) μη μεταμορφωμένος ασβεστόλιθος, βαθμίδα Α, β) χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης, βαθμίδα Β, γ) υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης, βαθμίδα Γ και δ) τελείως μεταμορφωμένος ασβεστόλιθος, βαθμίδα Δ (Μάρμαρο).

Πραγματοποιήθηκε συστηματική και αντιπροσωπευτική δειγματοληψία από όλες τις παραπάνω βαθμίδες και αφού παρασκευάστηκαν λεπτές τομές, μελετήθηκε και περιγράφηκε η πετρογραφία και ορυκτολογία τους και επίσης καθορίστηκε η σταδιακή επίδραση της μεταμόρφωσης επαφής επί του ιστού και της υφής του πετρώματος αυτού.

Εκτελέστηκαν εργαστηριακές δοκιμές, με μεθόδους βραχομηχανικής, επί κυλινδρικών πυρήνων πετρώματος και επί κομματιών πετρώματος ακανόνιστου σχήματος και για τις τέσσερις βαθμίδες μεταμόρφωσης. Μεταξύ των δοκιμών που εκτελέστηκαν, ήταν: κλασσικές δοκιμές κατάταξης, δοκιμές προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων για γεωτεχνικούς σκοπούς, και δοκιμές προσομοίωσης της αποσάθρωσης.

Αυτές αποκάλυψαν τις γεωτεχνικές ιδιότητες των τεσσάρων βαθμίδων μεταμόρφωσης του «Great Limestone» καθώς και ότι η μεταμόρφωση, σαν γεωλογικός παράγοντας, επιδρά αξιοσημείωτα επί των τεχνικών ιδιοτήτων του, όπως φαίνεται από τη σταδιακή υποβάθμιση της ποιότητας του υλικού του πετρώματος με την αύξηση της μεταμορφωτικής δράσης.

Τέλος φαίνεται ότι υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ των γεωτεχνικών ιδιοτήτων και της πετρογραφικής υφής και ιστού αυτού του είδους του πετρώματος.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να μελετήσει την επίδραση του γεωλογικού φαινομένου της μεταμόρφωσης επαφής, επί των τεχνικογεωλογικών ιδιοτήτων του Ασβεστολιθικού σχηματισμού γνωστού σαν Great Limestone της ευρείας περιοχής Northumberland της Αγγλίας. Η εξ επαφής μεταμόρφωση παρουσιάζεται σε αρκετές θέσεις της περιοχής αυτής, λόγω της διείσδυσης της κοίτης Whin (Δολερίτης) μεταξύ των επιπέδων στρώσης του μητρικού ασβεστολιθικού πετρώματος.

Ο Ασβεστολιθικός αυτός σχηματισμός είναι μία ομοιόμορφη και σταθερά εμφανιζόμενη γεωλογική ενότητα και υπόκειται σχεδόν στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής αυτής. Έτσι παίζει οπωσδήποτε σπουδαίο ρόλο σε πολλές τεχνικές εφαρμογές και έργα, όπως π.χ. υπόγειες και επιφανειακές εκσκαφές, εκβραχισμούς για διάνοιξη δρόμων, φράγματα, γέφυρες, στη θεμελίωση άλλων μεγάλων έργων καθώς και στη χρήση του είτε σαν αδρανές υλικό είτε σαν δομικός λίθος. Επί πλέον, σε αρκετές θέσεις το πέτρωμα αυτό

έχει μεταμορφωθεί σε μάρμαρο και οι τεχνικές του ιδιότητες έχουν μεταβληθεί. Επομένως, τόσο οι αρχικές γεωτεχνικές ιδιότητες όσο και ο βαθμός κατά τον οποίο οι ιδιότητες αυτές έχουν μεταβληθεί είναι υψίστης σημασίας για τους μηχανικούς.

Από την άποψη της τεχνικής γεωλογίας του Ασβεστολίθου αυτού, υπολογίστηκαν οι σχετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητές του· οι σπουδαιότερες από τις οποίες είναι: αντοχή, υδροπερατότητα και παραμορφωσιμότητα. Οι μεταβολές των ιδιοτήτων αυτών μελετήθηκαν σε σχέση με την αύξηση του βαθμού μεταμόρφωσης.

Αυτές, σε συνδυασμό με τις πετρογραφικές και ορυκτολογικές ιδιότητες, καθόρισαν την απόδοση και συμπεριφορά του ασβεστόλιθου αυτού και των μεταμορφωμένων παραγώγων του, σε διάφορα τεχνικά έργα και περιπτώσεις.

Μερικές από τις προηγούμενες εργασίες, οι οποίες εκτελέστηκαν σε αυτή τη περιοχή, αφορούσαν μόνο γεωλογικές και μερικές τεχνικογεωλογικές έρευνες μη μεταμορφωμένου σχηματισμού Great Limestone.

Ο Johnson το 1953, μελέτησε τη λιθολογία και

στρωματογραφία του και το 1958 τα παλαιοντολογικά χαρακτηριστικά του. Οι T.S. Westoll, D.A. Rodson και R. Green, το 1955 μελέτησαν την γεωλογία και το περιβάλλον ιζηματογένεσής του. Ο K.A.G. Shiels το 1961 μελέτησε την πετρογραφία και Δολομιτώση.

Η επίδραση, όμως, της μεταμόρφωσης επαφής, επί των τεχνικογεωλογικών ιδιοτήτων του μελετάται μόνο σε αυτή την εργασία.

Για την ολοκλήρωση της έρευνας αυτής επιλέχθηκαν δύο λατομεία: το λατομείο ασβεστολίθου «Mootlaw» και το λατομείο δολερίτη «Longhoughton». Η έρευνα έγινε σε δύο στάδια:

1. *Εργασία υπαίθρου* Κατά το στάδιο αυτό, έγινε συστηματική δειγματοληψία. Διάφορα αντιπροσωπευτικά δοκίμια πάρθηκαν από επιλεγμένες θέσεις των μετώπων των λατομείων. Οι θέσεις αυτές είχαν διάφορες αποστάσεις από την επαφή της κοίτης με τον ασβεστόλιθο και ακολούθως τα δοκίμιά τους εξετάστηκαν πετρογραφικά και ορυκτολογικά ώστε να προσδιοριστεί ο βαθμός μεταμόρφωσής τους, καθώς και να παρακολουθηθεί η εξέλιξη της μεταμόρφωσης. Επίσης εκτελέστηκε γεωλογική χαρτογράφηση των μετώπων των λατομείων.

2. *Εργαστηριακή εξέταση* που συμπεριέλαβε: την πετρογραφική μελέτη των διαφόρων βαθμίδων μεταμόρφωσης, δοκιμές «δείκτη», δοκιμές «σχεδιασμού» και δοκιμές προσομοίωσης της αποσάθρωσης. Για την εργαστηριακή έρευνα χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια (πυρήνες) και κομμάτια πετρώματος ακανόνιστου σχήματος.

Τέλος, συμπεριελήφθηκαν σχέσεις μεταξύ των διαφόρων φυσικομηχανικών παραμέτρων και παρουσιάστηκαν τα συμπεράσματα που βγήκαν.

2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Ο σχηματισμός «Great Limestone» είναι η παχύτερη ασβεστολιθική ενότητα στη σειρά Northumbrian, και ο πιο χαρακτηριστικός ομοιόμορφα και σταθερά εμφανιζόμενος γεωλογικός σχηματισμός στην περιοχή Yoredale της Βόρειας Αγγλίας. Ανήκει στην ευρύτερη σειρά των ασβεστολίθων του κατώτερου λιθανθρακοφόρου (Στο Δινάντιο, κατά G.A. Lebour (1878), που είναι ιζήματα κυρίως πελαγικής φύσης, πάχους 1.000 μέτρων.

Ο ασβεστόλιθος αυτός έχει μέσο πάχος 15 μέτρα και η ιζηματογένεσή του έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια της βαθμίδας του ανώτερου Μπερνισίου (κατά G. A. L. Johnson 1958) και εξαπλώνεται από την περιοχή των Νότιων Απένινων μέσω των Βορείων Απένινων έως τη Βόρεια Northumberland.

Στην Northumberland, επικάθεται είτε των Φαμμίων και των σχιστών αργίλων, είτε λεπτών στρώσεων

άνθρακα και συνήθως υπάρχουν σημεία ασυνέχειας.

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Για την εκτέλεση της έρευνας αυτής επιλέχθηκαν δύο λατομεία, εκ των οποίων το ένα, το λατομείο «Mootlaw» βρίσκεται σε μη μεταμορφωμένο Great Limestone και το άλλο, το λατομείο Longhoughton, βρίσκεται στην γεωλογική επαφή μεταξύ του σχηματισμού Great Limestone (μητρικό πέτρωμα) και της διείσδυσης της κοίτης Whin η οποία προκάλεσε τη μεταμόρφωση στο πρώτο πέτρωμα. Η κοίτη αυτή της νοτιοανατολικής Αγγλίας συνίσταται από πέτρωμα Δολερίτη και στη περιοχή της μελέτης έχει περίπου 15m πάχος. Στη θέση αυτή η κοίτη Whin εισέδωσε παράλληλα προς τα επίπεδα στρώσης του ασβεστόλιθου. Η ηλικία της κοίτης Whin, όπως υπολογίστηκε με τη μέθοδο του ηλίου, είναι της τάξης των 196×10^6 χρόνων δηλαδή, κατά το Ερκύνιο (F.J. Fitch και J.A. Miller 1966).

Η διείσδυση αυτή προξένησε τη μεταμόρφωση του μητρικού πετρώματος, του Great Limestone.

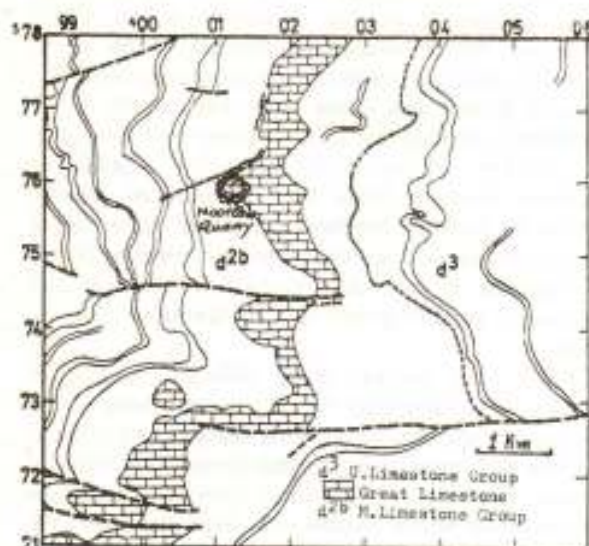
Η ανακρυστάλλωση και μεταμόρφωση αυτή προξενήθηκε λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και μόνο (εξ' ολοκλήρου θερμική μεταμόρφωση). Η ορυκτολογική ανάπτυξη κατά την ανακρυστάλλωση έγινε τυχαία προς όλες τις διευθύνσεις χωρίς να φαίνονται σημάδια επιβολής τάσεων κατά τη πορεία της ανακρυστάλλωσης. Επίσης δεν υπήρξε μεταφορά ύλης, αερίων ή υγρών, από τη διείσδυση της Δολεριτικής κοίτης προς το μητρικό γειτονικό πέτρωμα και δεν υπήρξε καμία ένδειξη πνευματώσεως.

Επομένως είναι μία καθαρά θερμική, ισοχημική και ισοφασική μεταμόρφωση του ασβεστολιθικού μητρικού πετρώματος.

Από το πρώτο λατομείο πάρθηκαν αντιπροσωπευτικά δοκίμια μη μεταμορφωμένου Great Limestone (Βαθμίδα Α), και από το δεύτερο, τρεις διαφορετικές ομάδες δοκιμών, διαφορετικών βαθμίδων μεταμόρφωσης. Η κάθε μία βαθμίδα πάρθηκε από διαφορετική απόσταση από την επαφή κοίτης-ασβεστολίθου και έτσι η μεταμόρφωσή τους ήταν διαφορετική. Όσο πιο κοντά προς τη κοίτη συλλέχθηκε η κάθε βαθμίδα, τόσο υψηλότερος ήταν ο βαθμός μεταμόρφωσής της. Οι ομάδες των δοκιμών είναι: 1) Βαθμίδα Β: συλλέχθηκε 5,5 έως 5,75 μέτρα μακριά από την επαφή (χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης) 2) Βαθμίδα Γ: 2,25 έως 2,5 μέτρα μακριά (μεσαίου βαθμού) και 3) Βαθμίδα Δ: 0,25 έως 0,5 μέτρα μακριά (υψηλού βαθμού).

Ως εκ τούτου συλλέχθηκαν τέσσερες διαφορετικές βαθμίδες μεταμόρφωσης του ασβεστόλιθου, κυμαινόμενες — με σειρά αυξανόμενου βαθμού μεταμόρφωσης — από τη βαθμίδα Α, Β, Γ έως Δ· η Α αντιπροσω-

πέυει τον ασβεστόλιθο και η Δ το μάρμαρο. Η σειρά αυτή ονομάζεται «προοδευτική μεταμορφωσιγενής αλληλουχία». Οι θέσεις των λατομείων καθώς και η γεωλογία των περιοχών τους φαίνονται στους χάρτες των σχ. (1, α, β).



Σχ. 1α. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Moostown.



Σχ. 1β. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Longhoughton.

4. ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ

Παρασκευάστηκαν τρεις λεπτές τομές — η κάθε μία αντιπροσωπεύει ένα ορθογώνιο άξονα στη μάζα του

πετρώματος— από κάθε βαθμίδα μεταμόρφωσης του πετρώματος και προσδιορίστηκαν τα ορυκτολογικά συστατικά τους, οι τύποι της υφής τους, ο αμοιβαίος συσχετισμός μεταξύ του ασβεστίτη και των άλλων ορυκτών κόκκων και η επίδραση της μεταμόρφωσης στα πετρογραφικά χαρακτηριστικά του Great Limestone.

Βαθμίδα Α. Μακροσκοπικά, το πέτρωμα είναι ένας «Σκούρος πρασινογκρίζος, πολύ λεπτόκοκκος, με κρυσταλλική υφή, συμπαγής μέσα στα στρώματα και παχυστρωματώδης, υγείης, μικριτικός λεπτοστρακώδης ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, εξαιρετικά ισχυρός, υδατοστεγανός, με ανισοτροπία λόγω της στρώσεως»

Μικροσκοπικά, αποτελείται από θραύσματα οστράκων (40 μικρά έως 40mm) που σχηματίζουν τον σκελετό του πετρώματος, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με μικριτικό συνδετικό υλικό. Τα σκελετικά θραύσματα αυτά που κυλούνται αλληλοχημικά, περιλαμβάνουν κυρίως τρηματοφόρα, βρυόζωα, κρινοειδή, κοράλια, θραύσματα απολιθωμάτων και μερικούς πελλίτες. Επομένως, σύμφωνα με τη μέθοδο ονοματολογίας των ασβεστολίθων του R.L. Folk (1959, 1962, 1965) αυτή η βαθμίδα ονομάζεται «διασκορπισμένος Βιομικρίτης».

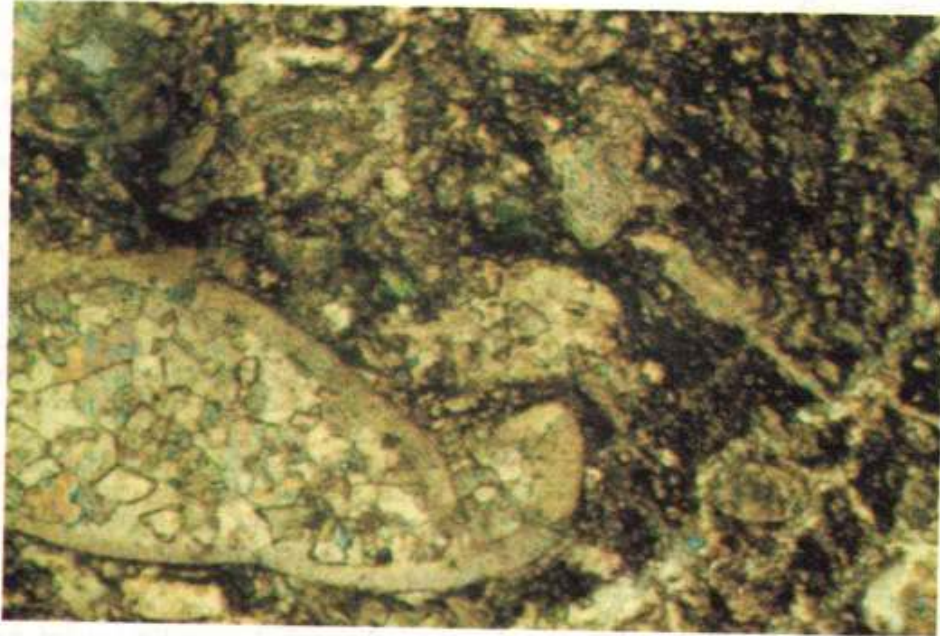
Επίσης παρατηρούνται λίγοι υποεδρικοί έως ολσεδρικοί κρύσταλλοι σιδηρούχου δολομίτη Βλ. εικ. 1.

Βαθμίδα Β. Μακροσκοπικά είναι ένας: «Σκούρος γκρίζος, πολύ λεπτόκοκκος έως λεπτόκοκκος, κρυσταλλικής υφής, συμπαγής μέσα στα στρώματα και μέσοστρωματώδης, υγείης, ελαφρά μεταμορφωμένος, σπαριτικός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, πολύ ισχυρός, υδατοστεγανός»

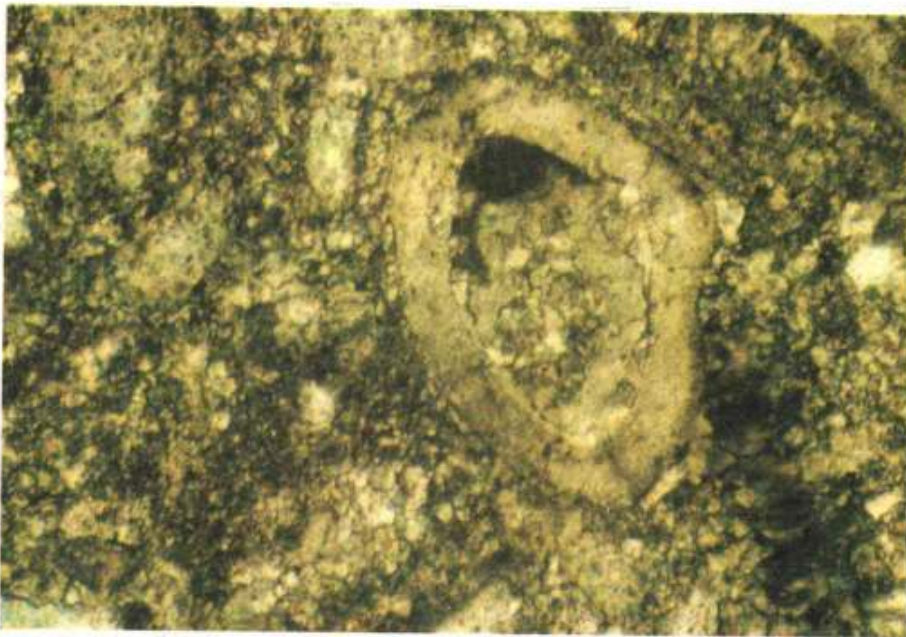
Μικροσκοπικά, αρχίζουν να ξεχωρίζουν οι ελαφρές επιδράσεις της μεταμόρφωσης επαφής τόσο επί της μικρο-υφής όσο και επί της ορυκτολογικής σύνθεσης. Αποτελείται από θραύσματα οστράκων που σχηματίζουν τον σκελετό (διασκορπισμένα αλληλοχημικά) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με μικροσπαριτικό συνδετικό υλικό — 5 έως 15 μικρά που σπάνια φθάνουν τα 30μ.— που προήλθε από ανακρυστάλλωση του μικρίτη.

Σε αυτό το βαθμό μεταμόρφωσης όλα τα αλληλοχημικά αρχίζουν να χάνουν το αρχικό σχήμα τους και την οξυγόνωση των παρυφών ή των συνόρων τους έναντι του συνδετικού υλικού (μήτρα) λόγω της ελαφράς και μερικής ανακρυστάλλωσης. Μόνο τα μεγαλύτερα θραύσματα των οστράκων μπορούν ακόμη να αναγνωρισθούν εύκολα στο μικροσκόπιο.

Αυτή η βαθμίδα καλείται «διασκορπισμένος βιομικροσπαριτής» σύμφωνα με την ορολογία του R.L. Folk. Τα κύρια ορυκτά που αναγνωρίστηκαν ήταν κυρίως ασβεστίτης, επίσης λίγος διοσίδιος, σιλωστονίτης (CaSiO_3), οξείδια του σιδήρου και μερικοί διασκορπισμένοι κρύσταλλοι δολομίτη. Βλ. εικ. 2.



Εικ. 1. Φωτομικρογράφημα της βαθμίδας Α «Διασκορπισμένος βιομικρίτης».



Εικ. 2. Φωτομικρογράφημα της βαθμίδας Β «Διασκορπισμένος βιομικροσπαρίτης».

Βαθμίδα Γ. Μακροσκοπικά, το πέτρωμα αυτής της βαθμίδας είναι ένας: «Σκούρος γαλαζογκρίζος, λεπτόκοκκος, κρυσταλλικής υφής, συμπαγής μέσα στα στρώματα και μεσοστρωματώδης, υγείης, έντονα μεταμορφωμένος, μερικά ανακρυσταλλωμένος ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, ισχυρός, και πολύ χαμηλής υδροπερατότητας».

Κάτω από το μικροσκόπιο, οι επιδράσεις της ανακρυστάλλωσης, αρχίζουν να γίνονται εντονότερες επί της υφής του πετρώματος δείχνοντας καθαρά την μετατροπή των αρχικών μικριτικών και σπαριτικών ασβεστιτικών ορυκτών κόκκων, σε κόκκους μεγαλύτερου μεγέθους (φαινόμενο γνωστό σαν «ανάπτυξη κρυστάλλων»). Αυτή η βαθμίδα καλείται, σύμφωνα με τη μέθοδο ταξινόμησης του R.L. Folk, «ψευδοσπαρίτης». Σε αυτό το βαθμό μεταμόρφωσης, σχεδόν όλα τα αλλοχημικά έχουν έντονα εξαλλοιωθεί ή και ακόμη εξαληφθεί, εκτός μόνο μερικών, των πολύ μεγάλων, των οποίων η ύπαρξη ανιχνεύεται πολύ δύσκολα.

Έχουν παρατηρηθεί μερικοί υποεδρικοί έως οloedρικοί κρυστάλλοι δολομίτη, οι οποίοι σχηματίζουν ένα μεγαλύτερο ποσοστό περιεκτικότητας σε αυτή τη βαθμίδα σχετικά με τις προηγούμενες. Επίσης αναγνωρίστηκε μικρή ποσότητα διοσιδίου, ουωλοστονίτη και οξειδίων του σιδήρου. Βλ. εικ. 3.

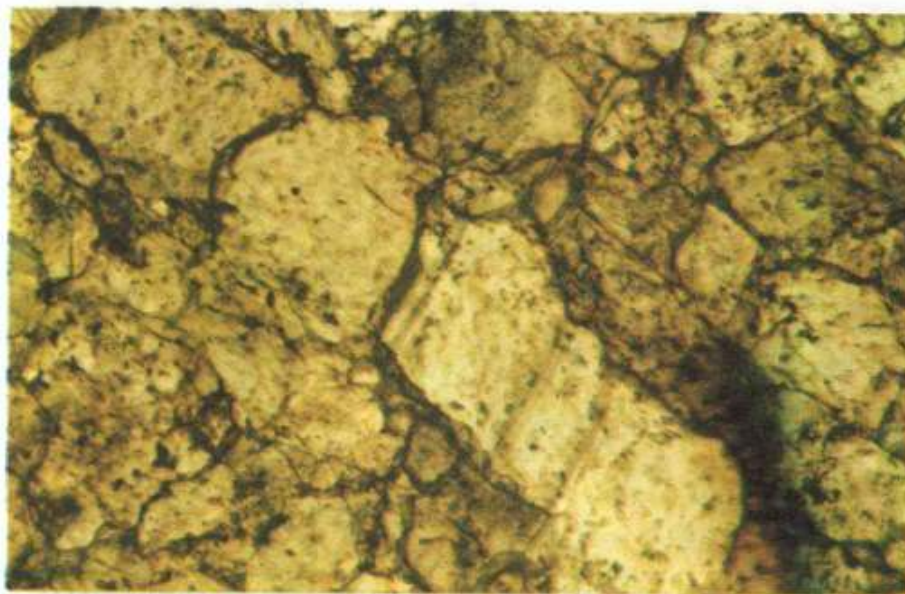
Βαθμίδα Δ. Μακροσκοπικά, αυτή είναι ένας: «Πολύ ανοικτός γαλαζογκρίζος, μεσόκοκκος, κρυσταλλικής υφής, συμπαγής, υγείης, μεταμορφωμένος εξ' επαφής και εντελώς ανακρυσταλλωμένος ασβεστόλιθος ή ΜΑΡΜΑΡΟ, ισχυρός, υδατοστεγανός».

Όπως φαίνεται στις λεπτές τομές, όλοι οι κρυστάλλοι έχουν πλήρως ανακρυσταλλωθεί και αναπτυχθεί, δίνοντας μία χονδρότερη υφή. Το μέσο μέγεθος κόκκων είναι περίπου 1mm και το πέτρωμα ονομάζεται «αρενώδη Μάρμαρο». Τα κύρια ορυκτά συστατικά είναι ο ασβεστίτης με 10% δολομίτη. Επίσης παρατηρούνται μικρές ποσότητες ορυκτά διοσιδίου και ουωλοστονίτη. Βλ. εικ. 4.

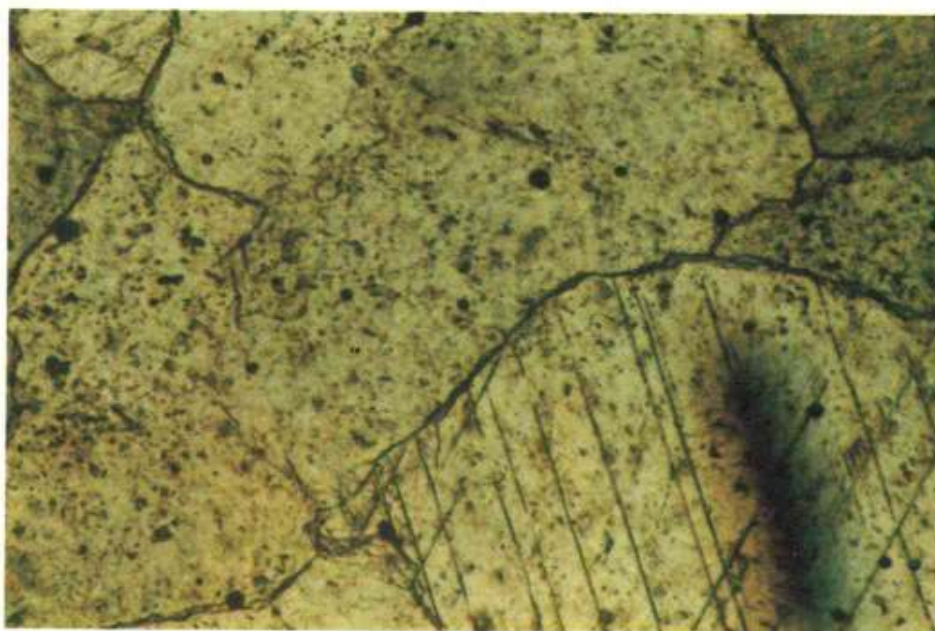
5. ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΠΙ ΠΥΡΗΝΩΝ ΚΑΙ ΑΚΑΝΟΝΙΣΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

5.1. Μέθοδοι δαγματοληψίας και προετοιμασίας

Μετά τον καθορισμό της γεωλογίας και την οριοθέτηση των των διαφόρων ενοτήτων ή επιπέδων της κάθε διαφορετικής βαθμίδας μεταμόρφωσης, στο λατομείο «Longhoughton», συλλέχθηκαν αντιπροσωπευτικά δοκίμια των μεταμορφωτικών βαθμίδων Β, Γ και Δ.



Εικ. 3. Φωτομικρογράφημα της βαθμίδας Γ «Ψευδοσπαρίτης».



Εικ. 4. Φωτομικρογράφημα της βαθμίδας Δ «Αρενώδες μάρμαρο».

Τα δοκίμια του μη μεταμορφωμένου Great Limestone βαθμίδα Α. συλλέχθηκαν από το λατομείο «Mootlaw».

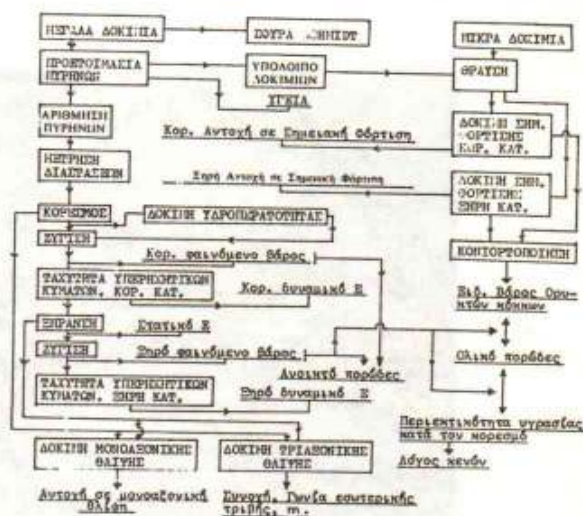
Τα δοκίμια είχαν σχήμα και μέγεθος: α) περίπου παραλληλεπίπεδου ($0.25 \times 0.25 \times 0.20$ m) και β) κομμάτια πετρώματος ακανόνιστου σχήματος (περίπου 6 cm σε διάμετρο). Από αυτά απολήφθηκαν πυρήνες και ακανόνιστου σχήματος δοκίμια για εργαστηριακές δοκιμές. Το διάγραμμα ροής της εργαστηριακής εξέτασης φαίνεται στο σχ. 2.

5.2. Οι δοκιμές κατάταξης επί πυρήνων πετρώματος

Αυτή η ομάδα δοκιμών περιλαμβάνει κυρίως τόσο τον προσδιορισμό όσο και τις μεταβολές λόγω μεταμόρφωσης, των διάφορων φυσικών και σχετικών ιδιοτήτων των τεσσάρων βαθμίδων μεταμόρφωσης του ασβεστόλιθου.

Αυτές είναι: Φαινόμενο βάρος (ξηρό και κορεσμένο), περιεκτικότητα υγρασίας κατά τον κορεσμό, ενεργό και ολικό πορώδες, λόγος κενών, — εκτελέστηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο της I.S. R. M. Anon 1979 — ειδικό βάρος ορυκτών κόκκων — κατά B.S.: 1377:1967 — ταχύτητα υπερηχητικών κυμάτων (ξηρή και κορεσμένη) — κατά Deere et al. (1969), Thill και Peng (1974) — και υδροπερατότητα — κατά T.M.W. Arkroyd (1964).

Ο φαινόμενος όγκος των πυρήνων υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας παχύμετρο μετά βενιέρου, και ο κο-



Σχ. 2. Διάγραμμα ροής της εργαστηριακής εξέτασης.

ρεσμός έγινε σύμφωνα με τη μέθοδο του Deere (1969).

5.3. Φυσικές ιδιότητες

Στον πίνακα 1 φαίνονται τα αποτελέσματα των φυσικών ιδιοτήτων, δείχνοντας ότι οι πυκνότητες καθώς και το ειδικό βάρος των ορυκτών κόκκων αυξάνουν καθώς η μεταμόρφωση γίνεται εντονότερη.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Ιδιότητες «δείκτη» των πυρήνων πετρώματος.

ΒΑΘ- ΜΙΔΑ ΠΕΤΡΩ- ΜΑΤΟΣ	Αριθ. Δοκι- μίων	Ξηρή Φαινόμενη Πυκνότητα	Κορεσμένη Φαινόμενη Πυκνότητα	Ενεργό πορώδες	Ολικό πορώδες	Περιεκτικότητα υγρασίας κατά τον κορεσμό	Ειδικό βάρος ορυκτών κόκκων	Λόγος κενών
		ρ _d gr/cm ³	ρ _{sat} gr/cm ³	N _{eff} %	N %	I.S. %	GS	e %
A	23	2.607	2.608	0.06	0.94	0.02	2.6318	0.95
B	27	2.660	2.668	0.82	1.06	0.31	2.6882	1.07
Γ	24	2.660	2.674	1.39	1.57	0.52	2.7027	1.60
Δ	26	2.692	2.696	0.41	0.98	0.15	2.7186	0.99

5.4. Ταχύτητα υπερηχητικών κυμάτων

Όπως φαίνεται στη παρούσα έρευνα, η δοκιμή αυτή μπορεί να συντελέσει στη ταξινόμηση μεταμορφωμένων ασβεστολίθων σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με το βαθμό μεταμόρφωσής τους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν φορητές μη-καταστροφικές ψηφιακές υπερηχητικές συσκευές (Pundit). Η συσκευή Pundit παράγει υπερηχητικά κύματα με ρυθμό 10 κυμάτων ανά δευτερόλεπτο, συχνότητας 200 KHZ. Εικοσιπέντε έως τριάντα πυρήνες από κάθε βαθμίδα μεταμόρφωσης δοκιμάστηκαν σε ξηρή και κορεσμένη κατάσταση, κάθετα προς τα επίπεδα στρώσης του πετρώματος. Βλ. Πίνακα 2.

διαγράμματος επίσης προσδιορίστηκαν, βλ. Πίνακα 3. Τα προγράμματα του ηλ. υπολογιστή για τα διαγράμματα και τις εξισώσεις παρουσιάζονται στο σχ. 16α, β.

Από τους συντελεστές συσχετισμού συμπεραίνεται ότι, αν και στα διαγράμματα υπάρχει μία εμφανής τάση αλληλοσυσχετισμού των παραμέτρων, δεν μπορεί να προσδιορισθεί, με μεγάλη ακρίβεια, η μία μεταβλητή όταν δίνεται η άλλη. Αυτό μπορεί να αποδοθεί κυρίως στην πολύπλοκη και ταυτόχρονη επίδραση όλων των παραγόντων, όπως της γεωμετρίας των πόρων, της υφής, της ορυκτολογικής σύνθεσης, της πυκνότητας και του πορώδους. Τέλος συμπεραίνεται ότι:

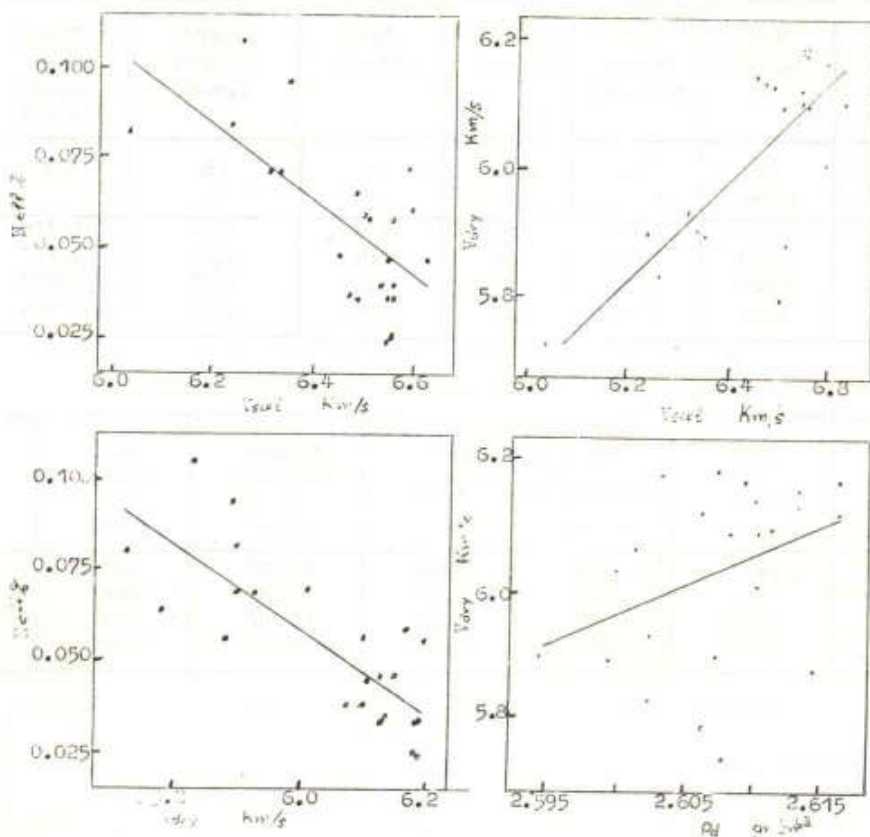
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Μέσες τιμές της ταχύτητας διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων.

ΒΑΘΜΙΔΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	Αριθμός πυρήνων	Εργαστηριακή ταχύτητα υπερηχη- τικών κυμάτων		Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας MN/m ²	Ξηρή Φαινόμενη Πυκνότητα gr/cm ³	Πορώδες %
		Ξηρή κατάσταση Km/sec	Κορεσμένη κατάσταση Km/sec			
A	23	6.044	4.459	9,5×10 ⁴	2.607	0.94
B	27	4.226	5.275	4,7×10 ⁴	2.660	1.06
Γ	24	2.496	3.233	1,7×10 ⁴	2.660	1.57
Δ	26	3.370	5.068	3,1×10 ⁴	2.692	0.98

Τα σχήματα 3,4,5 και 6 δείχνουν διαγράμματα συσχετισμού μεταξύ του: ενεργού πορώδους – ξηρής και κορεσμένης ταχύτητας κυμάτων, ξηρής ταχύτητας – κορεσμένης ταχύτητας κυμάτων, ξηρής ταχύτητας – ξηρής φαινομένης πυκνότητας, ξηρής ταχύτητας – κορεσμένης ταχύτητας κυμάτων, σε κάθε βαθμίδα μεταμόρφωσης του πετρώματος. Τα διαγράμματα αυτά κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας γραφική τεχνική και προγραμματισμό σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη μέθοδο της ανάλυσης γραμμικού συσχετισμού. Οι συντελεστές συσχετισμού των εξισώσεων του κάθε

1. Αύξηση στο βαθμό μεταμόρφωσης επιφέρει μείωση στη ταχύτητα διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων: όσο η ανακρυστάλλωση προχωρεί τόσο η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων μειώνεται. Παρόλα αυτά, η βαθμίδα Γ έδωσε χαμηλότερη ταχύτητα σχετικά με τη Δ, επειδή το πορώδες στη βαθμίδα Γ είναι σχεδόν διπλάσιο της Δ και αυτό έχει τη μεγαλύτερη, σχετικά, επίδραση στη ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων.

2. Στη κάθε βαθμίδα μεταμόρφωσης, η ταχύτητα των κυμάτων αυξάνει με την αύξηση της φαινομένης



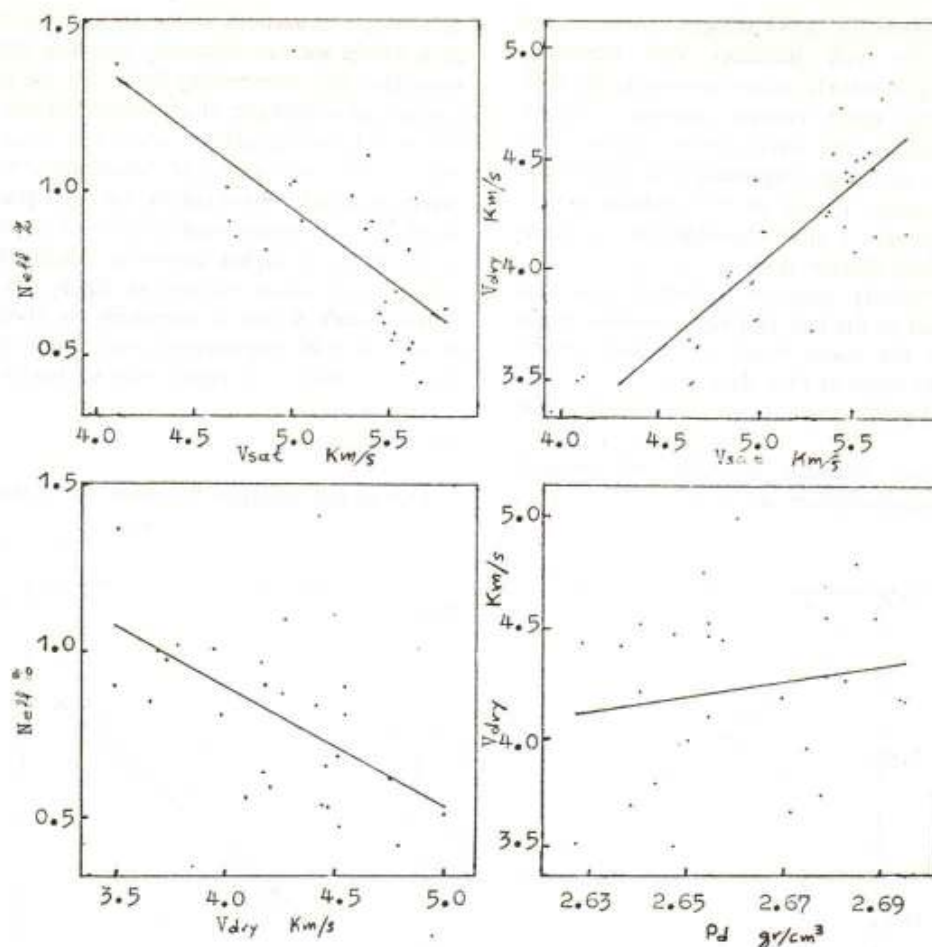
Σχ. 3. BAΘMIA A.

πυκνότητας και τη μείωση του πορώδους. Παράδοξα όμως, όταν συγκρίνεται η φαινόμενη πυκνότητα με τη ταχύτητα των κυμάτων μεταξύ των διάφορων βαθμίδων μεταμόρφωσης, η ταχύτητα των κυμάτων αυξάνει όσο η φαινόμενη πυκνότητα μειώνεται, δείχνοντας έτσι ότι παράγοντες όπως η υφή, η σύνθεση, ο βαθμός ανακρυστάλλωσης και το πορώδες παίζουν ένα πιο σημαντικό ρόλο στη ταχύτητα διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων σε σχέση με την φαινόμενη πυκνότητα αυτής καθεαυτής.

3. Η ταχύτητα αυξάνει κατά το κορεσμό. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι τα υπερηχητικά κύματα μεταδίδονται μέσω των υδατοκορεσμένων πόρων και όχι ακολουθώντας περιφερειακά τις ακμές των πόρων, όπως συμβαίνει στη ξηρή κατάσταση. Σαν αποτέλεσμα, μειώνεται το μήκος της διαδρομής των υπερηχητικών κυμάτων και επομένως αυξάνεται η ταχύτητά τους.

4. Το μέσο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας μειώνεται όσο ο βαθμός μεταμόρφωσης αυξάνει.

5. Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιο πάνω αναφερόμενες παρατηρήσεις συμπεραίνεται τελικά ότι ο πιο σπουδαίος και καθοριστικός παράγοντας για τον τελικό καθορισμό του μεγέθους της ταχύτητας των υπερηχητικών κυμάτων είναι κυρίως το πορώδες. Άλλοι παράγοντες όπως ο ιστός, η υφή, η σύνθεση, η πυκνότητα και ο βαθμός μεταμόρφωσης παίζουν λιγότερο σημαντικό ρόλο. Για παράδειγμα, αν και η βαθμίδα Δ είναι υψηλότερα μεταμορφωμένη από τη βαθμίδα Γ, έχει μεγαλύτερη ταχύτητα υπερηχητικών κυμάτων. Από την άλλη μεριά πάλι, το πορώδες των βαθμίδων Α και Δ, είναι περίπου ίδιο (0,94 και 0,98 αντίστοιχα), αλλά παρόλα αυτά η υπερηχητική ταχύτητα στη βαθμίδα Α είναι μεγαλύτερη λόγω υψηλότερου βαθμού μεταμόρφωσης.



Σχ. 4. ΒΑΘΜΙΑ Β.

5.5. Υδροπερατότητα

Χρησιμοποιήθηκε συσκευή τριαξονικής πίεσης με περιφερειακό κέλυφος μεμβράνης όπως σχεδιάστηκε από τους Hoek και Franklin (1968) για το προσδιορισμό της υδροπερατότητας των αδιατάρακτων κυλινδρικών δοκιμών όλων των βαθμίδων. Εφαρμόστηκε μία πλευρική περιοριστική πίεση των 105 bars για να αποφευχθεί η διαροή μεταξύ των πλευρικών κυλινδρικών τοιχωμάτων και της μεμβράνης, και κύρια πίεση δοκιμής των 63,5 bars. Οι πυρήνες δοκιμάστηκαν κάθετα προς τα επίπεδα στρώσης τους.

Τρεις πυρήνες από κάθε βαθμίδα δοκιμάστηκαν και η μέση τιμή τους φαίνεται στον πίνακα 4.

Τα αποτελέσματα λοιπόν δείχνουν ότι η υδροπερατότητα είναι γενικά πολύ χαμηλή ώστε να μπορεί να θεωρηθεί, τουλάχιστον από πρακτική άποψη, αμελητέα και επομένως όλες οι βαθμίδες μεταμόρφωσης του

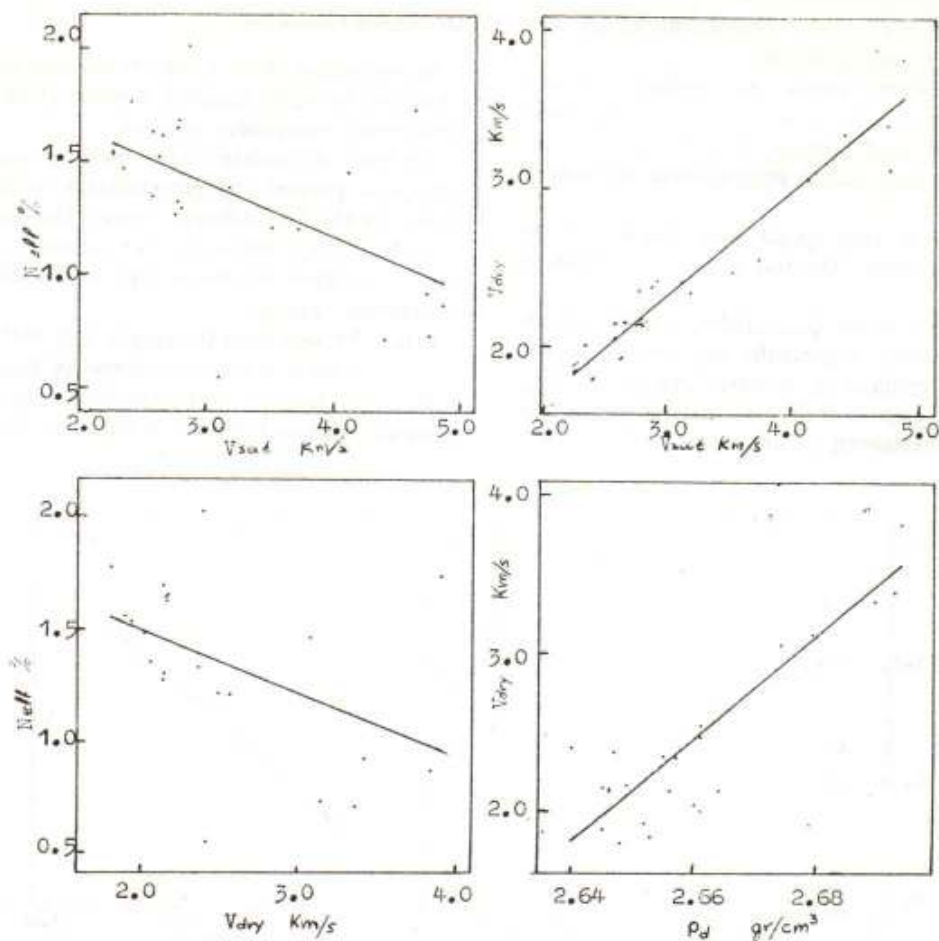
ασβεστόλιθου αυτού, θεωρούμενες σαν υλικά πετρώματος και όχι σαν βραχομάζες, κατατάσσονται στη κατηγορία των υδατοστεγανών υλικών.

5.6. Δοκιμή σφύρας Schmidt

Στη παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε μία σφύρα Schmidt τύπου N για να συσχετισθεί ο αριθμός αναπήδησης της σφύρας (S.H.N.) προς την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (U.C.S.) των τεσσάρων βαθμίδων.

Τουλάχιστον 40 μετρήσεις εκτελέστηκαν σε κάθε μία από τις δύο διευθύνσεις, παράλληλα και κάθετα προς τα επίπεδα στρώσεις, στις τέσσερις διάφορες βαθμίδες. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν, σε τεμάχια πετρώματος στο εργαστήριο. Ο πίνακας 5 δείχνει τα αποτελέσματα του S.H.N. καθώς και της U.C.S. για λόγους σύγκρισης.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο S.H.N. γενικά



Σχ. 5. ΒΑΘΜΙΑ Γ.

μειώνεται με την αύξηση του βαθμού μεταμόρφωσης στο πέτρωμα. Παρόλα αυτά, το κριτήριο αυτό δεν μπορεί να γίνεται πάντα αποδεκτό, γιατί υπάρχουν αρκετοί άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές αυτές, όπως π.χ. ορυκτολογική σύνθεση, ιστός και κυρίως το πορώδες.

Το σχ. 7 δείχνει τη σχέση μεταξύ του, κάθετου στη στρώση S.H.N. και της U.C.S. Είναι προφανές από τη καμπύλη, ότι όσο αυξάνει η U.C.S. τόσο αυξάνει και η σκληρότητα. Παρόλα αυτά θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα του S.H.N. και της U.C.S. δεν πρέπει να συγκρίνονται ευθέως. Ο λόγος είναι ότι κατά τη διάρκεια της θλιπτικής φόρτισης κάποιου δοκιμίου, προσεγγίζεται έργο το οποίο οδηγεί στην ανάπτυξη δυναμικής ενέργειας μέσα στο δοκίμιο που κατόπιν απελευθερώνεται κατά την αστοχία του, ενώ η δοκιμή της σφύρας Schmidt αντανakλά την απόλυτη σκληρότητα χωρίς την ανάπτυξη ενέργειας μέσα στο

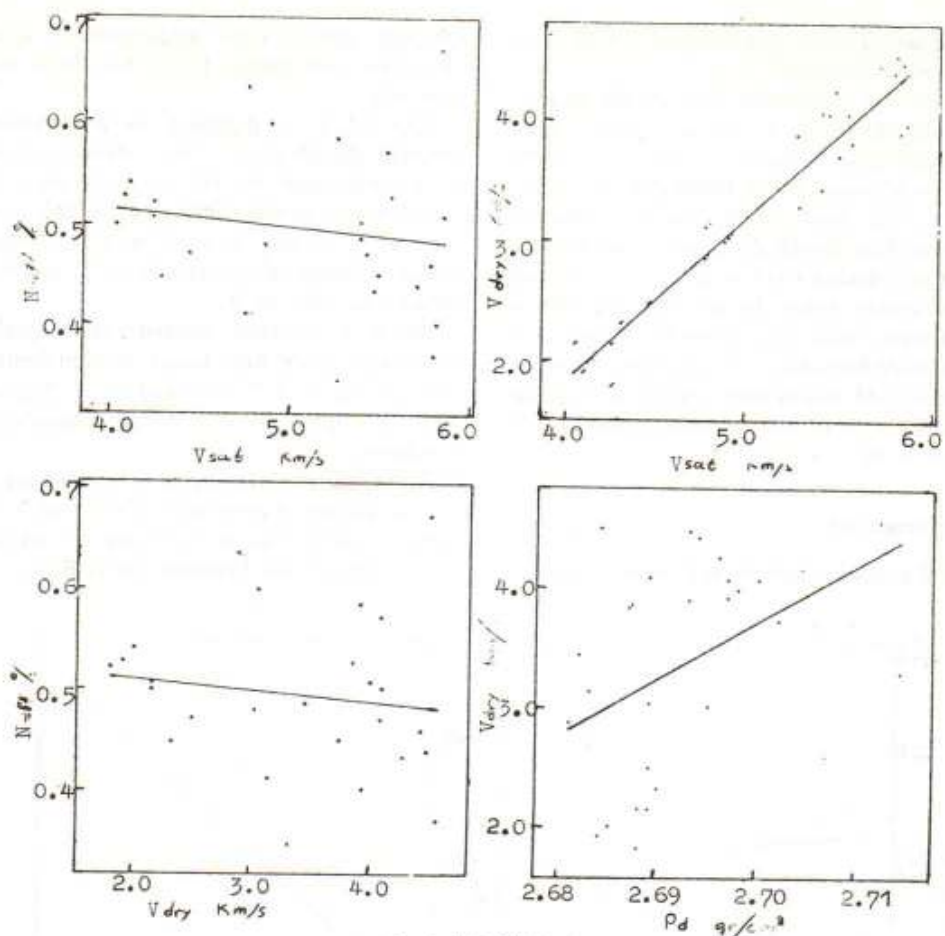
δοκίμιο. Επομένως η δοκιμή της σφύρας πρέπει να θεωρείται μόνο σαν μία πρόχειρη μέθοδος για την εκτίμηση της αντοχής των υλικών και σαν ένα χρήσιμο «εργαλείο» για προκαταρκτική εργασία.

5.7. Δοκιμή σημειακής φόρτισης

Μία συσκευή σημειακής φόρτισης κατασκευασμένη σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό και προτεινόμενες προδιαγραφές των Franklin και Broch (1972) χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα αυτή.

Η δοκιμή αυτή προτείνεται σαν μία πρότυπη δοκιμή για τη ταξινόμηση της αντοχής των υλικών των πετρωμάτων και ως εκ τούτου σαν υποκατάστατο της δοκιμής σε ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη που συνήθως χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό.

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και των δύο αυτών τύπων των δοκιμών δίνονται και συγκρίνονται



Σχ. 6. ΒΑΘΜΙΔΑ Δ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.

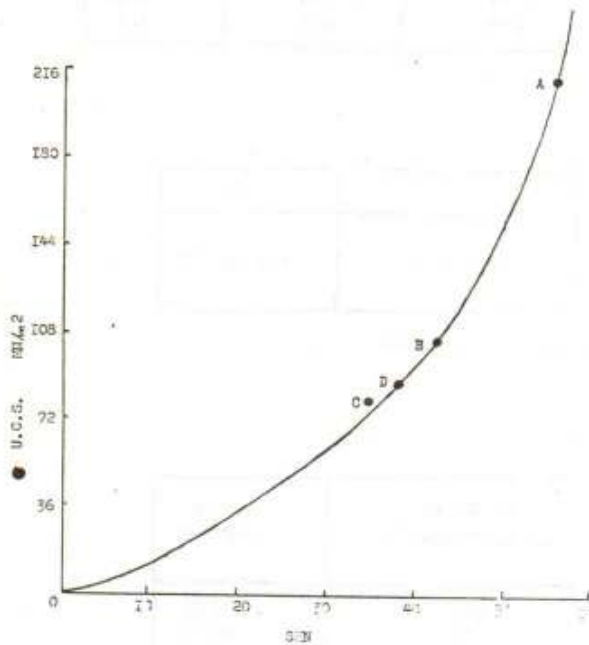
Διάγραμμα	Συντελεστής συσχέτισμού (r^2)				
	Βαθμίδα πετρώματος	A	B	Γ	Δ
	Αριθμός στοιχείων	23	27	24	26
Neff-Vdry	0.62		0.31	0.22	0.02
Neff-Vsat	0.46		0.47	0.32	0.02
Vdry-pd	0.12		0.03	0.69	0.19
Vdry-Vsat	0.57		0.59	0.92	0.93

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.

Βαθμίδα	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής υδροπερατότητας K (cm/sec)	0*	4.92×10^{-11}	8.58×10^{-9}	8.44×10^{-10}
* Δεν υπήρξε καμία παρατηρούμενη μεταβολή στον ογκομετρικό σωλήνα σε χρονικό διάστημα 2 ωρών.				

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.

Βαθμίδα	Αριθμός στοιχείων	Αναπήδηση κάθετα προς τα επίπεδα στρώσης (N)	Παράλληλα προς τα επίπεδα στρώσης (N)	U.C.S. (MN/m ²)
A	43	55,1	58,7	211,20
B	41	42,4	37,5	106,13
Γ	41	34,0	32,4	81,28
Δ	40	37,8	32,6	87,81



Σχ. 7. Σχίσση μεταξύ της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και του αριθμού αναπήδησης (N) της σφύρας Schmidt των τεσσάρων βαθμίδων μεταμόρφωσης του ασβεστόλιθου.

σε δημοσιευμένο άρθρο του Bieniawski 1975 στο οποίο καλό θα ήταν να ανατρέχει κανείς.

Τριάντα περίπου δοκίμια ακανόνιστου σχήματος από κάθε βαθμίδα πετρώματος δοκιμάστηκαν σε ξηρή κατάσταση και τριάντα περίπου σε κορεσμένη.

Για τη μείωση στο ελάχιστο των επιδράσεων του μεγέθους των δοκιμίων, οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε κομμάτια διαστάσεων περίπου 40mm και είχαν λόγους μεγαλύτερης προς μικρότερη διάστασης περίπου 1,0 έως 1,7 (Broch και Franklin 1972, Bieniawski 1975).

Για την πρότυπη ταξινόμηση χρησιμοποιήθηκε ο ανηγμένος δείκτης αντοχής σε σημειακή φόρτιση, $I_s(50)$ ο οποίος προέκυψε από τον I_s διορθώνοντας αυτή τη τιμή προς τη πρότυπη διάμετρο αναφοράς των 50mm χρησιμοποιώντας το νομόγραμμα διόρθωσης.

Τα αποτελέσματα όλων των βαθμίδων σε ξηρή και κορεσμένη κατάσταση παραθέτονται στο πίνακα 6.

Παρατηρείται μία ελάττωση της αντοχής στο κορεσμό. Όλες οι τιμές της αντοχής στο πίνακα είναι σε MN/m² και κάθετες στα επίπεδα στρώσης.

Όταν ο Bieniawski το 1975 προσπάθησε να συσχετίσει τις αντοχές των πετρωμάτων όπως προκύπτουν τόσο με τη δοκιμή σημειακής φόρτισης όσο και με τη μονοαξονική θλίψη, πρότεινε ένα παράγοντα μετα-

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.

Βαθμίδα Πετρώματος	Αριθμός στοιχείων	Κατάσταση	Μέση $I_s(50)$	Παράγοντας μετατροπής από U.C.S. σε $I_s(50)$	Ελάττωση αντοχής στον κορεσμό	Περιγραφή αντοχής (σύμφωνα με τη κατάταξη του Bieniawski)
A	30	Ξηρή	4,90	43,1	19,4%	Υψηλή αντοχή
	30	Κορεσμ.	3,95	48,0		
B	28	Ξηρή	2,37	44,8	3%	Μέτρια αντοχή
	28	Κορεσμ.	2,30	41,1		
Γ	31	Ξηρή	1,79	45,4	37,9%	Χαμηλή αντοχή
	30	Κορεσμ.	1,11	56,7		
Δ	31	Ξηρή	2,21	39,7	3,6%	Μέτρια αντοχή
	30	Κορεσμ.	2,13	35,1		

τροπής ίσο με 24 για την εξίσωση:

$$U.C.S. = 24 \times Is(50)$$

Η έρευνα όμως αυτή εισηγείται ένα μέσο παράγοντα μετατροπής ίσο με 44, σχεδόν διπλάσιο του Bieniawski, προσδιορίζοντας το κίνδυνο της αντικατάστασης της δοκιμής U.C.S. με τη δοκιμή σε σημειακή φόρτηση, σαν μία αξιόπιστη δοκιμή «σχεδιασμού» και ότι η δοκιμή σε σημειακή φόρτηση θα πρέπει να εκτελείται μόνο σαν προκαταρκτική δοκιμή «δείκτη». Αλλά, παρόλαυτά, δείχνει καθαρά ότι η μεταμόρφωση έχει αρνητικές επιδράσεις στην αντοχή του πετρώματος.

6. ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

6.1. Δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των κυλινδρικών δοκιμίων των τεσσάρων βαθμίδων προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας τη συσκευή μονοαξονικής θλίψης θλιπτικής ικανότητας 2.000 KΝ.

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε ξηρούς και κορεσμένους πυρήνες, με άξονα επιβολής φορτίου κάθετα στα επίπεδα στρώσης τους. Ο ρυθμός της επιβολής του θλιπτικού φορτίου ρυθμίστηκε έτσι ώστε να επιτευχθεί αστοχία σε 10-15 λεπτά. Οι διαστάσεις των πυρήνων ήταν όσο το δυνατό πλησιέστερα στα 78×36 mm αλλά παρόλαυτά τα αποτελέσματα των δοκιμών ανήχθησαν στη πρότυπη τιμή του λόγου μήκους: διάμετρο = 2:1, χρησιμοποιώντας τον τύπο διόρθωσης κατά Szlavín 1974.

Οι πυρήνες των πετρωμάτων προετοιμάστηκαν προσεκτικά ώστε να εξασφαλισθεί ότι οι επιβεβλημένες τάσεις εφαρμόστηκαν ομοιόμορφα επί των δοκιμίων. Η δοκιμή εκτελέστηκε σύμφωνα με τη προτεινόμενη διαδικασία για το προσδιορισμό της αντοχής

σε μονοαξονική θλίψη της Διεθνούς Ένωσης Βραχομηχανικής (I.S.R.M.).

Με προσεκτική μακροσκοπική εξέταση στο πέτρωμα στην ύπαιθρο (in-situ) και στα δοκίμια στο εργαστήριο παρατηρήθηκε ότι οι βαθμίδες Α, Β και Γ συχνά διατέμνονται από φλέβες ασβεστίτη οι οποίες, όπως προβλέφθηκε, θα μπορούσαν να δράσουν σαν επιλεκτικά επίπεδα αδυναμίας. Όπου ήταν δυνατό παρασκευάστηκαν δοκίμια έτσι ώστε να μη περιέχουν καθόλου τέτοιες φλέβες. Παρόλαυτά όμως, λόγω της προφανούς ασυνεχούς φύσης μερικών απ' αυτών των φλεβών, προσεκτικός έλεγχος των θραυσμένων δοκιμίων έδειξε ότι μερικές τέτοιες φλέβες ήταν παρούσες σε λίγα από τα δοκίμια. Επίσης η εξέταση των θραυσμάτων επιβεβαίωσε ότι οι επιφάνειες αστοχίας δεν συνέπεσαν με τις φλέβες του ασβεστίτη ούτε στην άμεση περιοχή τους.

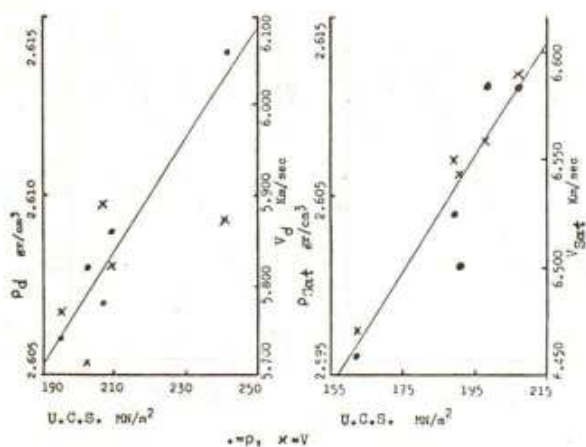
Από παρατηρήσεις στις δοκιμές σημειώθηκε ότι τα δοκίμια της κατώτερης αντοχής, βαθμίδες Γ και Δ, γενικά αστόχησαν κατά μήκος ενός κεκλιμένου επιπέδου αστοχίας, ακολουθώντας το διατμητικό μοντέλο αστοχίας. Τα σχετικά υψηλότερης αντοχής δοκίμια, βαθμίδες Α και Β, αστόχησαν κατά μήκος περισσοτέρων του ενός υπο-αξονικών επιπέδων, αφήνοντας δύο κωνικά θραύσματα στην κορυφή και στη βάση (διπλοί ανεστραμμένοι κώνοι).

Ο Πιν. 7 δείχνει τις μέσες τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, f_c , όπως υπολογίστηκαν από πέντε έως έξι πυρήνες σε ξηρή και κορεσμένη κατάσταση σε κάθε βαθμίδα.

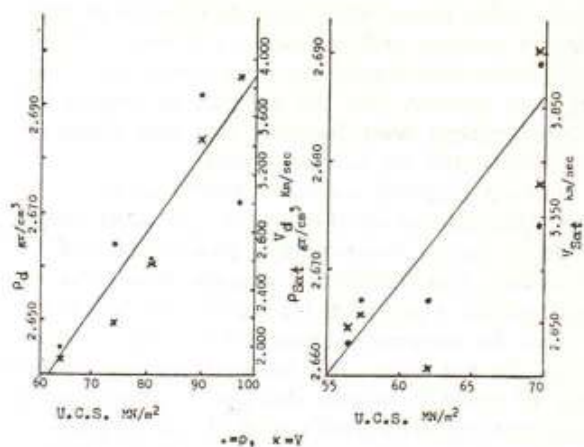
Το σχ. 8 δείχνει το συσχετισμό της U.C.S. με τη φαινόμενη ξηρή και κορεσμένη πυκνότητα, ξηρή και κορεσμένη ταχύτητα υπερηχητικών κυμάτων όπως προέκυψαν από πυρήνες της κάθε βαθμίδας. Τα διαγράμματα δείχνουν καθαρά, ότι όσο η (φαινόμενη) πυκνότητα και η ταχύτητα υπερηχητικών κυμάτων αυξάνουν τόσο και η U.C.S. αυξάνει.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.

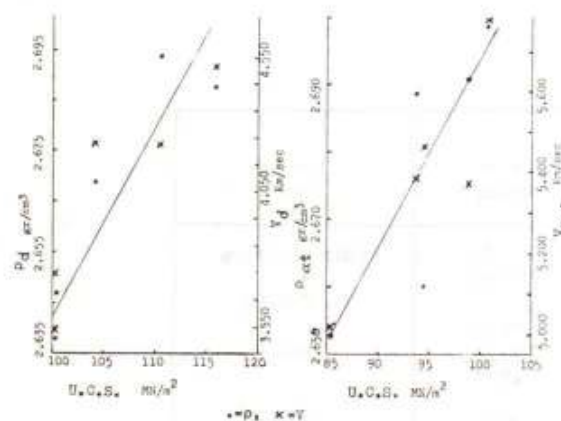
Βαθμίδα Πετρώματος	Αριθμός των δοκιμα- σμένων πυρήνων	Κατάσταση	f_c σε MN/m ²	Όρος αντοχής
Α	5	Ξηρή	211,20	Εξαιρετικά ισχυρό
	5	Κορεσμ.	189,70	
Β	5	Ξηρή	106,13	Πολύ ισχυρό
	5	Κορεσμ.	94,59	
Γ	5	Ξηρή	81,28	Ισχυρό
	5	Κορεσμ.	62,95	
Δ	5	Ξηρή	87,81	Ισχυρό
	6	Κορεσμ.	74,77	



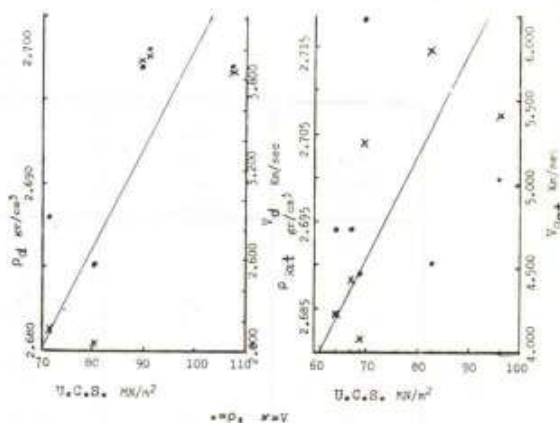
Σχ. 8. BAΘMIDA A.



Σχ. 8. BAΘMIDA Γ.



Σχ. 8. BAΘMIDA B.



Σχ. 8. BAΘMIDA Δ.

Τέλος φάνηκε ότι η U.C.S. εξαρτάται κατά κάποιο βαθμό από το μέγεθος του δοκιμίου, δηλ. τον λόγο μήκος: διάμετρο, περιεκτικότητα υγρασίας, ρυθμό επιβολής του φορτίου, το βαθμό ομαλότητας και στίλβωσης τόσο των φερουσών πλακών όσο και των επιφανειών των δοκιμίων και άλλους παράγοντες που εξαρτώνται καθαρά από αυτά καθεαυτά τα δοκίμια και τη φύση των συμπαγών ορυκτών κόκκων μέσα στο υλικό του πετρώματος.

Επίσης άλλοι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν αυτή τη δοκιμή είναι η φύση, το σχήμα και το μέγεθος των κενών μεταξύ των ορυκτών συναθροίσεων που συνθέτουν το υλικό του πετρώματος, αλλά και η απουσία ραγισμάτων, ρωγμών, ραφών, ορυκτών φλε-

βών και άλλων επιπέδων αδυναμίας μέσα στα δοκίμια του πετρώματος.

Παρόλα αυτά ένα γενικό συμπέρασμα, το οποίο προκύπτει από αυτή τη δοκιμή είναι ότι όσο αυξάνεται ο βαθμός μεταμόρφωσης τόσο η UCS ελαττώνεται. Αυτό θεωρείται ότι συμβαίνει κυρίως λόγω της ορυκτολογικής ανάπτυξης, η οποία λαμβάνει μέρος με την εξέλιξη της μεταμόρφωσης. Παρόλα αυτά όμως, το πορώδες έχει μια κυριαρχική επίδραση στα αποτελέσματα της δοκιμής. Αυτό γίνεται περισσότερο εμφανές στην περίπτωση της βαθμίδας Γ, όπου, αν και το μέγεθος των κρυστάλλων της είναι κάπως μικρότερο από αυτό της βαθμίδας Δ, η UCS της βαθμίδας Γ είναι ελαφρά χαμηλότερη από αυτή της βαθμί-

δας Δ, δείχνοντας ευκρινώς ότι η μικρή αύξηση του πορώδους επέφερε μεγαλύτερες επιδράσεις στη UCS, απ' ότι η αύξηση του μεγέθους των κρυστάλλων. Τέλος θεωρείται ότι, εάν δεν υπήρχε καμία διαφορά στο πορώδες μεταξύ των βαθμίδων Γ και Δ, τότε η U.C.S. της βαθμίδας Δ, θα ήταν μικρότερη από αυτή της βαθμίδας Γ.

6.2. Δοκιμή συμπεριφοράς τάσης — παραμόρφωσης

Αυτή η δοκιμή εκτελέστηκε για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας Young και του λόγου Poisson, καθώς επίσης για να μελετηθεί τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης τόσο των μεταμορφωμένων ασβεστόλιθων όσο και του μη μεταμορφωμένου κάτω από συνθήκες κυκλικής φόρτισης.

Το στατικό μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson προκύψαν χρησιμοποιώντας, γραμμικής ηλεκτρικής αντίστασης, μηχανισιόμετρα προσκολλημένα επί των πιο λείων τμημάτων των κυλινδρικών επιφανειών των δοκιμίων. (Χρησιμοποιήθηκαν δύο κατακόρυφα και δύο οριζόντια ηλεκτρικά μηχανισιόμετρα σε κάθε πυρήνα.

Δύο πυρήνες από κάθε βαθμίδα δοκιμάστηκαν και υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές τους. Τα μηχανισιόμετρα προσκολλήθηκαν στο μέσο του ύψους των δοκιμίων έτσι ώστε οι επιδράσεις των άκρων τους ελαττώθηκαν στο ελάχιστο. Οι παραμορφώσεις προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας ευαίσθητους ψηφιακούς μετρητές παραμόρφωσης. Καταγράφηκαν τόσο οι αξονικές (E_y) όσο και οι πλευρικές (E_x) παραμορφώσεις σε διάφορα επίπεδα τάσεων, υποβάλλοντας τα δοκίμια στα κατάλληλα φορτία σε μία συσκευή θλίψης. Μελετήθηκαν τρεις κύκλοι φόρτισης και αποφόρτισης σε κάθε δοκίμιο.

Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης σχεδιάστηκαν σε κάθε βαθμίδα (βλ. σχ. 9). Το στατικό εφαπτομενικό και διατέμνον μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson υπολογίστηκαν σε τάσεις ίσες με το 50% της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη της κάθε βαθμίδας (βλ. πίνακα 8). Επίσης υπολογίστηκε ο λόγος Poisson (ν) και φαίνεται στο πίνακα 8.

6.2.1. Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων της δοκιμής συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης

Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης, υποδεικνύουν καθαρά την επίδραση της μεταμόρφωσης επί της ελαστικής συμπεριφοράς του ασβεστόλιθου. Το σχ. 9 δείχνει ότι οι καμπύλες υστέρησης σαν αποτέλεσμα της κυκλικής φόρτισης και αποφόρτισης, έχουν διευρυνθεί — ειδικά εκείνες που αντιπροσωπεύουν τη πλευρική παραμόρφωση (E_x) — όταν ο βαθμός μεταμόρφωσης αυξάνει.

Η παραμένουσα παραμόρφωση (δηλ. η μη επανερχόμενη παραμόρφωση ή «πλαστική») η οποία συνήθως σχηματίζεται στο τέλος του πρώτου κύκλου στα υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης δοκίμια πετρώματος (βαθμίδες Γ και Δ), ελαττώνεται στους ακόλουθους κύκλους υπό την επίδραση της συμπύκνωσης του πετρώματος λόγω του εφαρμοζόμενου φορτίου. Αυτή η μεταβολή επίσης επηρεάζει τις τιμές του λόγου Poisson και του μέτρου του Young. Γι' αυτό το λόγο, οι ελαστικές σταθερές πάντα μετρήθηκαν και υπολογίστηκαν κατά το δεύτερο κύκλο φόρτισης και αποφόρτισης. Τα αποτελέσματα έδειξαν καθαρά επίσης, την αύξηση του εφαπτομενικού (E_t) και διατέμνοντος (E_s) μέτρου ελαστικότητας όταν ο βαθμός μεταμόρφωσης μειώνεται. Το μάρμαρο (βαθμίδα Δ) έδωσε παρόλαυτά υψηλότερο μέτρο, πιθανώς σαν συνέπεια της αναδιάταξης των ορυκτών κόκκων λόγω της ολικής ανακρυστάλλωσης. Αυτό παρήγαγε μία κοντινότερη διάταξη των κρυστάλλων του πετρώματος.

6.3. Κριτήριο αστοχίας των πετρωμάτων και τριαξονική δοκιμή με καθορισμό της παραμέτρου m

Η αντοχή του υλικού του πετρώματος έχει χρησιμοποιηθεί από τους Hoek και Brown (1980) σαν βάση για ένα κριτήριο αστοχίας της βραχομάζας. Βασίζόμενοι στην εμπειρία τους, τόσο από θεωρητικής όσο και πειραματικής άποψης επί της συμπεριφοράς των πετρωμάτων, ανέπτυξαν, με τη μέθοδο της πειραματικής απόδειξης, την ακόλουθη εμπειρική σχέση μεταξύ των κύριων τάσεων που συσχετίζονται με την αστοχία ενός πετρώματος:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + S \sigma_c^2)^{1/2} \quad (1)$$

όπου:

σ_1 = η Μέγιστη κύρια τάση κατά την αστοχία

σ_3 = η ελάχιστη κύρια τάση που εξασκείται στο δοκίμιο

σ_c = η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του ακέραιου πετρώματος.

Η παράμετρος m , φαίνεται ότι μεταβάλλεται ανάλογα με το τύπο του πετρώματος, τη γωνία τριβής μεταξύ των κόκκων ή τεμαχίων του πετρώματος, και το βαθμό της αλληλοεμπλοκής των κόκκων μέσα στη μάζα του πετρώματος.

Η παράμετρος S , φαίνεται ότι εξαρτάται από το βαθμό κατά τον οποίο το πέτρωμα έχει σπάσει πριν υποβληθεί στις τάσεις σ_1 και σ_3 .

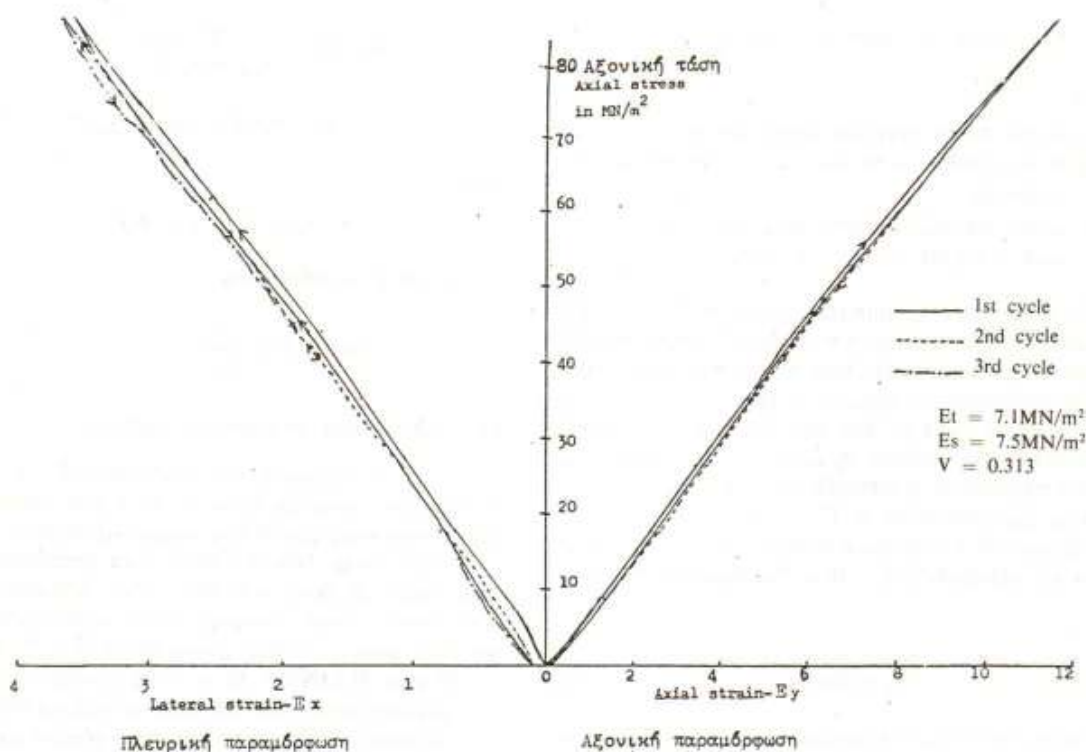
Αυτή η σχέση μπορεί να αντιπροσωπευθεί γραφικά υπό την έννοια ενός διαγράμματος όπως δείχνεται στο σχ. 10α. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη κάποιου δοκιμίου δίνεται με αντικατάσταση του σ_3 ίσο με μηδέν στην εξίσωση (1):

$$\sigma_{cs} = (S \cdot \sigma_c^2)^{1/2} \quad (2)$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.

Βαθμίδα	Στατικό μέτρο Young* MN/m ²		Λόγος Poisson (V)	Εναπομείνουσα αξονική παραμόρφωση στο τέλος του 3ου κύκλου $\times 10^{-4}$
	Εφαπτομενικό	Διατέμνων		
A	7.1×10^4	7.5×10^4	0.313	0.1
B	4.7×10^4	3.2×10^4	0.181	4.8
Γ	3.4×10^4	1.7×10^4	0.262	17.4
Δ	5.7×10^4	3.7×10^4	0.253	4.5

* Τα στοιχεία αντιστοιχούν σε φορτίσεις κάθετες στα επίπεδα στρώσεις.



Σχ. 9. ΒΑΘΜΙΔΑ Α.

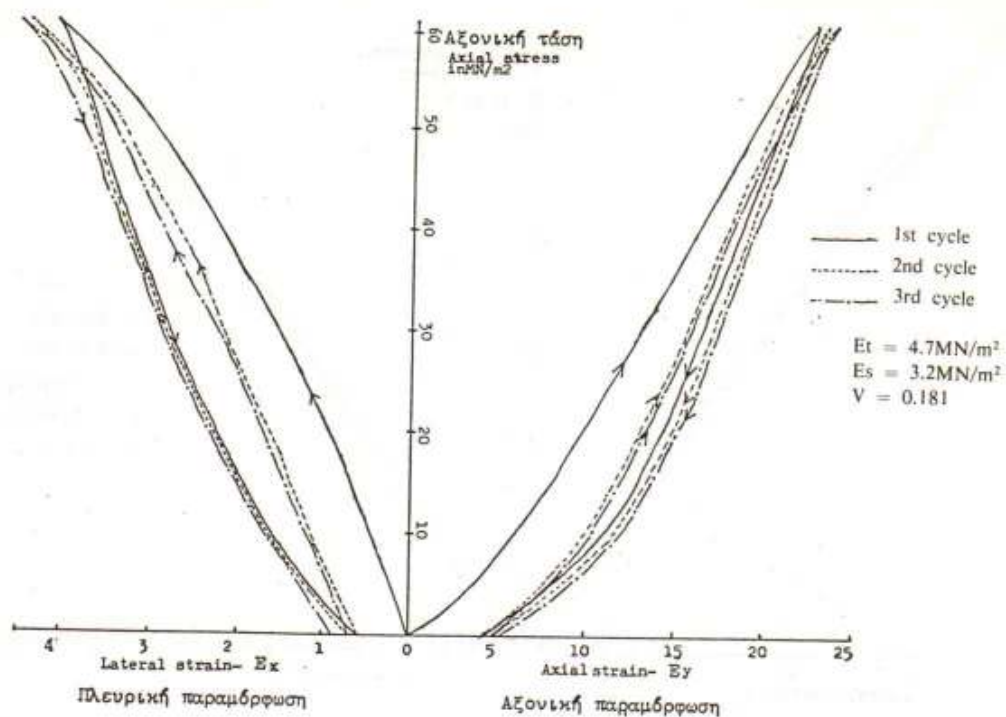
Για το ακέραιο πέτρωμα $\sigma_c S = \sigma_c$ (επειδή το S ισούται με 1).

Εκτός από τη σχέση μεταξύ των μέγιστων κυρίων και ελάχιστων κυρίων τάσεων κατά την αστοχία, μερικές φορές εξυπηρετεί να εκφράζεται το κριτήριο αστοχίας από την άποψη των διατμητικών και κάθετων τάσεων, που εξασκούνται επί εός κεκλιμένου επιπέδου υπό γωνία β προς τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης, όπως απεικονίζεται στο σχ. 10β.

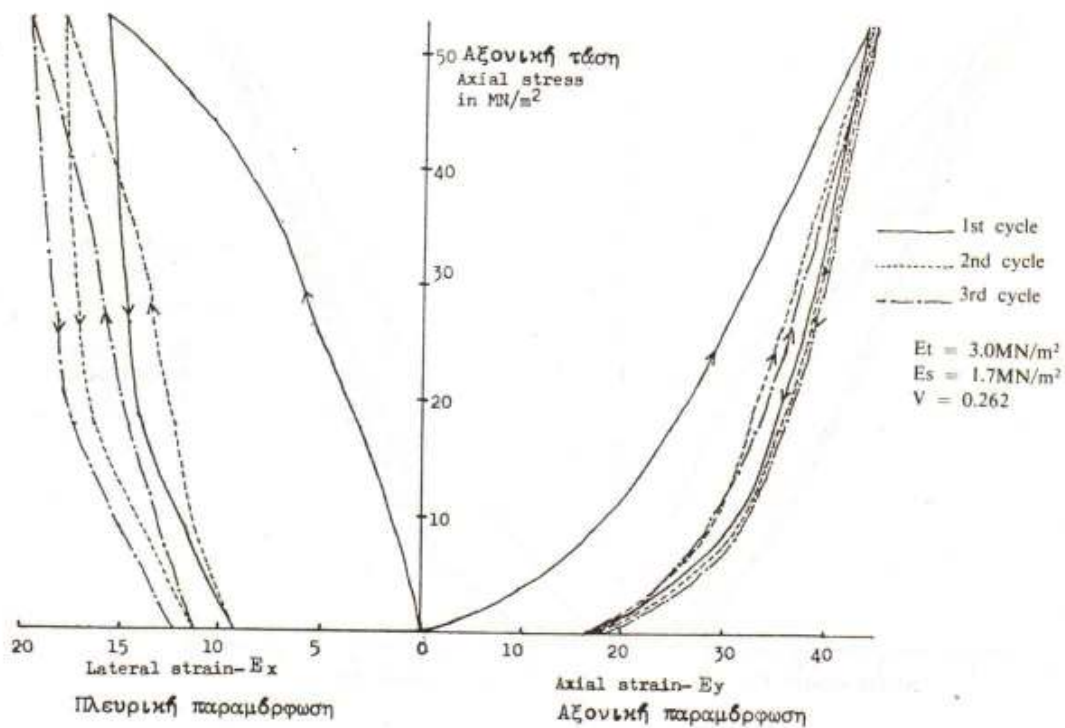
Όταν η γωνία β του επιπέδου αστοχίας είναι γνω-

στή, οι διατμητικές και κάθετες τάσεις τ και σ , μπορούν να καθοριστούν αμέσως από τις εξισώσεις που δίνονται κάτω από το σχ. 10 β.

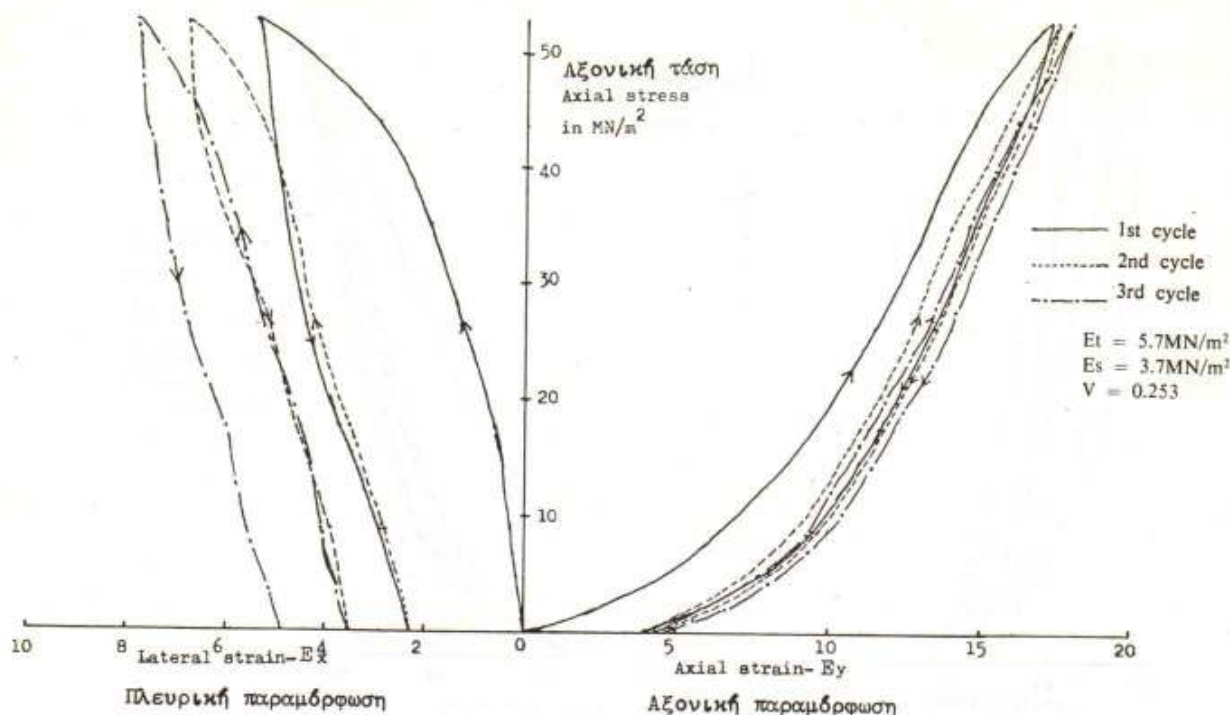
Όταν ένα ισотροπικό δοκίμιο υπόκειται σε τριαξονική θλίψη, γίνεται συνήθως η παραδοχή ότι η σχέση μεταξύ της διατμητικής αντοχής τ και της κάθετης τάσης σ καθορίζεται από την περιβάλλουσα (envelope) της ομάδας των κύκλων του Mohr, που αντιπροσωπεύουν τις κύριες τάσεις κατά την αστοχία. Κάτω από τις συνθήκες αυτές γίνεται η παραδοχή ότι η γωνία β



Σχ. 9. ΒΑΘΜΙΑ Β.



Σχ. 9. ΒΑΘΜΙΑ Γ.



Σχ. 9. ΒΑΘΜΙΑ Δ.

του επιπέδου αστοχίας καθορίζεται από τη κάθετο προς τη περιβάλλουσα του Mohr όπως απεικονίζεται στο σχ. 10γ. Αλλά παρόλ' αυτά, η παραδοχή αυτή είναι πιθανώς μία υπεραπλοποίηση. Έχει όμως συμπεριληφθεί στη συζήτηση αυτή λόγω της ιστορικής της σπουδαιότητας στη βιβλιογραφία και επίσης επειδή πραγματικά δίνει ένα προσεγγιστικό οδηγό ως προς την κλίση της επιφάνειας ή των επιφανειών αστοχίας κάτω από ορισμένες συνθήκες τάσεων.

Ο Balmer παρήγαγε μία γενική σχέση μεταξύ των διατμητικών και κάθετων τάσεων και των κυρίων τάσεων στις οποίες παρουσιάζεται η αστοχία ενός ισοτροπικού δοκιμίου πετρώματος.

Αντικατάσταση της εξίσωσης (1) στην εξίσωση του Balmer δίνει:

$$\sigma = \sigma_3 + \frac{Tm^2}{Tm + m \cdot \sigma_c / 8} \quad (3)$$

$$T = (\sigma - \sigma_3) \cdot (1 + m \cdot \sigma_c / 4Tm)^{1/2} \quad (4)$$

όπου:

$$Tm = 1/2 (\sigma_1 - \sigma_3)$$

η γωνία β καθορίζεται από τη σχέση:

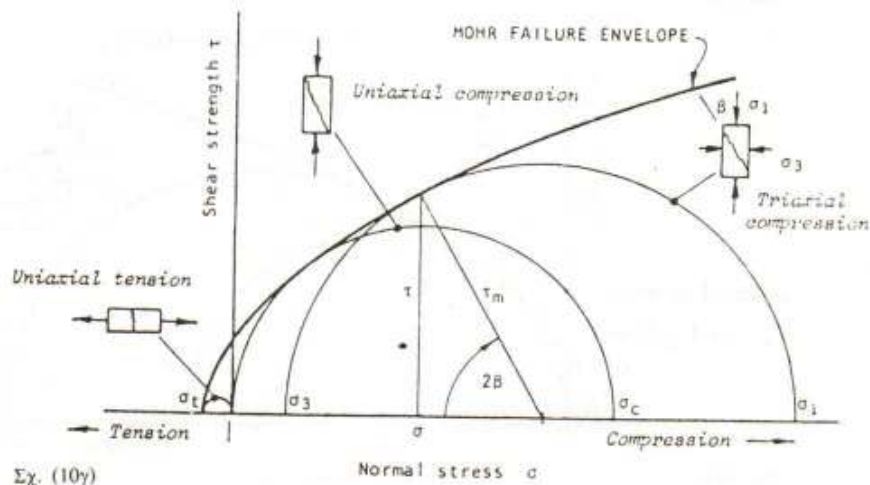
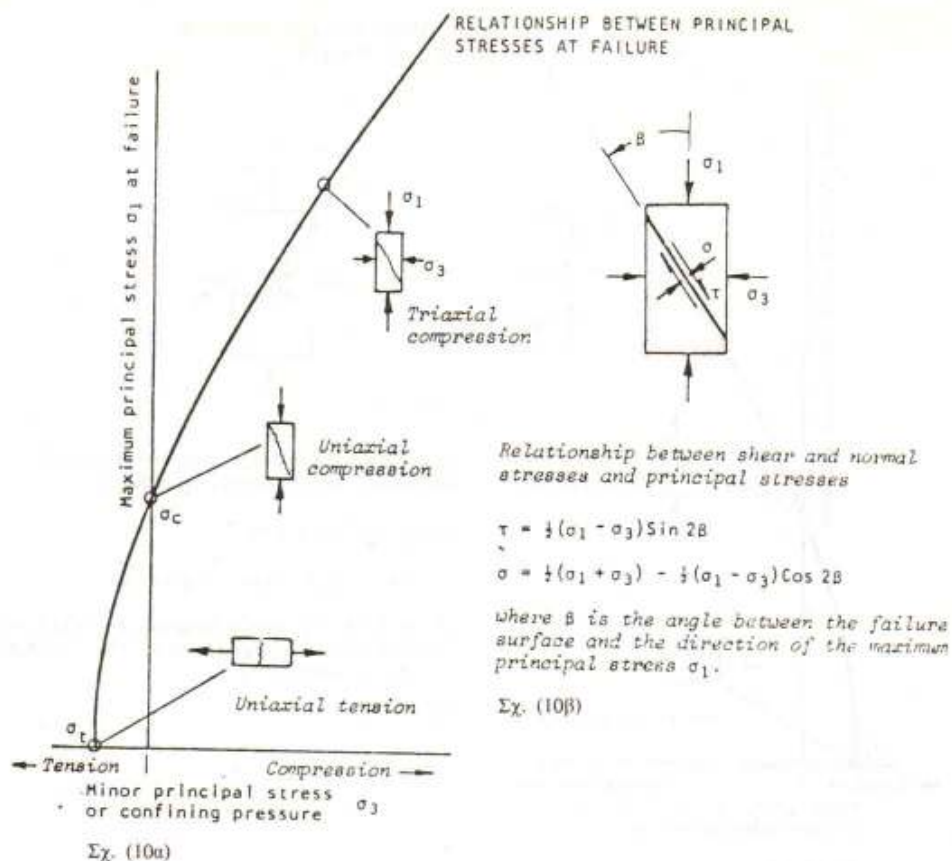
$$\eta \mu 2\beta = \tau / Tm$$

6.3.1. Τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια ακέραιου πετρώματος

Εκτελέστηκαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης στις τέσσερις βαθμίδες πετρώματος χρησιμοποιώντας συσκευή τριαξονικής θλίψης τύπου Hoek, σύμφωνα με τη προτεινόμενη μέθοδο της Διεθνούς Ένωσης βραχομηχανικής.

Δοκιμάστηκαν πέντε έως επτά κυλινδρικά δοκίμια 76mm × 38mm από τη κάθε βαθμίδα σε κορεσμένη και ξηρή κατάσταση, φορτίζοντάς τα κάθετα προς τα επίπεδα στρώσης και εφαρμόζοντας πλευρικές πιέσεις 2.5, 5, 10, 15, 20, 25 και 30 MN/m². Προκειμένου να καθοριστούν οι παράμετροι της διατμητικής αντοχής, δηλ. η γωνία εσωτερικής τριβής (φ) και η συνοχή (c), τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται γραφικά με τη βοήθεια κύκλων του Mohr, σχ. 11.

Το σχήμα αυτό δείχνει ότι η περιβάλλουσα του Mohr είναι γραμμική· πιθανώς λόγω της ισχυρής αντοχής των πετρωμάτων και της χαμηλής πλευρικής πίεσης που εφαρμόστηκε στους πυρήνες σε σχέση με τη κατακόρυφη κύρια τάση. Από τα διαγράμματα του Mohr προκύπτει φανερά ότι η διαφορά των μεγίστων και ελαχίστων κυρίων τάσεων είναι μία μεταβλητή που σχετίζεται ευθέως προς το τύπο του υλικού και συνεπώς προς την αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη.

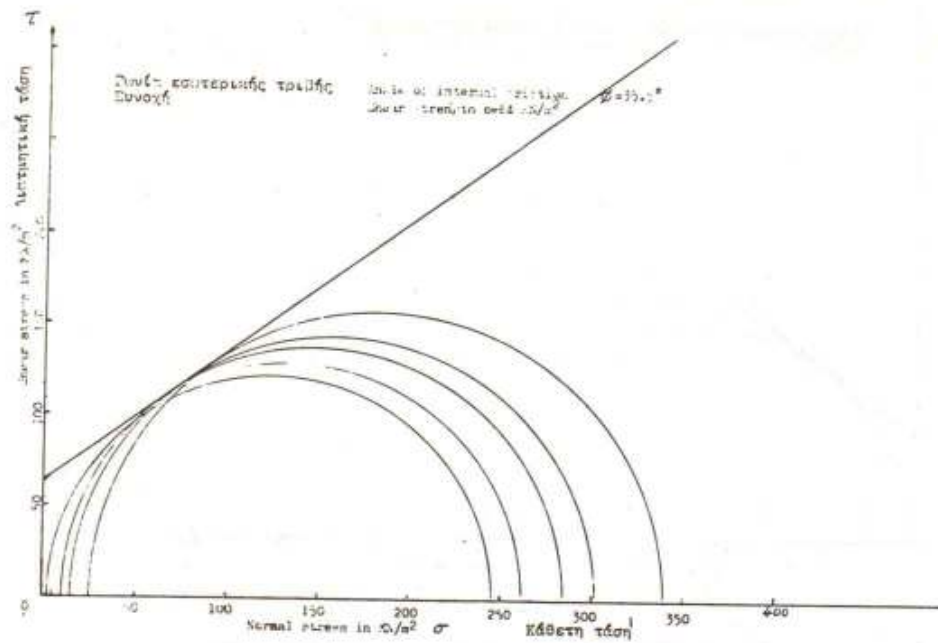


Σχ. 10α,β,γ. Γραφική παράσταση των συνθηκών των τάσεων κατά την αστοχία άθικτου πετρώματος.

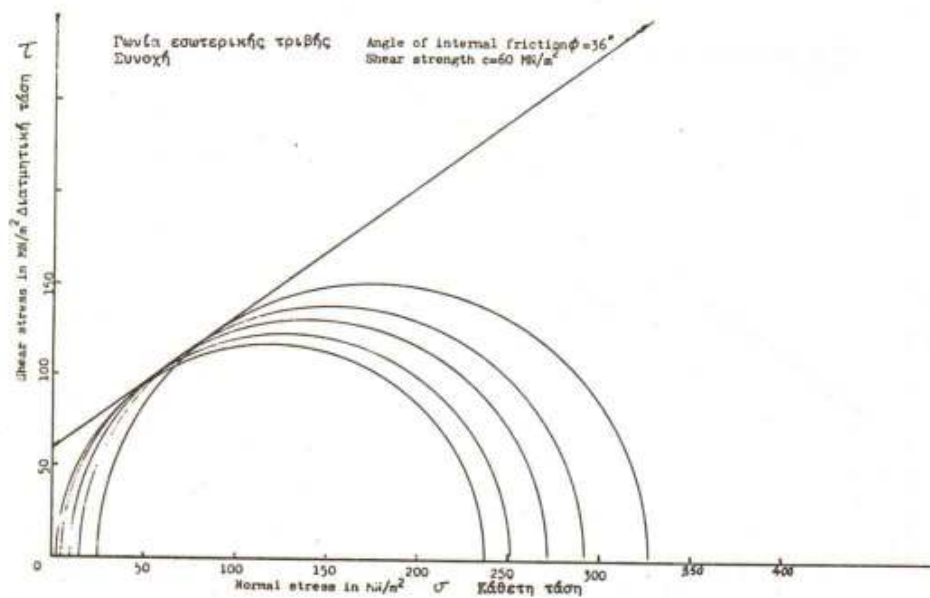
Η γραφικά υπολογισμένη συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής καθώς και οι τιμές της παραμέτρου, m , της αντοχής φαίνονται στο πίνακα 9.

Τα αποτελέσματα απεικονίστηκαν διαγραμματικά.

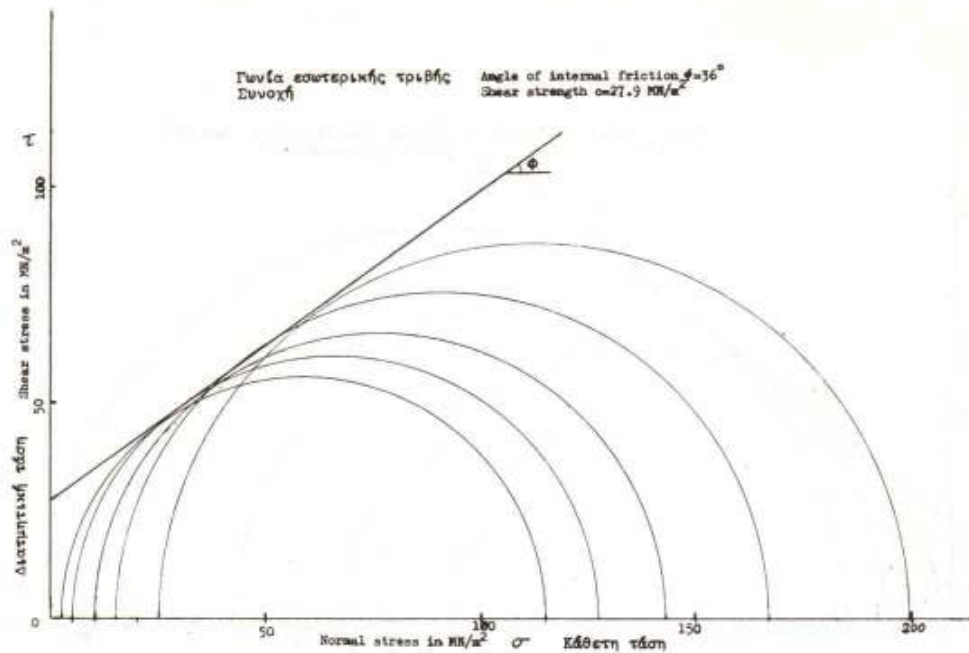
σχ. 12, δείχνοντας ένα συσχετισμό μεταξύ της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής. Στο σχ. 13 απεικονίζονται οι παράμετροι της διατμητικής αντοχής έτσι ώστε η συνοχή αντιπροσωπεύεται στο κατα-



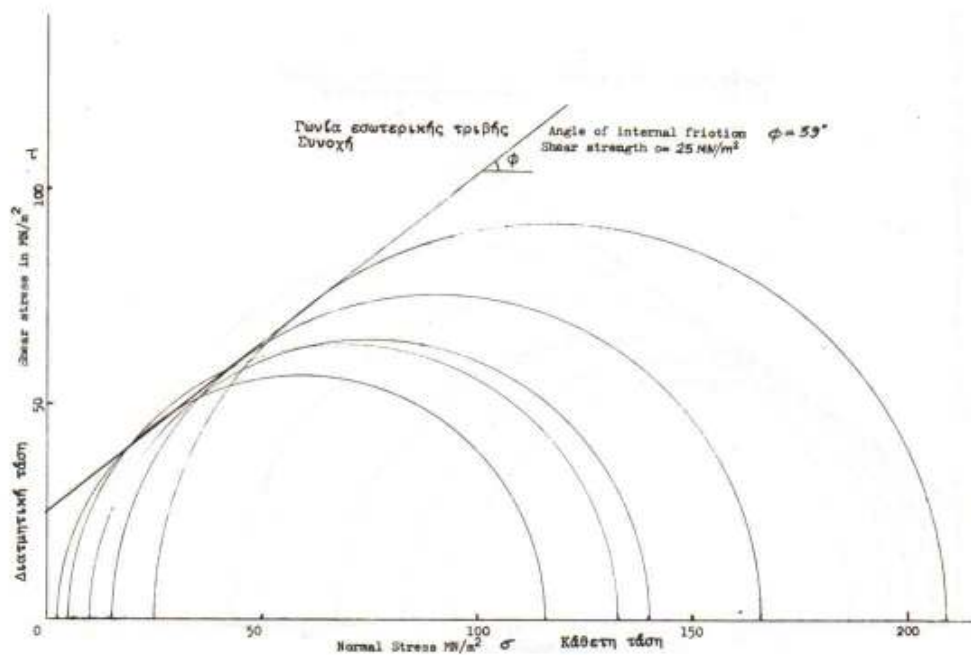
Σχ. 11. Κύκλοι και περιβάλλουσα του Mohr της βαθμίδας Α (ξηρή κατ.).



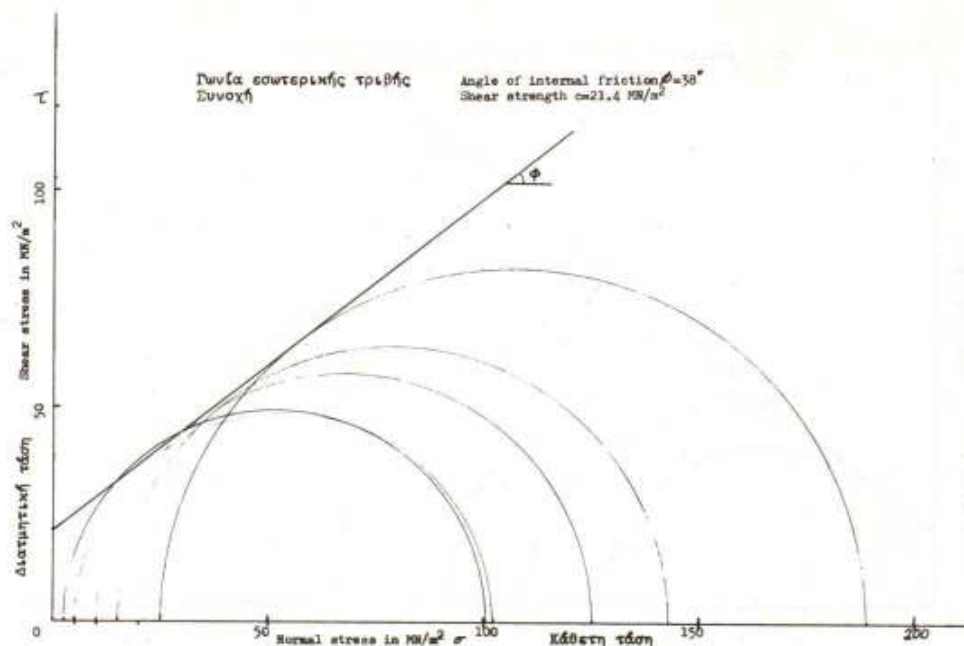
Σχ. 11. Κύκλοι και περιβάλλουσα του Mohr της βαθμίδας Α (κορ. κατ.).



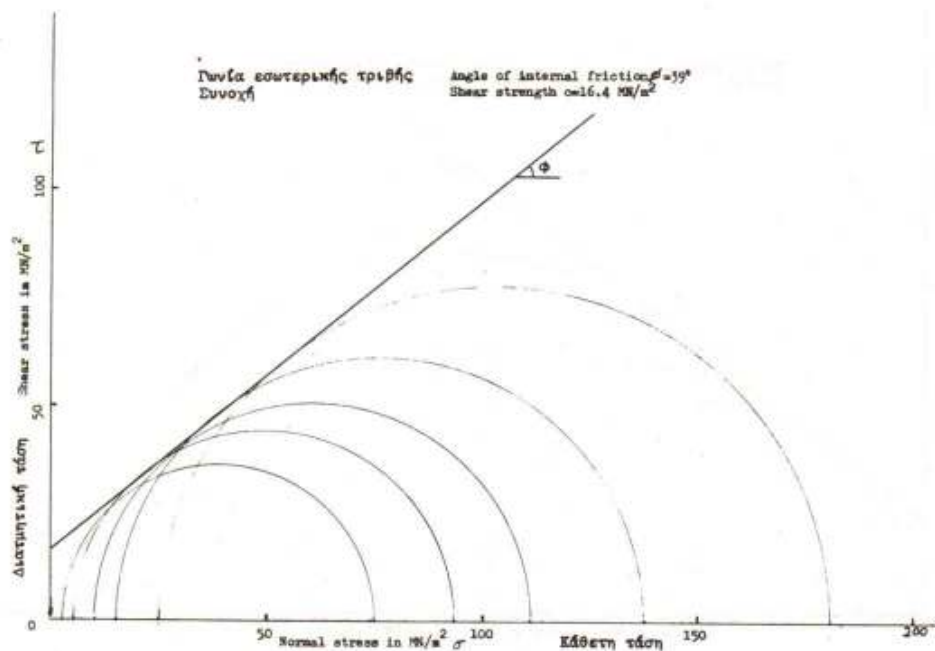
Σχ. 11. Κύκλοι και περιβάλλουσα του Mohr της βαθμίδας B (ξηρή κατ.).



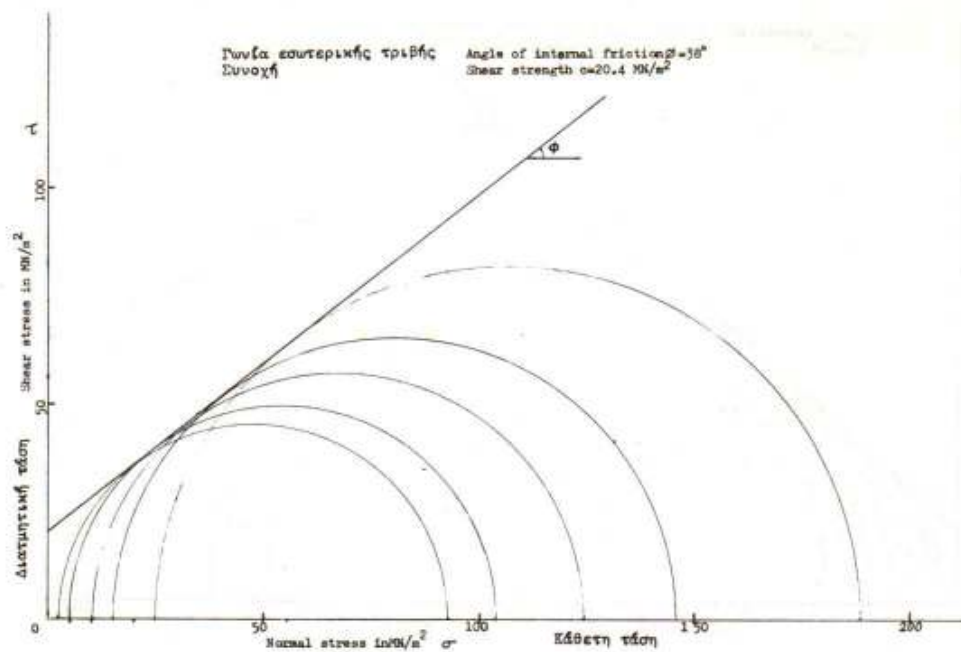
Σχ. 11. Κύκλοι και περιβάλλουσα του Mohr της βαθμίδας B (κορ. κατ.).



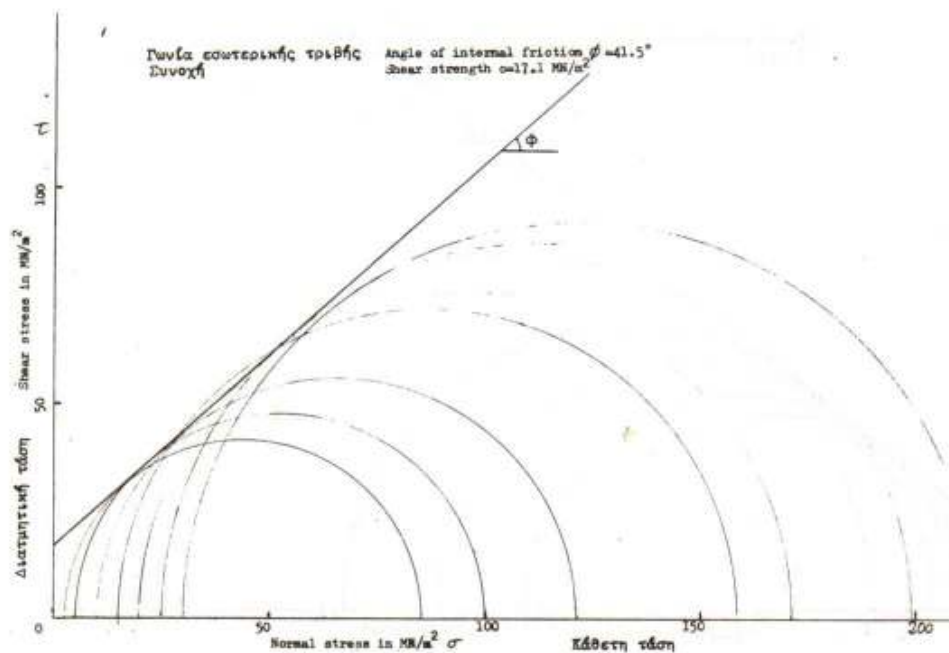
Σχ. 11. Κύκλοι και περιβάλλουσα του Mohr της βαθμίδας Γ (γρηή κατ.).



Σχ. 11. Κύκλοι και περιβάλλουσα του Mohr της βαθμίδας Γ (κορ. κατ.).



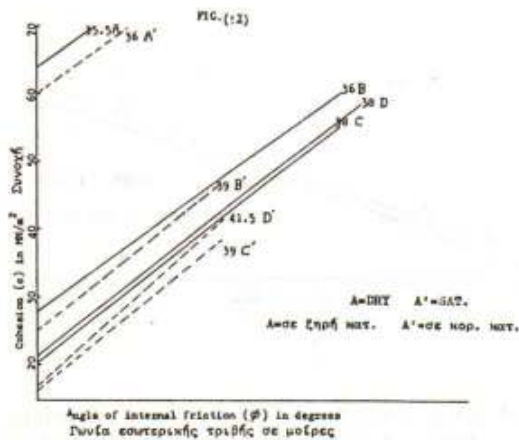
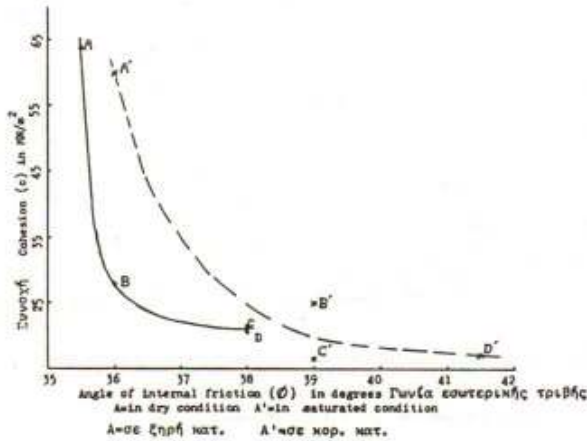
Σχ. 11. Κύκλοι και περιβάλλουσα του Mohr της βαθμίδας Δ (ζηρή κατ.).



Σχ. 11. Κύκλοι και περιβάλλουσα του Mohr της βαθμίδας Δ (κορ. κατ.).

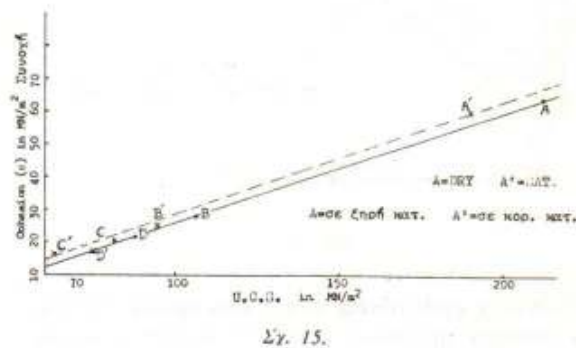
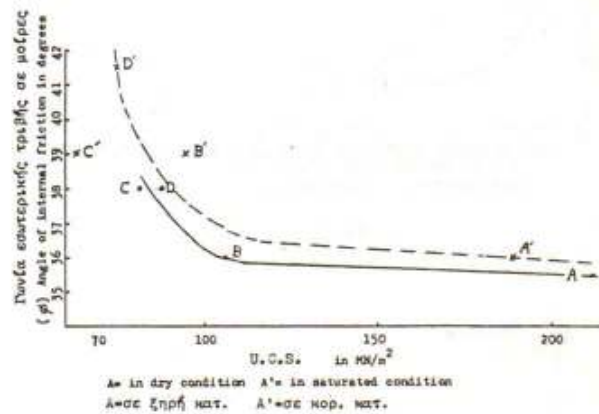
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.

Βαθμίδα Πετρόματος	Περιοχή	Αριθμός στοιχείων	σ_c σε MN/m ²	ϕ σε μοίρες	C σε MN/m ²	m	r ²
B ξηρ.	Λατομείο Longhoughton	5	106.13	36	27.9	7.5	0.99
B κορ.	Λατομείο Longhoughton	5	94.59	39	25.0	9.5	0.96
Γ ξηρ.	Λατομείο Longhoughton	5	81.28	38	20.4	10.2	0.99
Γ κορ.	Λατομείο Longhoughton	5	62.95	39	16.4	13.2	0.99
Δ ξηρ.	Λατομείο Longhoughton	5	87.81	38	21.4	9.0	0.97
Δ κορ.	Λατομείο Longhoughton	7	74.77	41.5	17.1	13.5	0.99
Α ξηρ.	Λατομείο Mootlaw	5	211.20	35.5	64.0	8.2	0.99
Α κορ.	Λατομείο Mootlaw	5	189.70	35.5	60.0	8.4	1.00



Ο πίνακας 9 και τα σχ. 14 και 15 δείχνουν ότι υπάρχει ένας συσχετισμός μεταξύ των παραμέτρων της διατμητικής αντοχής και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Όπως αναμενόταν, ο ακριβέστερος συσχετισμός — με τον υψηλότερο συντελεστή συσχέτισης — υπήρξε μεταξύ της συνοχής και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Από παρατηρήσεις των θραυσμένων δοκιμίων, δια-



κόρυφο άξονα και οι εφαπτόμενες προς τους κύκλους του Mohr σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τις γραφικά υπολογισμένες γωνίες.

πιστώθηκε ότι τα χαμηλής αντοχής πετρώματα, βαθμίδα Γ και Δ, θραύστηκαν διατμητικά κατά μήκος ενός λείου και κεκλιμένου επιπέδου αστοχίας, ενώ τα υψηλότερης αντοχής πετρώματα, βαθμίδες Α και Β, θραύστηκαν κατά μήκος μιας κεκλιμένης αλλά τραχύτερης και «κυματιστής» επιφάνειας.

Τέλος οι τιμές του m , για κάθε ομάδα δοκιμών προσδιορίστηκαν με στατιστική ανάλυση γραμμικού συσχετισμού:

$$\sigma_i = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + S\sigma_c^2)^{1/2}$$

με μετασχηματισμό της προκύπτει:

$$Y = m\sigma_c X + S\sigma_c^2$$

όπου:

$$Y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \text{ και } X = \sigma_3$$

Για ακέραιο πέτρωμα, $S=1$, η σταθερά του υλικού του πετρώματος (m) δίνεται από τη σχέση:

$$m = \frac{1}{\sigma_c} \left[\frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \right]$$

όπου x_i και y_i είναι τα διαδοχικά ζεύγη των στοιχείων και n είναι ο ολικός αριθμός αυτών των ζευγών των στοιχείων.

Ο συντελεστής συσχετισμού r^2 δίνεται από:

$$r^2 = \frac{\left[\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n} \right]^2}{\left[\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \right] \left[\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \right]}$$

Αυτή η ανάλυση εφαρμόζεται μόνο σε ομάδες στοιχείων που περιέχουν περισσότερα από πέντε πειραματικά σημεία καλά κατανεμημένα στο χώρο των τάσεων που ορίζονται από $\sigma_3 < \sigma_1/3.4$

Ο παραπάνω πίνακας 9 δείχνει τις προσδιορισμένες τιμές της παραμέτρου της αντοχής m για τις τέσσερις βαθμίδες πετρώματος ξηρή και κορεσμένη κατάσταση. Επομένως, αυτές μπορούν να αντικατασταθούν στην εξίσωση (1) (των Hoek και Brown, 1980) και να δοθεί ένα εμπειρικό κριτήριο αντοχής για το ακέραιο πέτρωμα της αντίστοιχης βαθμίδας.

7. ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ

Εκτελέστηκε η δοκιμή υγείας σε πυρήνες πετρώματος της κάθε βαθμίδας, ώστε να προσομοιαστούν τα φαινόμενα ανακρυστάλλωσης που παρουσιάζονται κά-

τω από φυσικές περιβαλλοντολογικές συνθήκες και έτσι να καθοριστεί η αποσαθρωσιμότητα, ανθεκτικότητα ή αντοχή στην υποβάθμιση των υλικών των πετρωμάτων, καθώς και οι επιδράσεις της μεταμόρφωσης επί της αποσαθρωσιμότητας του πετρώματος. Η δοκιμή εκτελέστηκε χρησιμοποιώντας κορεσμένο διάλυμα θειικού νατρίου, σύμφωνα με τη υιοθετημένη και αποδεκτή μέθοδο από: Commission 25 Pen Protection et Erosion des Monuments. Ο πιο κάτω πίνακας δείχνει τα αποτελέσματα.

Βαθμίδα	Απώλεια βάρους των πυρήνων σε %
A	0.0
B	0.0
Γ	0.2
Δ	0.0

Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι οι πυρήνες δεν επηρεάζονται από το διάλυμα μετά από πέντε κύκλους διαβροχής και ξήρανσης, εκτός της βαθμίδας Γ

```

COST
CP 1 4L
1 DIMENSION X(50), Y(50)
2 READ(4, 5100) N
3 DO 10 I = 1, N
4 READ(5, 5200) Y(I), X(I)
5 WRITE(6, 6000) Y(I), X(I)
6 10 CONTINUE
7 CALL STATIN, X, Y, XM, YM, SX, SY, SKY)
8 B = SKY / SX
9 A = YM - B * XM
10 R = SKY / SQRT( SX * SY )
11 R2 = R ** 2
12 WRITE(6, 6100) A, B, R, R2
13 STOP
14 5100 FORMAT( 15 I )
15 5200 FORMAT( 1X, 2F10.4 )
16 6000 FORMAT( 1H, 2F10.3 )
17 6100 FORMAT( 1H, 4F15.8 )
18 END
19 SUBROUTINE STATIN, X, Y, XM, YM, SX, SY, SKY)
20 DIMENSION X(N), Y(N)
21 XM = 0.0
22 YM = 0.0
23 SX = 0.0
24 SY = 0.0
25 SKY = 0.0
26 DO 10 I = 1, N
27 XM = XM + X(I)
28 YM = YM + Y(I)
29 10 CONTINUE
30 FM = N
31 XM = XM / FM
32 YM = YM / FM
33 DO 20 I = 1, N
34 SX = SX + ( X(I) - XM ) ** 2
35 SY = SY + ( Y(I) - YM ) ** 2
36 SKY = SKY + ( X(I) - XM ) * ( Y(I) - YM )
37 20 CONTINUE
38 RETURN
39 END

```

Σχ. 16α. Πρόγραμμα για τον υπολογισμό της εξίσωσης του γραμμικού συσχετισμού, των παραμέτρων της και του συντελεστή συσχετισμού, για τη δοκιμή των υπερηχητικών κυμάτων.

όπου παρουσιάστηκε πολύ μικρή απώλεια. Αυτό θεωρείται ότι οφείλεται στο μεγαλύτερο πορώδες και στην υψηλότερη υδρο-απορροφητικότητα της βαθμίδας Γ. (Chorley 1969, Evans 1970).


```

*ED PLCCOST
: P 1 *L
: 1 DIMENSION X(50), Y(50)
: 2 DIMENSION Z(2), T(2)
: 3 CALL PAPER(1)
: 4 CALL MAP(0.0, 1.0, 0.0, 1.0)
: 5 CALL PSPACE(0.0, 1.0, 0.0, 1.0)
: 6 CALL CTRSIZE(0.015)
: 7 CALL PLOTS(0.46, 0.99, 7HGRADE B, 7)
: 8 CALL CTRSIZE(0.002)
: 9 READ(7, 7200) M
: 10 DO 70 IFGR = 1, 4
: 11 READ(7, 7100, END = 80) X1, X2, Y1, Y2
: 12 CALL MAP(-0.2, 10.0, -0.2, 1.2)
: 13 CALL CSPACE(X1, X2, Y1, Y2)
: 14 CALL PSPACE(X1, X2, Y1, Y2)
: 15 CALL BORDER
: 16 DO 30 LI = 1, N
: 17 READ(5, 5100) Y(LI), X(LI)
: 18 30 CONTINUE
: 19 XMIN = X(1)
: 20 XMAX = X(1)
: 21 YMIN = Y(1)
: 22 YMAX = Y(1)
: 23 DO 35 I = 1, N
: 24 IF (XMIN .GT. X(I)) XMIN = X(I)
: 25 IF (XMAX .LT. X(I)) XMAX = X(I)
: 26 IF (YMIN .GT. Y(I)) YMIN = Y(I)
: 27 IF (YMAX .LT. Y(I)) YMAX = Y(I)
: 28 35 CONTINUE
: 29 READ(7, 7300) A, B
: 30 XMINI = XMIN - 0.1 * (XMAX - XMIN)
: 31 XMAXI = XMAX + 0.1 * (XMAX - XMIN)
: 32 YMINI = YMIN - 0.1 * (YMAX - YMIN)
: 33 YMAXI = YMAX + 0.1 * (YMAX - YMIN)
: 34 CALL MAP(XMINI, XMAXI, YMINI, YMAXI)
: 35 DO 40 I = 1, N
: 36 CALL PLOTNC(X(I), Y(I), 45)
: 37 40 CONTINUE
: 38 Z(1) = XMIN
: 39 Z(2) = XMAX
: 40 T(1) = A + B * Z(1)
: 41 T(2) = A + B * Z(2)
: 42 IF (B .LT. 0.0) GO TO 50
: 43 IF (T(1) .LT. YMIN) Z(1) = (YMIN - A) / B
: 44 IF (T(2) .GT. YMAX) Z(2) = (YMAX - A) / B
: 45 GO TO 60
: 46 50 CONTINUE
: 47 IF (T(1) .GT. YMAX) Z(1) = (YMAX - A) / B
: 48 IF (T(2) .LT. YMIN) Z(2) = (YMIN - A) / B
: 49 60 CONTINUE
: 50 T(1) = A + B * Z(1)
: 51 T(2) = A + B * Z(2)
: 52 CALL CTRSIZE(0.05)
: 53 CALL AXESS(1.0, 1.0)
: 54 CALL PTPLOT(Z, 1, 2, -2)
: 55 WRITE(6, 1000) A, B, Z(1), Z(2), T(1), T(2)
: 56 1000 FORMAT(1H, 6F10.4)
: 57 70 CONTINUE
: 58 80 CONTINUE
: 59 CALL GREND
: 60 STOP
: 61 7100 FORMAT(4F5.0)
: 62 7200 FORMAT(15)
: 63 5100 FORMAT(1X, 2F10.4)
: 64 7300 FORMAT(2F10.0, 4F5.0)
: 65 END

```

Σχ. 16β. Πρόγραμμα για το σχεδιασμό των διαγραμμάτων.

Παρόλαυτα, όλο το φάσμα της μεταμόρφωσης μπορεί να θεωρηθεί ότι παράγει υγιή δομικό λίθο.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η στρωματογραφική διαδοχή του Great Limestone στις περιοχές Mootlaw και Longhoughton αναγνώ-

ρίστηκε και καταγράφηκε σύμφωνα με τη βιοστρωματογραφία που καθορίστηκε από τον G.A.L. Johnson το 1953. Αυτό διευκόλυνε την επιλογή των λατομείων που μελετήθηκαν, καθώς επίσης και το στρωματογραφικό έλεγχο των δειγμάτων για ακόλουθη εργαστηριακή διερεύνηση.

2. Από τη μελέτη της πετρογραφίας και ορυκτολογίας των μεταμορφωμένων δειγμάτων πετρώματος σε λεπτές τομές, βρέθηκε ότι η μεταβολή της ορυκτολογίας και μικροϋφής του υλικού του πετρώματος, λόγω της μεταμορφωτικής δράσης, έχει σπουδαία επίδραση στη μηχανική και φυσική συμπεριφορά του υλικού του πετρώματος. Η «ανάπτυξη ορυκτών κρυστάλλων» λόγω της ανακρυστάλλωσης, φάνηκε ότι έχει αρνητική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος.

3. Η μεταμορφωτική δράση προξενήθηκε λόγω της διείσδυσης της δολεριτικής κοίτης (Whin). Είναι μία καθαρά θερμική ισοχημική και ισοφασική μεταμόρφωση.

4. Οι δοκιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη έδειξαν μία σημαντική μείωση της αντοχής με την αύξηση του βαθμού μεταμόρφωσης, καθώς και μία ελάττωση της αντοχής στο κορεσμό.

5. Οι δοκιμές της αντοχής σε τριαξονική θλίψη έδειξαν ότι ο κορεσμός του πετρώματος με το νερό, προξενεί σε όλες τις βαθμίδες μεταμόρφωσης, μία αύξηση της γωνίας της εσωτερικής τριβής (μέχρι και 3.5 μοίρες) καθώς επίσης και μία μείωση της συνοχής. Επιπλέον με την εξέλιξη της μεταμόρφωσης, η γωνία της εσωτερικής τριβής αυξάνει ενώ η συνοχή γενικά μειώνεται.

6. Η ταχύτητα των υπερηχητικών κυμάτων του σχηματισμού Great Limestone αυξάνει με την αύξηση του πορώδους και τη μείωση της φαινομένης πυκνότητας, μέσα σε κάθε βαθμίδα μεταμόρφωσης. Επίσης μειώνεται σημαντικά, με την αύξηση του βαθμού μεταμόρφωσης, δηλώνοντας έτσι την κύρια επίδραση της μεταμόρφωσης στη ταχύτητα, εκτός από την πυκνότητα και το πορώδες. Παρόλα αυτά όμως, φαίνεται ότι το τελικό μέγεθος της υπερηχητικής ταχύτητας εξαρτάται από το συνδιασμό του πορώδους, του βαθμού μεταμόρφωσης και της φαινομένης πυκνότητας, σαν μία ολότητα, κατά κάποιο μάλλον πολύπλοκο τρόπο. Ο κορεσμός των δοκιμών αυξάνει την ταχύτητα αυτή σε κάθε βαθμίδα μεταμόρφωσης.

7. Οι δοκιμές της συμπεριφοράς της τάσης-παραμόρφωσης δείχνουν μια ελάττωση του εφαπτομενικού και διατέμνοντος μέτρου ελαστικότητας με την αύξηση του βαθμού μεταμόρφωσης. Οι καμπύλες υστέρησης γίνονται πλατύτερες και οι παραμένουσες παραμορφώσεις γίνονται μεγαλύτερες λόγω της μεταμόρφωσης.

8. Όλες οι βαθμίδες μεταμόρφωσης του σχηματισμού Great Limestone έχουν υψηλή ανθεκτικότητα και χαμηλή αποσαθρωσιμότητα, όπως προκύπτει από τις δοκιμές προσομοίωσης της αποσάθρωσης με διάλυμα θεικού νατρίου σε πυρήνες πετρώματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν την επίδραση της υδροαπορροφητικότητας επί της αποσαθρωσιμότητας.

9. Μια γενική παρατήρηση που προκύπτει από όλα τα εργαστηριακά αποτελέσματα των δοκιμών στην έρευνα αυτή, είναι ότι η βαθμίδα Γ παρουσιάζει μια ασυνέχεια στη γενική αρμονική εξέλιξη των εργαστηριακών αποτελεσμάτων, δείχνοντας μια αναστροφή των τιμών. Αυτό είναι γεγονός, αν και οι λεπτομερείς

петρογραφικές και ορυκτολογικές εξετάσεις έδειξαν ότι η βαθμίδα Γ είναι μεταμορφωμένη σε κάποιο χαμηλότερο βαθμό σχετικά με τη βαθμίδα Δ. Αυτό αποδίδεται στο σχετικά μεγαλύτερο πορώδες της βαθμίδας Γ σε σύγκριση με αυτό των άλλων βαθμίδων. Το πορώδες, όπως είναι γενικά γνωστό, παίζει ένα σημαντικό ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων.

10. Τέλος, σαν γενικό συμπέρασμα αυτής της έρευνας, μπορεί να λεχθεί συνοπτικά ότι η μεταμόρφωση, σαν γεωλογικός παράγοντας, επιδρά σημαντικά στις ιδιότητες και στη γεωτεχνική συμπεριφορά αυτού του τύπου πετρώματος, καθιστώντας το σημαντικά πιο υποβαθμισμένο γεωτεχνικώς.

9. REFERENCES

1. AKROYD, T.N.W. (1964) Laboratory testing in soil engineering. Soil Mechanics. Limited, London, Geotechnical Monograph No.1.
2. AL-JASSAR, S.H. and HAWKINS, A.B. (1979) Geotechnical Properties of the carboniferous limestone of the Bristol area. The influence of petrography and chemistry. 4th Int. Congress on Rock Mechanics, Montreux (Suisse). Vol. 1.
3. ANON. (1967) British standards 1377 Methods of testing soils for civil engineering purposes. British standards institution. Gr. 9.
4. ANON. (1969) Specification for road and bridge works. U.K. Department of the Environment. H.M.S.O., London.
5. ANON. (1972) The preparation of maps and plans in terms of engineering geology. Q. Jl. Eng. Geol. 5, 293-381.
6. ANON. (1979) International Society for Rock Mechanics. Commission on standardization of laboratory and field tests. Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. Vol. 16, pp. 141-156.
7. ASHURST, J. and DIMES, F.G. (1977) Stones in building. Architectural Press, London, pp. 105.
8. ASTM (1979) Standard specification for building stone ASTM C 568-79 Amer. Soc. Testing Material pp. 32-33.
9. ASTM (1980) Triaxial compressive strength of undrained rock core specimens, without pore pressure measurements. Vol. 19, pp. 391.
10. BALMER, G. (1952) A general analytical solution for Mohr's envelope. Amer. Soc. Testing Materials Vol. 52, pp. 1260-1271.
11. BIENIAWSKI, Z.T. (1975) The point load test in geotechnical practice. Eng. Geol. Vol. 9, pp. 1-11.
12. BIENIAWSKI, Z.T. (1967) Mechanism of brittle fracture of rock. National Mechanical Engineering Research Institute, Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria, S. Africa.
13. BELL, F.G. (1981) Engineering properties of soils and rocks. Butterworth Ltd., pp. 109-116.
14. BROWN, E.T. (1981) Rock characterization testing and monitoring ISRM suggested methods. Pergamon Press, 1981.
15. BROWN, E.T. (1971) Brittle fracture of rock at low confining pressures. Proc. 1st Australia - New Zealand Conf. on Geomech. Melbourne, Vol. 1 1971.
16. BURNETT, A.D. and EPPS, R.J. (1979) The engineering geological description of carbonate suite rocks and soils. Ground Engineering (March), pp. 41-48.
17. CHORLEY, R.J. (1969) The role of water in rock disintegration: Water, Earth and Man, pp. 135-155 Pub. Methuen, London.
18. DEARMAN, W.R. and FOOKES, P.G. (1972) The influence of weathering on layout of quarries in south-west England. Proc. of the Ussher Society, Vol. 2, Part 5, pp. 372-387.
19. DEARMAN, W.R. (1974a) The characterization of rock for civil engineering practice in Britain. Colloque de Geologie de l'Ingenieur. Roy. Geol. Soc. Belg. pp. 1-75.
20. DEARMAN, W.R. (1974b) Weathering classification in the characterization of rock for engineering in British practice. Bull. Int. Ass. Engng. Geol. Vol. 9, 33-42.
21. DEARMAN, W.R. (1981) General report session: Engineering properties of carbonate rocks. Bull. of the Int. Ass. of Eng. Geol. No. 24, 3-17.
22. DEERE, D.V., MERITT, A.M., COON, R.E. (1969) Engineering classification of in-situ rock. Report AIR FORCE WEAPONS LAB. U.S.A. Force system command. Rep. A.F.W.L. TR-67-144p.
23. DEERE, D.V. and MILLER, R.P. (1966) Engineering classification and index properties for intact rock report AFWL-TR-65-116 Air Force Base, New Mexico, pp. 308.
24. EVANS, I.S. (1970) Salt crystallization and rock weathering. A review: Revue De Geomorphologie, Dynamique, Vol. 19, No. 4, pp. 153-177.
25. FARMER, I.W. (1980) Face and roadway stability in underground coal mines. Geotechnical criteria.
26. FATTOHI, Z.R. (1971) Engineering geological study of the great limestone in Northumberland England (unpublished M.Sc. thesis Univ. of Newcastle upon Tyne).
27. FITCH, F.J. and Miller, J.A. (1966) The age of the whin sill. Geol. J. Vol. 5, Part 2, pp. 233-250.
28. FOLK, R.L. (1962) Spectral subdivision of limestone types in W.E. Ham. ed., Classification of carbonate rocks: AAPG Memoir 1, pp. 62-84.
29. FOLK, R.L. (1965) Some aspects of recrystallization in ancient limestones, in L.C. Pray and R.C. Murray, eds. Dolomitization and limestone diagenesis. a Symposium: SEPM Spec. Publ. 13, pp. 14-48.
30. FOLK, R.L. (1959) Practical petrographic classification of limestones. Bull. Am. Ass. Pet. Geol. j. 43, pp. 1-38.
31. FOOKES, P.G. and HIGGINBOTTOM, I.E. (1975) The classification and description of near-shore carbonate sediments for engineering purposes. Geotechnique. Vol. 25, pp. 406-411.
32. FRANKLIN, J.A. and BROCH, E. (1972) The point load test. Int. J. Rock Mechanics. Min. Sci. Vol. 9, pp. 699-697.
33. FRANKLIN, J.A. (1971) Suggested method for determining the slaking swelling, porosity, density and related rock index properties. Final draft produced for Int. Soc. Rock Mech. Commission on Standardization of laboratory and field tests, Lisbon.
34. FRANKLIN, J.A. and HOEK, E. (1970) Developments in triaxial testing equipment. Rock Mechanics, 2, pp. 223-228.
35. HAMROL, A. (1961) A quantitative classification of the weathering and weatherability of rocks. 5th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Paris.
36. HAWKES, I. (1966) Moduli measurements on rock cores. Proc. 1st Int. Cong. Rock Mech. Lisbon. Vol 1, pp. 655-660.
37. HOEK, E. and BROWN (1980) Underground excavations in rock. pp. 137.
38. HOLMES, A. (1928). The age and composition of the whin sill and the related dykes of the north England. The Mineralogical Magazine 21, pp. 493-543.
39. HUCKA, V.A. (1965) A rapid method for determining the strength of rock in-situ. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 2, 1965, pp. 127-134.
40. JAEGER, J.C. (1969) Elasticity, fracture and flow, with engineering and geological applications. Chapman and Hall, London.
41. JAEGER, J.C. and COOX, N.G.W. (1969) Fundamentals of rock mechanics. Methuen Co. Ltd.
42. JOHNSON, G.A.L. (1953) The biostratigraphy of the carboniferous middle limestone group succession between Tripal Burn and the river north Tyne in south west Northumberland (unpublished Ph. D. Thesis. Vol. 1, at King's College, University of Durham).

43. JOHNSON, G.A.L. (1958) Biostromes in the Namurian Great limestone of northern England.
44. LEBOUR, G.A. (1878) Geology of Northumberland.
45. MCGRAW GILL. Optical mineralogy.
46. SACHPAZIS, C.I. (1983) The effects of contact-metamorphism on the engineering geological properties of the Great Limestone, Northumberland, England, M.Sc. unpublished Thesis, University of Newcastle upon Tyne.
47. SHIELLS, K.A.G. (1961) The geology of part of the limestone group of north-Northumberland (Ph. D. Thesis, Vol. 11, at King's College University of Durham.
48. SUTHERLAND (1962) Some dynamic and static properties of rocks. 5th Symp. on Rock Mech. University of Minnesota, pp. 473-491.
49. SZLAVIN, J. (1974) Relationships between some physical properties of rock determined by laboratory tests. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 11, pp. 57-66.
50. TURK, N. (1983) Ph. D. Thesis in preparation, University of Newcastle upon Tyne.
51. WYLLIE, M.R.J., GREGORY, A.R. and GARDNER, L.W. (1956). Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics* 21, pp. 41-70.
52. WESTOLL, S.T., ROBSON, D.A. and GREEN, R. (1955). A guide to the geology of the district around Alnwick, Northumberland. *Proceeding of the Yorkshire Geological Society*.