

ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΩΝ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΙΖΗΜΑΤΩΝ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΜΑΡΓΑΪΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ ΤΗΣ Β. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ*

Τ.Α. ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΠΟΥΛΟΥ¹, Π. ΤΣΩΛΗ - ΚΑΤΑΓΑ¹, Γ.Χ. ΚΟΥΚΗΣ¹, Ν. ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΣ¹

ΣΥΝΟΨΗ

Στην εργασία αυτή αναλύεται ο τρόπος συστηματικής μελέτης των μικροδομικών χαρακτηριστικών αργιλικών ιζημάτων, με βάση τα οποία μπορεί να ερμηνευθεί ο φυσικός και μηχανικός χαρακτήρας τους. Η μελέτη των χαρακτηριστικών αυτών γίνεται κυρίως με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σαρώσεως (SEM) και πολωτικού μικροσκοπίου σε συνδυασμό με μεθόδους ορυκτολογικής ανάλυσης των συστατικών των ιζημάτων και με τεχνικές προσδιορισμού διαφόρων φυσικών-μηχανικών χαρακτήρων τους. Με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε δείγματα μαργακίων ιζημάτων από τη Β. Πελοπόννησο, προσδιορίστηκαν οι εξής τύποι μικροδομών: α)συνδετική-σκελετική, μικτού τύπου, αδρομερώς διεσπαρμένη με χαμηλό βαθμό προσανατολισμού, β)συνδετική, τύπου σύμπτηξης, μετρίως διεσπαρμένη με μέτριο βαθμό προσανατολισμού, γ) κρυσταλλική-συγκολλημένη, λεπτομερώς ή μετρίως διεσπαρμένη με χαμηλό βαθμό προσανατολισμού.

This paper deals with the systematic study of the microstructural characteristics of clay sediments. These characteristics which are closely connected to the physical and mechanical character of the sediments, are concerned with: a)the structural constituents, b)the microporosity and c)the structural bonds of the sediments.

For the determination of the structural characteristics of clay sediments the Scanning Electron Microscope (SEM) and the Optical Microscope are widely used with a supplementary mineralogical analysis of sediment components and the determination of several physical and mechanical characteristics. The observations under the microscope must be focused on the distribution of mineralogical facies and micropores, on the size and shape of clay (micro-)aggregates, as well as on the kind of authigenic facies (e.g. micrite, sparry calcite) which play the role of cementing material.

The proposed methodology was applied to the study of the microstructures of marly sediments from Northern Peloponnese and the following types of microstructures were determined: a)matrix-skeletal, mixed type, coarse dispersed of low orientation, b)matrix, coagulative, medium dispersed of medium orientation and c)crystallized-cementated, fine or medium dispersed of low orientation.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Μικροδομή, Τύποι μικροδομών, Αργιλικά ιζήματα, Μαργαϊκά ιζήματα, Δομικά συστατικά, Μικροπορώδες, Δομικοί δεσμοί, Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σαρώσεως, Β.Πελοπόννησος.

KEY WORDS: Microstructure, Types of Microstructure, Clay sediments, Marly sediments, Structural constituents, Microporosity, Structural bonds, SEM, Northern Peloponnese.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μικροδομή αποτελεί έναν από τους πρωταρχικούς γενετικούς γεωλογικούς παράγοντες που επηρεάζουν το φυσικό και μηχανικό χαρακτήρα μιας απόθεσης. Η μελέτη της μικροδομής καθίσταται ιδιαίτερα χρήσιμη όχι μόνον κατά την πετρογραφική ανάλυση των ιζημάτων αλλά και για την ερμηνεία του τρόπου παραμόρφωσής τους κάτω από άσκηση τάσης. Στην εργασία αυτή προτείνεται μία συστηματική μελέτη της μικροδομής των αργιλικών ιζημάτων, με σκοπό να αποτελέσει μία μεθοδολογία παρατήρησης των χαρακτηριστικών με βάση τα οποία μπορούν να εκτιμηθούν οι μηχανισμοί παραμόρφωσης των ιζημάτων σε μικροσκοπική κλίμακα.

Η ανάλυση της μικροδομής των ιζημάτων με την έννοια του όρου «microstructure» περιλαμβάνει τον καθορισμό των χαρακτηριστικών τους από πετρογραφική και τεχνικογεωλογική άποψη (Holtz & Kovacs, 1981), σε αντίθεση με τον όρο «microfabric» που αναφέρεται μόνο στα πετρογραφικά χαρακτηριστικά (Collins & McGown, 1974). Στην πρώτη περίπτωση περιγράφεται η γεωμετρική τοποθέτηση των δομικών στοιχείων στο χώρο, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους τους και των δυνάμεων που μπορεί να επενεργούν μεταξύ τους (είδος δεσμού), καθώς επίσης και η κατανομή του πορώδους (Baynes & Dearman, 1978, Osipov, 1978, 1990)

* THE STUDY OF THE MICROSTRUCTURES OF CLAY SEDIMENTS: A CASE STUDY OF MARLY SEDIMENTS FROM N. PELOPONNESE.

1. Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, 265 00 Ρίο, Πάτρα

Sokolov, 1990). Στη δεύτερη περίπτωση περιγράφεται μόνον η γεωμετρική τοποθέτηση, το μέγεθος των δομικών στοιχείων και η κατανομή του πορώδους (Gillott, 1969έ Mitchell, 1976έ Tovey, 1971έ Sokolov & O'Brien, 1990). Η τεχνική της ποσοτικής ανάλυσης αυτών των χαρακτηριστικών δίνεται από τους Sergeyeu et al. (1985).

Τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν τη μικροδομή αναφέρονται: 1) στα συστατικά που απαρτίζουν το σχηματισμό και κυρίως στο είδος, μέγεθος και σχήμα αυτών (μορφομετρικά χαρακτηριστικά) και στο βαθμό προσανατολισμού τους που καθορίζει την ανισοτροπία, A, του υλικού (γεωμετρικά χαρακτηριστικά), 2) στο μικροπορώδες και συγκεκριμένα στο μέγεθος, σχήμα και στην κατανομή των πόρων (μορφομετρικά χαρακτηριστικά) και 3) στο είδος των δεσμών μεταξύ των δομικών συστατικών (ενεργειακά χαρακτηριστικά). Το μέγεθος των δομικών συστατικών και των μικροπόρων καθορίζει τη διασπορά, D, της δομής (Sokolov, 1990).

Η μελέτη των πύδ πάνω χαρακτηριστικών με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σαρώσεως (SEM), πολωτικού μικροσκοπίου και μεθόδων ορυκτολογικής ανάλυσης των συστατικών των ιζημάτων όπως XRD, DTA, TG σε δείγματα μαργακικών ιζημάτων της Β. Πελοποννήσου δίδεται ως παράδειγμα εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

2. ΔΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ

Σαν δομικά συστατικά των αργιλικών ιζημάτων θεωρούνται τα αργιλικά τεμαχίδια, τα συσσωματώματα, οι κόκκοι, τα μικροαπολιθώματα και οι αυθιγενείς φάσεις (Huppert, 1988).

Τα αργιλικά τεμαχίδια (κλαστικής προέλευσης) πολύ σπάνια απαντούν σαν μεμονωμένα δομικά στοιχεία. Δημιουργούν μικροσυσσωματώματα, που συνήθως είναι τύπου FF (face to face). Τα συσσωματώματα, γενικά, παρουσιάζουν μια μεγάλη ποικιλία όσον αφορά στο σχήμα και στο μέγεθος. Συνήθως έχουν μια ανοιχτή εσωτερική διευθέτηση όπου τα αργιλικά μικροσυσσωματώματα βρίσκονται κυρίως σε επαφή τύπου EF (edge to face).

Οι κόκκοι μεγέθους ιλύος και άμμου είναι κλαστικής προέλευσης (συνήθως χαλαζίας, άστριοι, μαρμαρυγία κ.α.) και συχνά περιβάλλονται από μια λεπτή στρώση αργίλου.

Τα μικροαπολιθώματα είναι συνήθως ασβεστιτικής σύστασης και από μεταφορά, ενώ απαντώνται γενικά με τη μορφή θραυσμάτων.

Οι αυθιγενείς φάσεις, που έχουν κυρίως συγκολλητικό χαρακτήρα, είναι συνήθως οι χημικές κατακρημνίσεις του ανθρακικού ασβεστίου με τη μορφή μικριτών (και σπανιότερα σπαριτικού ασβεστίτη) ασβεστίτη ή ασβεστιτικών συγκολλήσεων, μερικά οξειδία, καθώς και αυθιγενείς μικροκρύσταλλοι χαλαζία, σιδηροπυρίτη, γλαυκονίτη και οργανική ύλη.

Κατά τη μικροσκοπική παρατήρηση με το SEM, σε μικρές μεγεθύνσεις μπορούν να παρατηρηθούν γενικά χαρακτηριστικά όπως: τύπος μικροδομής (βλέπε παρακάτω), μικροασυνέχειες, μικροστρώση κ.α., ενώ σε μεγάλες μεγεθύνσεις παρατηρούνται οι μικροδομικές λεπτομέρειες ενδιαφέροντος, όπως: το είδος και το σχήμα (ανισομετρικό, ισομετρικό) των συσσωματωμάτων, το μέγεθος και η δομή τους, το είδος, το μέγεθος και οι συναθροίσεις των αργιλικών μικροσυσσωματωμάτων (αν δηλ. περιβάλλουν με τρόπο συνεχή ή ασυνεχή άλλα δομικά στοιχεία, αν δημιουργούν λεπτούς ή παχείς συνδέσμους μεταξύ των κόκκων, αν αποτελούν θεμελιώδη μάζα), η μέση ακτίνα (μέγεθος) και το σχήμα των κόκκων, ο προσανατολισμός των δομικών συστατικών και ένας αριθμός επαφών μεταξύ αυτών.

Οι παράμετροι μικροδομής όπως η διασπορά, D και η ανισοτροπία, A, μπορούν να υπολογιστούν από φάσματα αναλύσεων Fourier εικόνων SEM (Sergeyeu et al., 1985). Επίσης η διασπορά, D, εκτιμάται από το λόγο ενός αριθμού πόρων και τεμαχιδίων που το μέγεθός τους είναι πάνω από 10 μm προς τον αριθμό των πόρων και τεμαχιδίων μικρότερων των 5 μm, σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια. Ποιοτικά, ο βαθμός προσανατολισμού μπορεί να χαρακτηριστεί σαν «υψηλός, μέτριος, χαμηλός», και η διασπορά σαν «αδρομερής, μέτρια, λεπτομερής».

Σε αργιλικά ιζήματα, όπως οι «μάργες», όπου επικρατούν οι αυθιγενείς ασβεστιτικοί κρύσταλλοι, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται, επίσης, στην περιγραφή αυτών. Ο μικριτικός ασβεστίτης (micrite) αποτελεί θεμελιώδη μάζα και στο μικροσκόπιο, οι κρύσταλλοί του φαίνονται σχεδόν ισομεγέθεις και ανώμαλα στρογγυλεμένοι (Welton, 1984). Ο σπαριτικός ασβεστίτης (sparry calcite) είναι αδροκρυσταλλικός με καλά σχηματισμένα όρια κόκκων και ίχνη σχισμού (Adams et al., 1984).

3. ΜΙΚΡΟΠΟΡΩΔΕΣ

Το μικροπορώδες απαρτίζεται από πόρους που σχηματίζονται μεταξύ των κόκκων ή κρυστάλλων (intergranular-interparticle, intercrystal), στο εσωτερικό των κόκκων (intragranular-intraparticle), ή εγκάρσια στα όρια των κόκκων (transgranular) (Baynes & Dearman, 1978). Απαρτίζεται επίσης από μικροπόρους που σχηματίζονται μεταξύ ή/και στο εσωτερικό συναθροίσεων αργιλικών τεμαχιδίων ή συσσωματωμάτων

(«interdomain», «intradomain», «interaggregate», «intraaggregate» (Collins & McGown, 1974)). Μικροοργ-
μές και μικροσχισμές μπορεί επίσης να συμμετέχουν στο μικροπορώδες.

Το ποσοστό του πορώδους, η επιφάνεια και η περιμέτρος των πόρων είναι παράμετροι που μπορούν να εκτιμηθούν ή να υπολογιστούν από εικόνες SEM. Από τις δύο τελευταίες παραμέτρους, είναι δυνατόν να προσ-
διοριστεί το σχήμα των πόρων (Sergeyev et al., 1985).

Ιδιαίτερη σημασία για την εκτίμηση των ενεργειακών χαρακτηριστικών του σχηματισμού έχει η κατανομή των πόρων μεταξύ των δομικών συστατικών στη δομή. Η ύπαρξη συσσωματωμάτων ανισομετρικού σχήματος με μήκος της τάξης του 1 μm και πάχος της τάξης των 0,3 μm , που αποτελούνται από υπομικροσκοπικά συσσωματώματα – μικροσυσσωματώματα επίσης ανισομετρικού σχήματος και με επαφές FF, έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό πέντε κατηγοριών μικροπόρων: υπομικροσκοπικοί πόροι μεταξύ των αργιλικών τεμαχιδίων (ισοδύναμης διαμέτρου $d \gg 0,06 \mu\text{m}$), λεπτοί και μικροί πόροι μεταξύ των υπομικροσκοπικών συσσωματωμάτων – μικροσυσσωματωμάτων ($d \gg 0,2 - 0,4 \mu\text{m}$ και $d \gg 2,5 \mu\text{m}$), μικροί και μεγάλοι πόροι μεταξύ των συσσωματωμάτων ($d \gg 3,9 \mu\text{m}$ και $d \gg 10 - 30 \mu\text{m}$).

Η μετάβαση από τη λεπτομερώς διεσπαρμένη μικροδομή στην αδρομερώς διεσπαρμένη, υποδεικνύει αφενός μεν την αύξηση της μέσης ισοδύναμης διαμέτρου των πόρων μεταξύ των υπομικροσκοπικών συσσωματωμάτων και συσσωματωμάτων, αφετέρου δε τη διαθεσιμότητα σε πόρους μεταξύ των κόκκων και μεταξύ κόκκων και συσσωματωμάτων. Το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού πορώδους στις αδρομερέστερα διασπαρμένες μικροδομές, καταλαμβάνουν οι πόροι μεταξύ των συσσωματωμάτων (Sokolov, 1990).

4. ΕΙΔΟΣ ΔΕΣΜΩΝ

Τα δομικά στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους με δυνάμεις διαφορετικής φύσης που ορίζονται σαν δομικοί δεσμοί (structural bonds) (Osipov, 1990).

Οι δομικοί δεσμοί αναπτύσσονται μόνο στα σημεία επαφής των δομικών συστατικών. Οι επαφές είναι ασθενείς ζώνες διά μέσου των οποίων λαμβάνει χώρα η παραμόρφωση και η αποσχία του σχηματισμού, γι' αυτό η παρατήρηση του είδους και του αριθμού τους στο μικροσκόπιο είναι μερίζονος σημασίας από τεχνική άποψη.

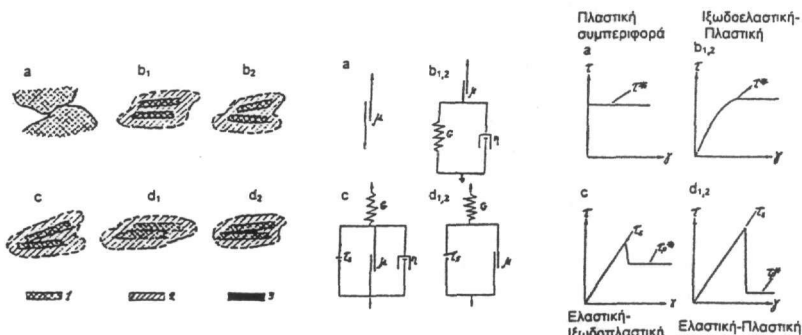
Οι δομικοί δεσμοί σχηματίζονται από διάφορες γεωλογικές διεργασίες (στερεοποίηση, γήρανση, συναίρεση, συγκόλληση) και αναφέρονται στα ενεργειακά χαρακτηριστικά της μικροδομής. Οι τύποι των δομικών δεσμών, ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού, τη φύση των δυνάμεων αλληλεπίδρασης και την ενέργεια που κατέχουν, μπορούν να ομαδοποιηθούν σύμφωνα με τον Osipov (1988), ως ακολούθως (Σχήμα 1) : (a) δεσμοί αλληλοεμπλοκής (interlocking), (b) δεσμοί «σύμπηξης» με μακρινή (b_1) και κοντινή (b_2) απόσταση μεταξύ των τεμαχιδίων (distant coagulation, close coagulation), (c) μεταβατικοί δεσμοί σημειακού τύπου (transition – point contact), d_1) κρυσταλλικοί δεσμοί (crystallization), d_2) συγκολλητικοί δεσμοί (cementation).

Τα ρεολογικά πρότυπα για ιδεατά «εδάφη» με αυστηρά καθορισμένο τύπο δομικών δεσμών, καθώς και οι αντίστοιχες καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης, φαίνονται στο σχήμα 1. Στη φύση, «εδάφη» με ένα μόνο τύπο επαφών είναι πολύ σπάνια. Συνήθως είναι «μικτού τύπου», δηλαδή «εδάφη» με όλους τους τύπους των δομικών δεσμών.

Για την ποσοτική εκτίμηση της ενεργειακής ετερογένειας των δομικών δεσμών μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης που προκύπτει από δοκιμές αντοχής σε συμπίεση.

Από την καμπύλη αυτή μπορούν να προσδιοριστούν ποσοτικοί δείκτες, οι οποίοι, σύμφωνα με τον Sokolov (1990), υποδεικνύουν την επικράτηση ενός συγκεκριμένου τύπου ενεργειακών επαφών μεταξύ των δομικών στοιχείων. Τέτοιοι δείκτες είναι: α) ο λόγος της σχετικής ελαστικής παραμόρφωσης ϵ_e προς την ολική παραμόρφωση ϵ_t , β) ο λόγος της μέγιστης διατμητικής αντοχής τ_{max} προς την παραμένονσα διατμητική αντοχή τ_{min} (το σύμβολο τ σημαίνει φόρτιση κάθετα στη στρώση) και γ) η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη, R_c , που λαμβάνεται κατά διεύθυνση κάθετη στη στρώση. Για αργιλικά ιζήματα με δομές τύπου σύμπηξης ο λόγος ϵ_e/ϵ_t δεν υπερβαίνει την τιμή 0,15 και ο λόγος τ_{max}/τ_{min} την τιμή 1,70. Καθώς ο αριθμός των μεταβατικών και κρυσταλλικών – συγκολλητικών δεσμών αυξάνεται (μικτού τύπου, κρυσταλλικές – συγκολλημένες μικροδομές), ο λόγος ϵ_e/ϵ_t φθάνει την τιμή 1,00 και ο λόγος τ_{max}/τ_{min} την τιμή 65,0 (Sokolov, 1990).

Η ποιοτική εκτίμηση των ενεργειακών χαρακτηριστικών γίνεται με την παρατήρηση εικόνων SEM. Απαιτείται όμως να προηγηθεί η ποσοτική ορυκτολογική ανάλυση των αργιλικών ορυκτών, της ασβεστιτικής συγκολλητικής ύλης και των άλλων αυθεντών φάσεων, καθώς και των κλαστικών κόκκων χαλαζία, μαρμαρυγία, ασφρίων κ.α. Για την αναγνώριση της μορφής και της φύσης του δικτύου των δομικών δεσμών στις εικόνες SEM, οι παρατηρήσεις πρέπει να εστιάζονται στην κατανομή των διαφόρων ορυκτολογικών φάσεων και των μικροπόρων, στον τρόπο εμφάνισης του ανθρακικού ασβεστίου (μικρίτες, σπαρρίτες, ασβεστιτικές συγκολλη-



Σχήμα 1. Τύποι δομικών δεσμών, αντίστοιχα ρεολογικά πρότυπα και καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης.

Συμβολισμοί : τ - τάση, τ^* - όριο διαρροής των δεσμών, τ^* - όριο διαρροής «σπασμένης» δομής, τ_s τελική αντοχή της δομής, γ - παραμόρφωση, G - μέτρο διάτμησης, n - ιξώδες, μ - συντελεστής τριβής, 1 : τεμαχίδια, 2 : προσροφημένο νερό, 3 : καινούργια φάση (cement) (Osipov, 1990)

Figure 1. Type of structural bonds, corresponding rheologic models and deformation curves.

Symbols : τ - stress, τ^* - yield limit of contacts, τ^* - yield limit of broken structure, τ_s - ultimate strength of structure, γ - deformation, G - shear modulus of elasticity, n - viscosity, μ - friction coefficient, 1 : particles, 2 : adsorbed water, 3 : new phase (cement) (Osipov, 1990)

σεις) ή άλλων συγκολλητικών υλών και στη συσσωμάτωση ή διασπορά των αργιλικών ορυκτών.

Ειδικότερα, εάν τα αργιλικά μικροσυσσωματώματα βρίσκονται σε αφθονία και περιβάλλουν με τρόπο συνεχή όλους τους κόκκους στη δομή τότε αναπτύσσεται ένα συνεχές δίκτυο ασθενών δομικών δεσμών τύπου «σύμπληξης», με πολύ περιορισμένη την ανάπτυξη άλλου τύπου δομικού δεσμού. Στην περίπτωση αυτή, το μικροπορώδες αναπτύσσεται κυρίως μεταξύ των αργιλικών μικροσυσσωματωμάτων-συσσωματωμάτων. Εάν όμως τα αργιλικά ορυκτά σχηματίζουν κυρίως ισομεγέθη συσσωματώματα με σύνδεση EF και λιγότερο υπομικροσκοπικά συσσωματώματα FF, τότε οι κόκκοι δεν περιβάλλονται σε όλα τα σημεία από αργιλικά ορυκτά με αποτέλεσμα την ανάπτυξη δεσμών «αλληλοεμπλοκής» ή άλλου τύπου (μεταβατικοί, συγκολλητικοί) όταν περιέχονται αυθυγενείς φάσεις. Στην περίπτωση που παρατηρείται αφθονία μικροϊκτικής ασβεστιτικής ύλης, η δομή χαρακτηρίζεται από ένα δίκτυο ισχυρών κρυσταλλικών - συγκολλητικών δεσμών με ισότροπη ανάπτυξη, ενώ η δυνατότητα κατανάλωσης συγκολλητικής ύλης για τη δημιουργία συσσωματωμάτων είναι περιορισμένη. Τα αργιλικά μικροσυσσωματώματα απαντώνται λεπτομερώς διεσπαρμένα και περιβάλλουν, συνήθως με τρόπο ασυνεχή, τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία. Έτσι σε μερικές θέσεις μπορεί να σχηματίζονται σημειακοί δεσμοί μεταβατικού τύπου (μικρός αριθμός δεσμών σθένους στη ζώνη επαφής (Osipov, 1990)). Όταν, εξάλλου, η ασβεστιτική ύλη εμφανίζεται με τη μορφή ασβεστιτικών συγκολλησεων ή με τη μορφή σπαρτικού ασβεστίτη, αναπτύσσονται επίσης ισχυροί κρυσταλλικοί - συγκολλητικοί δεσμοί, ή και μεταβατικοί, με ανομοιόμορφη όμως κατανομή.

5. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΩΝ

5.1 ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ

Πέντε βασικοί τύποι μικροδομής (microfabric) έχουν αναγνωριστεί στα αργιλικά ιζήματα και αποδίδονται με τους όρους: κυψελώδης (honeycomb), σκελετική (skeletal), συνδετική (matrix), τυρβώδης (turbulent ή turbostatic) και φυλλώδης (laminar) (Sergeyev et al., 1980) (για τις σχετικές εικόνες βλέπε Gillott, 1987).

Η κυψελώδης μικροδομή χαρακτηρίζεται από μεμονωμένους κόκκους ιλύος ή συσσωματωμένης αργίλου διευθετημένους σε τοξοειδή σχήματα με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός σκελετού που περιλαμβάνει μεγάλα κενά.

Η σκελετική ή κοκκώδης μικροδομή χαρακτηρίζεται από ασυνεχή συνδετική μάζα όπου η άργιλος μπορεί να είναι οργανωμένη σε συσσωματώματα και συνδετικές συναθροίσεις συνδέοντας δομικά στοιχεία μεγέθους ιλύος. Τα κενά σε μια τέτοια δομή αποτελούν ακανόνιστους πόρους μεταξύ των κόκκων (intergranular porosity).

Η συνδετική μικροδομή χαρακτηρίζεται από συνεχή αργιλική θεμελιώδη μάζα μέσα στην οποία είναι «βυθισμένα» μεγαλύτερα δομικά στοιχεία. Οι γωνίες που σχηματίζονται στις επαφές EF των αργιλικών μικροσυσσωματωμάτων στα συσσωματώματα, είναι μεγάλες, ενώ τα κενά αντιπροσωπεύονται από ισομεγέθεις μικροπόρους.

Η τυρβώδης μικροδομή χαρακτηρίζεται επίσης από συνεχή αργιλική θεμελιώδη μάζα η οποία εγκλείει άλλα δομικά στοιχεία, αλλά οι γωνίες που σχηματίζονται στις επαφές ΕF των μικροσυσσωματωμάτων μέσα στη θεμελιώδη μάζα είναι μικρές. Σε περιοχές όπου συμπαγείς κόκκοι πλησιάζουν πιο κοντά μεταξύ τους (λόγω συμπύκνωσης), τα συσσωματώματα της θεμελιώδους μάζας αναπτύσσουν σφιχτές επαφές τύπου FF και «χτίζονται» γύρω από τους κόκκους. Τα κενά αντιπροσωπεύονται από επιμήκεις μικροπόρους.

Η φυλλώδης μικροδομή χαρακτηρίζεται από τον προσανατολισμό των αργιλικών μικροσυσσωματωμάτων παράλληλα προς τις μεγαλύτερες έδρες τους, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται στη θεμελιώδη μάζα με τη μορφή ελασμάτων. Οι μικροπόροι, εξάλλου, έχουν επίμηκες σχήμα.

5.2 ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ

Ο Sokolov (1990) πρότεινε μια τεχνικογεωλογική ταξινόμηση των μικροδομών αργιλικών ιζημάτων και αναγνώρισε στα ιζήματα που μελέτησε τρεις κατηγορίες μικροδομών: λεπτομερώς διεσπαρμένη (finedispersed), μέτρια διεσπαρμένη (medium dispersed) και αδρομερώς διεσπαρμένη (coarsedisdispersed), τρεις υποκατηγορίες: με χαμηλό, μέσο και υψηλό βαθμό προσανατολισμού των δομικών στοιχείων για κάθε μία από τις πύο πάνω κατηγορίες και τρεις ομάδες με βάση ενεργειακά χαρακτηριστικά: «σύμπτυξης» (coagulative), «μικτού τύπου» (mixed) και «κρυσταλλική – συγκολλημένη» (crystallized - cementated). Οι εικόνες SEM αυτών των τύπων των μικροδομών δίνονται από τον Sokolov (1990). Κάθε τύπος χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο πακέτο μορφομετρικών, γεωμετρικών και ενεργειακών δεικτών που δίνει τη δυνατότητα πρόβλεψης της αντοχής και του τρόπου παραμόρφωσης των αργιλικών ιζημάτων.

6. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΔΟΜΩΝ ΜΑΡΓΑΪΚΩΝ ΙΖΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ Β. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

Με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία, δίνονται στον πίνακα 3 παραδείγματα μελέτης της μικροδομής τεσσάρων δειγμάτων που ελήφθησαν από πρηνή λεπτομερών μαργαϊκών ιζημάτων, Νεογενούς – Πλειστοκαινικής ηλικίας, της Β. Πελοποννήσου (Χριστοδουλοπούλου, 2000).

Τα χαρακτηριστικά της μικροδομής (μορφομετρικά, γεωμετρικά, ενεργειακά) εκτιμήθηκαν ποιοτικά και εν μέρει ποσοτικά από τις εικόνες των μικροσκοπιών, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τα φυσικά χαρακτηριστικά και την ορυκτολογική ανάλυση των δειγμάτων (Πίν. 1 και Πίν. 2, αντίστοιχα (Χριστοδουλοπούλου, 2000)). Τα ενεργειακά χαρακτηριστικά των δειγμάτων από τις περιοχές Ρωμανός, Μονή Αγ. Νικολάου, Σπαθοβούνι εκτιμήθηκαν σε συνδυασμό με το συνολικό χαρακτηρισμό της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, που προέκυψε από αστραγγιστές τριαξονικές δοκιμές φόρτισης (Χριστοδουλοπούλου, 2000).

Πίνακας 1. Φυσικά χαρακτηριστικά και λιθολογική ταξινόμηση των δειγμάτων

(*) : Τοπωνύμιο

(**):Βάθος από την κορυφή του πρηνούς

Πίνακας 2. Ποσοστιαίες αναλογίες των αργιλικών ορυκτών στο ολικό δείγμα, όπως προσδιορίστηκαν με XRD, DTA, TG. Συνολικό ποσοστό χαλαζία, αστρίων και μαργαργία στο δείγμα

Table 2. Clay mineral percentages in the total sample, determined by XRD, DTA, TG. Total percentage of quartz, feldspars and mica in the sample

Νο- μός	Δείγμα	Κοκκομετρική σύσταση			Δείκτης πλαστικότητας PI (%)	Λόγος κενών, e	Συνολικό Πορώδες, n (%)	Ξηρό φαινόμενο βάρος γλ (g/cm ³)	% ισοδύναμο CaCO ₃ στο ολικό δείγμα	Λιθολογική Ταξινόμηση
		Άμμος (%)	Ιλύς (%)	Αργίλος (%)						
ΑΧΑΪΑΣ	ΘΕΡΙΑΝΟ (*), 22m (**)	1	58	41	17	0,508	33,7	1,77	27	Αργιλική μάργα
	ΡΩΜΑΝΟΣ Θ2, 4.8 m	1	61	38	16	0,383	27,7	1,93	8	Μαργαϊκή άργιλος
ΚΟΡΙΝΘΙ ΑΣ	ΜΟΝΗ ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΥ, 2.8 m	0	68	32	11	0,431	30,1	1,86	77	Ασβεστό- μαργα
	ΣΠΑΘΟΒΟΥΝΙ, 45 m	1	57	42	14	0,309	23,6	2,07	40	Μάργα

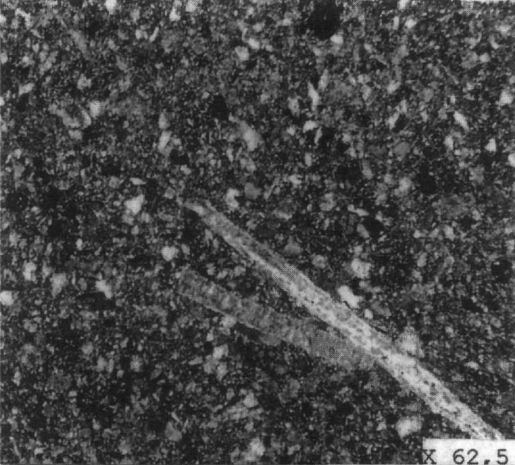
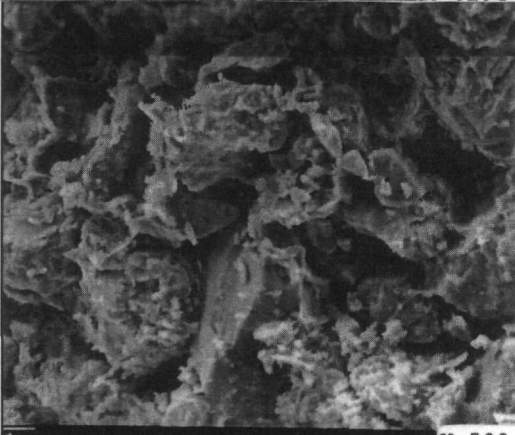
Επεξηγήσεις: Kaol=Καολινίτης (προσδιορισμένο από TG), Ill=Ιλλίτης, Ch=Χλωρίτης, Sm=Σμεκτίτης, (14c-14s)=Χλωρίτης-Σμεκτίτης(μικτή φάση), (14c-14v)=Χλωρίτης-Βερμικουλίτης(μικτή φάση).

Πίνακας 3. Παραδείγματα μικροδομών μαργαϊκών ιζημάτων της Β. Πελοποννήσου.
Table 3. Microstructures of marly sediments from N. Peloponnese.

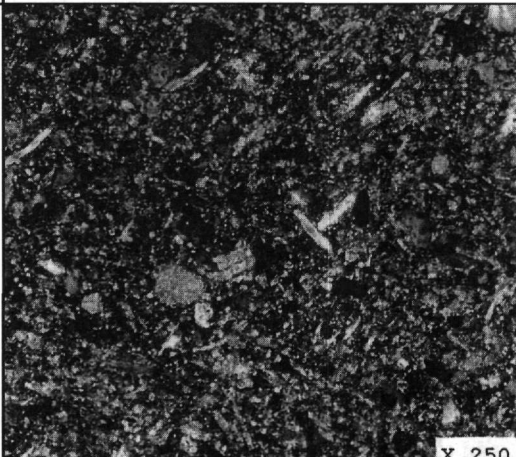
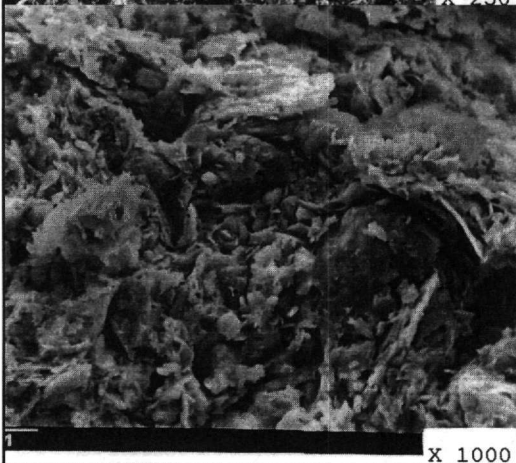
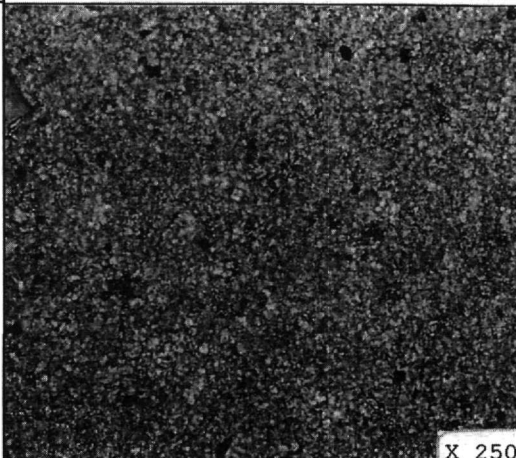
Δείγμα	Kaol (%)	ILL (%)	Ch (%)	Sm (%)	(14c-14s) (%)	(14c-14n) (%)	Συνολικό ποσοστό αργιλικών ορυκτών (%)	Χαλαζί(ας) + άστριοι + μαρμαρυγ. (%)
ΘΕΡΙΑΝΟ, 22 m	3	15	5	---	10	---	33	40
ΡΩΜΑΝΟΣ Θ2, 4.8 m	6	17	6	---	8	---	37	55
ΜΟΝΗ ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΥ, 2.8 m	3	6	β÷ίφ	14	β÷ίφ	---	23	0
ΣΠΑΘΟΒΟΥΝΙ, 45 m	8	14	---	7	---	7	36	24

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

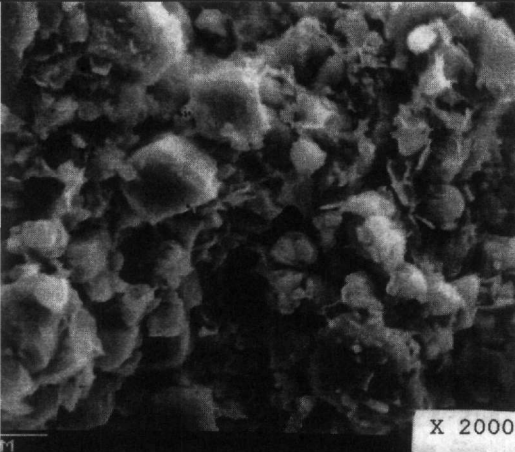
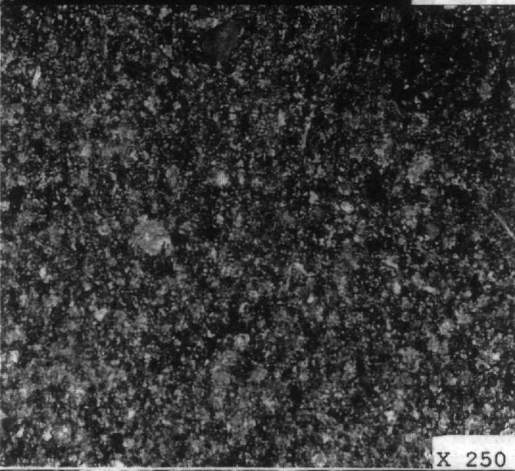
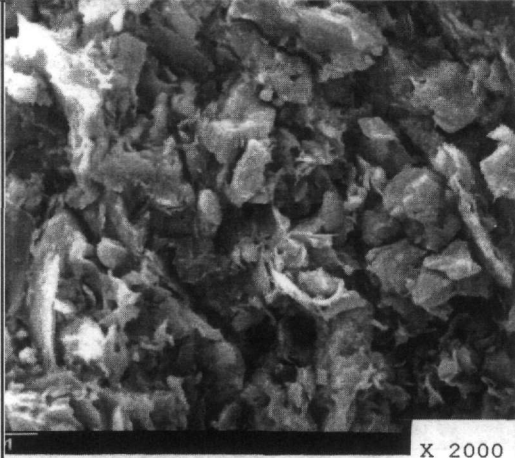
Η μελέτη των μικροδομών αργιλικών ιζημάτων βασίστηκε σε μια μεθοδολογία που περιλαμβάνει: α) την ποιοτική και ημιοσοτική ορυκτολογική ανάλυση των συστατικών των ιζημάτων, β) τον προσδιορισμό φυσικών χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τα μικροδομικά χαρακτηριστικά (όπως π.χ. ξηρό φαινόμενο βάρους, πορώδες, κοκκομετρική σύσταση κ.α.), γ) την εξέταση των ιζημάτων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σαρώσεως (SEM) και στο πολωτικό μικροσκόπιο, δ) τον προσδιορισμό της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης των υλικών σε συνθήκες τριαξονικής συμπίεσης, η οποία δίνει πληροφορίες για τον επικρατούμενο τύπο δομικού δεσμού. Από τη συναξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα μορφομετρικά, γεωμετρικά και ενεργειακά χαρα-

Δείγμα	Μικροφωτογραφίες	Χαρακτηριστικά μικροδομής - Τύπος μικροδομής
ΘΕΡΙΑΝΟ, 22 Μ		<p>Πολωτικό μικροσκόπιο (• Nicols):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Συνδεδετική - σκελετική κατά θέσεις δομή. Γωνιώδεις κόκκοι χαλαζία μέσα σε αργιλομαργαϊκή θεμελιώδη μάζα. • Συγκολλητική ασβεστίτηκη ύλη με μικριτική μορφή και με μορφή ασβεστίτικων συγκολλήσεων. • Θραύσματα απολιθωμάτων (ραβδοειδή τεμάχια).
		<p>Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σαρώσεως:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ανοικτή δομή με σχετικά μεγάλο πορώδες. • Μικροσυσσωματώματα κυρίως ιλίτη και γλωρίτη-σιμεκίτη με σύνδεση FF, ανισομετρικά, σχηματίζουν μεγαλύτερα συσσωματώματα EF, επίσης ανισομετρικά, τα οποία δημιουργούν λεπτούς συνδέσμους μεταξύ των κόκκων. [Σημειώνεται ότι το δείγμα από έδειξε χαμηλό μέτρο ελαστικότητας σε δοκιμή μονοαξονικής συμπίεσης, λόγω της γρήγορης κατάρρευσης των αργιλικών συνδέσμων (Χριστοδουλοπούλου, 2000)]. • Σχηματίζονται μικροπόροι μεταξύ των συσσωματωμάτων (interaggregate micropores, της τάξης των 5-10 μm), μεταξύ των κόκκων (intergranular, της τάξης των 15-30 μm) και λιγότερο μεταξύ των μικροσυσσωματωμάτων. • Δομικοί δεσμοί όλων των τύπων (επτός κρυσταλλικών). <p>Μικροδομή «μικτού τύπου» αδρομερώς διεσαπαρμένη, με χαμηλό βαθμό προανατολισμού.</p>

Πίνακας 3. (Συνέχεια)
Table 3. (Continued)

Δείγμα	Μικροφωτογραφίες	Χαρακτηριστικά μικροδομής – Τύπος μικροδομής
ΡΩΜΑΝΟΣ Θ2, 4.8 m		<p>Πολωτικό μικροσκόπιο (· Nicols):</p> <ul style="list-style-type: none"> · Συνδεδειγμένη δομή. Δεπτό χαλαζιακό υλικό με υπογωνιώδες έως αεστρογγυλεμένο σχήμα κόκκων, καθώς και μαρμαρυγιακό υλικό με επίμηρες σχήμα κόκκων, «βυθίζεται» μέσα σε μια αργιλική – αργιλομαργαϊκή θεμελιώδη μάζα.
		<p>Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σαρώσεως :</p> <ul style="list-style-type: none"> · Πυκνή δομή με μέτρια τιμή πορώδους · Μικροσυσσωματώματα – συσσωματώματα ιλλίτη, χλωρίτη και χλωρίτη – σμεκτίτη, με σύνδεση FF και EF, ανισομετρικά και μη, κατανέμονται πυκνά γύρω από τα υπόλοιπα συστατικά με τρόπο συνεχή. · Σχηματίζονται μικροπόροι κυρίως μεταξύ των μικροσυσσωματωμάτων – συσσωματωμάτων παρά μεταξύ των κόκκων. Οι μικροπόροι αυτοί είναι μεγέθους της τάξης των 5-15 μm (intermicroaggregate-interaggregate micropores) και 0,5-2 μm (interultramicroaggregate micropores). · Δομικοί δεσμοί τύπου «σύμπτυξης» με κοντινή απόσταση μεταξύ των τεμαχιδίων · Μικροδομή τύπου «σύμπτυξης», μετρίου διεσπαρμένη, με μέτριο βαθμό προσανατολισμού.
ΜΟΝΗ ΑΓΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ, 2.8 m		<p>Πολωτικό μικροσκόπιο (· Nicols):</p> <ul style="list-style-type: none"> · «Βολώδης» δομή. [Τον χαρακτηρισμό αυτό χρησιμοποίησαν οι Terzaghi & Peck (1969) για τη δομή των μαργών]. · Το μικριτικό ασβεστικό υλικό κυριαρχεί στη δομή και σχηματίζει «βόλους» από ισομεγέθεις ανώμαλα στρογγυλεμένους ασβεστικούς κρυστάλλους. Μαζί με το αργιλικό υλικό, αποτελεί θεμελιώδη μάζα. <p>Ομοιόμορφη δομή. Ενίοτε παρατηρούνται, κλαστικοί κόκκοι χαλαζία.</p>

Πίνακας 3. (Συνέχεια)
Table 3. (Continued)

Δείγμα	Μικροφωτογραφίες	Χαρακτηριστικά μικροδομής – Τύπος μικροδομής
ΜΟΝΗ ΑΓΓΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ, 2.8 m	 <p style="text-align: right;">X 2000</p>	<p>Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σαρώσεως :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Δομή με πολύ υψηλό ποσοστό αυθιγενούς φάσης (CaCO₃) η οποία απαντάται σε μικριτική μορφή (ισομεγέθεις ανώμαλα στρογγυλεμένοι μικροκρύσταλλοι ασβεστίτη), με ομοιόμορφη κατανομή. • Τα τεμαχίδια των αργιλικών ορυκτών, που είναι κυρίως ο σμεκτίτης και δευτερευόντως ο ιλλίτης, απαντώνται ή κροκιδωμένα (EF) αλλά σε διασπορά ή σε υπομικροσκοπικά (ανισομετρικά) συσσωματώματα (FF) ή σε ισομεγέθη μικροσυσσωματώματα (EF). Περιβάλλουν ισομερώς, αλλά με τρόπο ασυνεχή, άλλα δομικά συστατικά. • Οι μικροπόροι είναι κυρίως μεγέθους < 10μm και σχηματίζονται κατά πλειοψηφία μεταξύ των μικριτών ασβεστίτη (intercrystal) και λιγότερο μεταξύ των μικροσυσσωματωμάτων. • Υπερτερούν οι κρυσταλλικοί – συγκολλητικοί δεσμοί. • Κρυσταλλική – συγκολλημένη μικροδομή, λεπτομερώς διεσπαρμένη, με χαμηλό βαθμό προσανατολισμού.
ΣΠΑΘΟΒΟΥΝΙ, 45 m	 <p style="text-align: right;">X 250</p>	<p>Πολωτικό μικροσκόπιο (· Nicols):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Συνδετική δομή. • Διακρίνονται κόκκοι χαλαζία, καθώς και ασβεστιτικές συγκολλήσεις μεγέθους ιλύος, μέσα σε μια αργιλομαργαίτη θεμελιώδη μάζα. • Παρατηρούνται επίσης μικρορωγμές με οξείδια στο εσωτερικό τους.
	 <p style="text-align: right;">X 2000</p>	<p>Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σαρώσεως :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Πυκνή δομή, μικροί πορώδες. • Τα αργιλικά ορυκτά σχηματίζουν ανισομετρικά συσσωματώματα (EF, FF-ιλλίτης, καολινίτης) αλλά και υπομικροσκοπικά συσσωματώματα (FF-σμεκτίτης). Σε αρκετά σημεία δημιουργούν συνεχείς αργιλικούς συνδέσμους μεταξύ των άλλων δομικών συστατικών. • Ο ασβεστίτης απαντάται με μικριτική μορφή στη θεμελιώδη μάζα. • Οι μικροπόροι είναι κυρίως της τάξης των 5-8 μm, και σχηματίζονται τόσο μεταξύ των μικροσυσσωματωμάτων όσο και μεταξύ των μικριτών ασβεστίτη ή άλλων κόκκων. • Παρατηρούνται όλοι οι τύποι των δεσμών, υπερτερούν όμως οι κρυσταλλικοί – συγκολλητικοί δεσμοί. • Κρυσταλλική-συγκολλημένη μικροδομή, μετρίως διεσπαρμένη με χαμηλό βαθμό προσανατολισμού

κηριστικά της μικροδομής με βάση τα οποία αναγνωρίζεται ο τύπος της.

Με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία διακρίθηκαν τρεις τύποι μικροδομών σε μαργαίκα ιζημάτα της Β. Πελοποννήσου: 1) Μικροδομές τύπου «σύμπτυξης»: Επικρατούν ασθενείς δομικοί δεσμοί μεταξύ αργιλικών μικροσυσσωματωμάτων που οι ιδιότητές τους ελέγχονται από τη μεμβράνη του προσροφημένου νερού (πλαστική θραύση υλικού). Τα αργιλικά ορυκτά βρίσκονται κατά κανόνα σε αφθονία. 2) Μικροδομές «μικτού τύπου»: Απαντώνται διάφοροι τύποι δομικών δεσμών και κυρίως μεταβατικοί σημειακού χαρακτήρα (μετασταθείς δεσμοί). Οι ιδιότητες ελέγχονται και από τις επαφές μεταξύ των τεμαχιδίων (αργιλικής, ασβεστιτικής, χαλαζιακής, κ.α. σύστασης), αλλά και από το προσροφημένο νερό (ψαθυρή θραύση υλικού). Δομές υψηλότερης αντοχής από την προηγούμενη περίπτωση. 3) «Κρυσταλλικές-συγκολλημένες» μικροδομές: Χαρακτηρίζονται από την αφθονία ασβεστιτικού υλικού (μικρίτες) στη θεμελιώδη μάζα και την επικράτηση ισχυρών συγκολλητικών-κρυσταλλικών δεσμών (ψαθυρή θραύση υλικού). Τα αργιλικά ορυκτά σχηματίζουν κατά κανόνα υπομικροσκοπικά συσσωματώματα που κατανέμονται ασυνεχώς στη δομή.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ADAMS, A.E., MacKENZIE, W.S. & GUILFORD, C. (1984). Atlas of sedimentary rocks under the microscope. Longman Scientific & Technical. Copublished in the United States. 104 pp.
- BAYNES, F.J., DEARMAN, W.R. (1978). Scanning electron microscope studies of weathered rocks : A review of Nomenclature and Methods. *Bull. Int. Ass. Eng. Geol.*, No 18, 199-204.
- COLLINS, K & McGOWN, A. (1974). The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. *Geotechnique*, 24, 223-254.
- GILLOTT, E.J. (1987). Clay in Engineering Geology. Elsevier, 449 pp.
- GILLOTT, J.E. (1969). Study of the fabric of fine-grained sediments with the Scanning Electron Microscope. *Journal of Sedimentary Petrology*, 39, 1, 90 - 105.
- HOLTZ, D.R. & KOVACS, D.W. (1981). An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 733 pp.
- MITCHELL, J.K. (1976). Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley and Sons, Inc., N. York, 407 pp.
- OSIPOV, V.I. (1990). Physico - chemical fundamentals of soil microrheology. *Proc. of 6th International IAEG Congress*, 713 - 724. Balkema, Rotterdam.
- OSIPOV, V.I. (1978). Structural bonds as the basis of the engineering - geological classification of clayey soils. *Proc. III Int. Cong. IAEG, Sec. ÉÉ*, Vol. 2, 160 - 165.
- OSIPOV, V.I. (1988). Structural strength of soils and physico - mechanical fundamentals of its quantification. *Engineering geology today : theory, problems, practics*, 77 - 91. Moscow University Publisher.
- SERGEYEV, Y.M., GRABOWSKA - OLSZEWSKA, B., OSIPOV, V.I., SOKOLOV, V.N. & KOLOMENSKI, Y.N. (1980). The classification of microstructures of clay soils. *J. Microscopy*, 120, 3, 237 - 260.
- SERGEYEV, Y.M., OSIPOV, V.I. & SOKOLOV, V.N. (1985). Quantitative analysis of soil structure with the microcomputer system. *Bull. Int. Ass. Engn. Geol.*, N° 31, 131 - 136.
- SOKOLOV, V.N. (1990). Engineering - geological classification of clay microstructures. *Proc. of 6th Int. IAEG Congress*, 753 - 760. Balkema, Rotterdam.
- SOKOLOV, V.N. & O'BRIEN, N.R. (1990). A fabric classification of argillaceous rocks, sediments, soils. *Appl. Clay Sci.*, 5, 353-360.
- TERZAGHI, K. & PECK, R. (1969). Εφαρμοσμένη Εδαφομηχανική. Μετάφραση της δεύτερης έκδοσης. Τόμοι Α', Β', 825 σελ.
- TOVEY, N.K. (1971). A selection of scanning electron micrographs of clays. CUED/C - SOIL/TR5a University of Cambridge, Department of Engineering.
- WELTON, J.E. (1984). SEM Petrology Atlas. The American Association of Petroleum Geologists. 237 pp.
- ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΠΟΥΛΟΥ, Τ.Α. (2000). Μικροδομή των λεπτομερών Νεογενών-Πλειστοκαινικών ιζημάτων της Βορείου Πελοποννήσου σε σχέση με τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Διδακτορική διατριβή. Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας. Τόμος Α', 464 σελ., Τόμος Β', 130 σελ.