

4. Φύλλωση – Γράμμωση

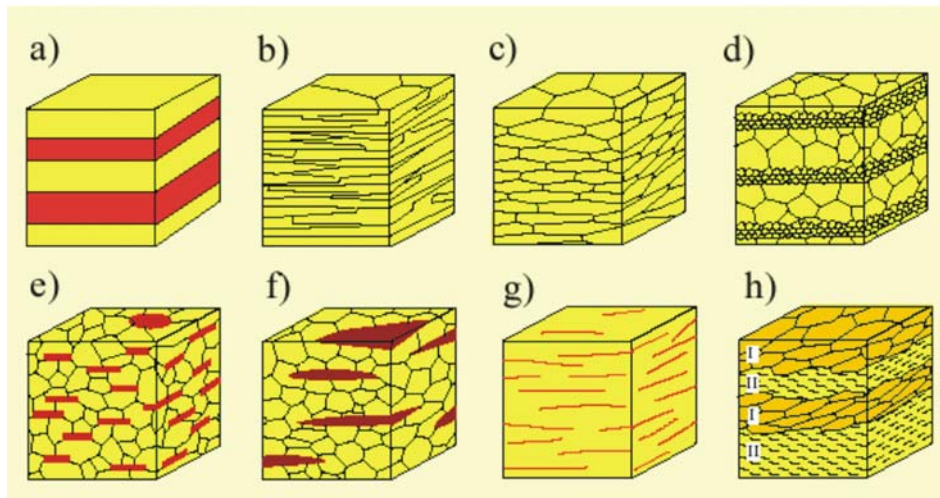
4.1 Εισαγωγή

Πολλές μικροδομές σε ένα πέτρωμα καθορίζονται από τον προτιμητέο προσανατολισμό των ορυκτών ή άλλων στοιχείων του τεκτονικού ιστού. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται δομές που στη σύγχρονη βιβλιογραφία αναφέρονται ως *φυλλώσεις (foliations)* και *γραμμώσεις (lineations)*. Σε ορισμένες περιπτώσεις αναφέρεται χωριστά και ο όρος *προτιμητέος προσανατολισμός κρυσταλλικού πλέγματος (lattice preferred orientation – LPO)*.

Ο όρος φύλλωση χρησιμοποιείται σαν ένας γενικός όρος ο οποίος περιγράφει οποιαδήποτε "επίπεδη" δομή που αναπτύσσεται συστηματικά μέσα σε ένα γεωλογικό σώμα, αποτελώντας μια διαμπερή δομή (penetrative structure). Μπορεί να αναφέρεται στη *στρώση (bedding)* των ιζηματογενών πετρωμάτων, στη *στρωμάτωση* -λόγω διαφοράς στη σύσταση- (*compositional layering*) των πυριγενών πετρωμάτων ή στο *σχισμό (cleavage)* και τη *σχιστότητα (schistosity)* των μεταμορφωμένων. Οι διακλάσεις συνήθως εξαιρούνται από τον όρο αυτό, δεδομένου ότι δεν αποτελούν, συνήθως, διαμπερείς επιφάνειες. Ο ορισμός αυτός για τη φύλλωση προτιμάται συνήθως στη βιβλιογραφία από άλλους γενετικούς όρους, αφού συχνά είναι δύσκολο να προσδιορισθεί η προέλευση μιας επίπεδης δομής σε ένα παραμορφωμένο πέτρωμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις ταυτίζεται με τον όρο *S-flachen* δηλαδή *S-plains (structures)* ή *S-επίπεδα (δομές)* ή πιο σωστά *S-επιφάνειες* που πρώτος ονόμασε ο B. Sander (1950). Τα πετρώματα που χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη διαμπερών επίπεδων δομών, που όμως έχουν προέλθει από καθαρά τεκτονικά αίτια (*τεκτονική ροή – tectonic flow*), αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως *S τεκτονίτες (S tectonites)*.

Τα στοιχεία του τεκτονικού ιστού που καθορίζουν και διαμορφώνουν μια φύλλωση είναι τα ακόλουθα (Εικ. 4.1):

- Η στρωμάτωση (compositional layering)
- Ο προτιμητέος προσανατολισμός (preferred orientation) των φυλλωδών ορυκτών (π.χ. του μαρμαρυγία).
- Ο προτιμητέος προσανατολισμός των ορίων των κρυστάλλων και το σχήμα παραμορφωμένων ορυκτών (π.χ. χαλαζίας, ασβεστίτης κλπ.).
- Οι συστηματικές, κατά ζώνες μεταβολές και διαφοροποιήσεις στο μέγεθος των ορυκτών.
- Ο προτιμητέος προσανατολισμός φυλλωδών ορυκτών που βρίσκονται σε μια μάζα που αποτελείται από ορυκτά χωρίς προσανατολισμό (π.χ. οι μαρμαρυγίες σε ένα μαρμαρυγιακό χαλαζίτη ή γνεύσιο).



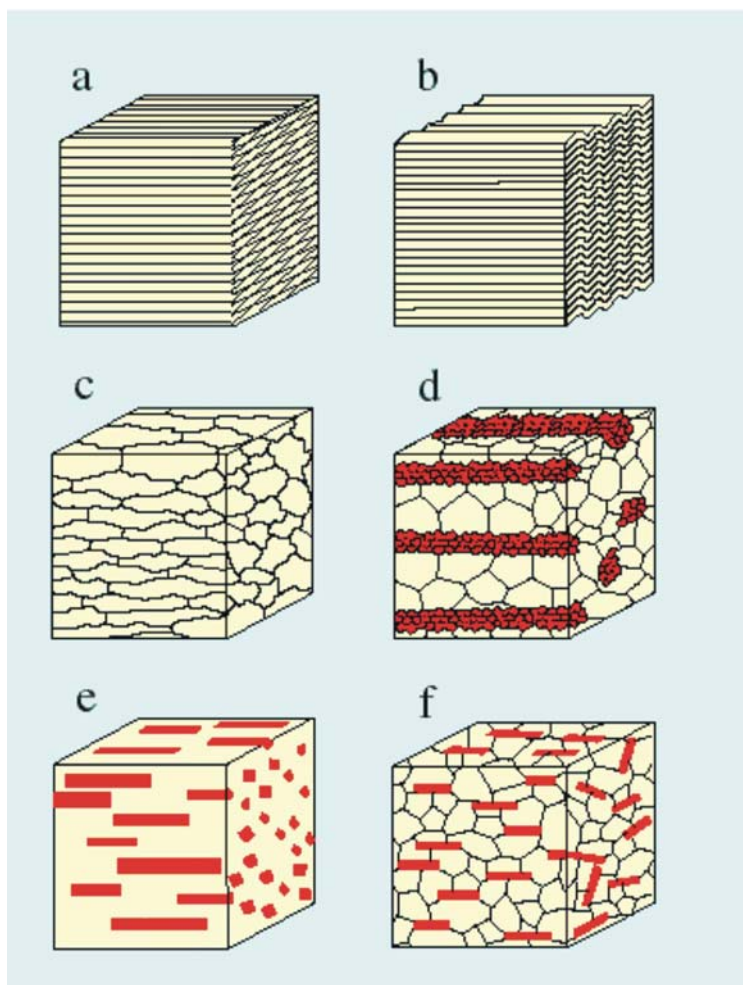
Εικ. 4.1. Τα στοιχεία του τεκτονικού ιστού που διαμορφώνουν μια φύλλωση.

- f) Ο προτιμητέος προσανατολισμός αθροισμάτων ορυκτών που έχουν φακοειδές σχήμα.
- g) Ο προτιμητέος προσανατολισμός διαρρήξεων και μικρορηγμάτων μέσα στο πέτρωμα.
- h) Ο συνδυασμός των περιπτώσεων α, β & γ, που είναι πολύ συχνός στα μεταμορφωμένα πετρώματα.

Σαν *γράμμωση (lineation, L-structure)*, ορίζονται όλες οι διαμπερείς δομές που παρουσιάζουν μια σαφή γραμμική διάταξη μέσα σε ένα γεωλογικό σώμα. Τα στοιχεία του τεκτονικού ιστού που διαμορφώνουν μια γράμμωση είναι τα ακόλουθα (Εικ. 4.2):

- a) *Γράμμωση από διατομή (intersection lineation)*, που δημιουργείται από διατομή δύο φυλλώσεων ή διατομή στρώσης και φύλλωσης.
- b) *Γράμμωση από μικροπτύχωση (crenulation lineation)*, που δημιουργείται από τα κορυφαία των μικροπτυχών σε μια επιφάνεια φύλλωσης.
- c) *Γράμμωση έκτασης ή εφελκυστική γράμμωση (stretching ή extensional lineation)*, που δημιουργείται από παραμορφωμένους και επιμηκυμένους κόκκους ορυκτών κάτω από έντονη παραμόρφωση (π.χ. ο χαλαζίας που συνήθως σχηματίζει και ομομεγέθεις κόκκους).
- d) *Stretching lineation* που δημιουργείται όμως από επιμήκυνση αθροισμάτων ορυκτών. Ακόμα και οι παραμορφωμένες κροκάλες ενός μετα-κροκαλοπαγούς μπορούν να δώσουν τέτοια γράμμωση. Αντίστοιχος με αυτόν είναι και ο όρος *γραμμικός ιστός (linear shape fabric)*.
- e) *Ορυκτολογική γράμμωση (mineral lineation)*, που δημιουργείται από την παράλληλη διεύθυνση ινωδών ορυκτών ή ορυκτών που έχουν επίμηκες σχήμα (π.χ. αμφίβολοι, σιλιμανίτης, τουρμαλίνη κλπ.).
- f) *Ορυκτολογική γράμμωση* που δημιουργείται από την παράλληλη διεύθυνση ενός άξονα φυλλωδών ορυκτών (π.χ. μαρμαρυγίες).

Τα πετρώματα που χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη διαμπερών γραμμικών δομών, που όμως έχουν προέλθει από καθαρά τεκτονικά αίτια (*τεκτονική ροή – tectonic flow*), αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως *L τεκτονίτες (L tectonites)*.



Εικ. 4.2. Στοιχεία του τεκτονικού ιστού που διαμορφώνουν μια γράμμωση.

Εξετάζοντας μια φύλλωση στις τρεις διαστάσεις παρατηρείται συχνά ότι αυτή σχετίζεται και με ένα γραμμικό στοιχείο, το οποίο προέρχεται από το γεγονός ότι τα στοιχεία του τεκτονικού ιστού που διαμορφώνουν τη φύλλωση παρουσιάζουν μια πιο έντονη διεύθυνση σε μια συγκεκριμένης διεύθυνσης εγκάρσιας τομή στη φύλλωση σε σχέση με άλλες. Πολύ συχνά παρατηρείται μια πλήρης μετάβαση από S τεκτονίτες (χαρακτηρίζονται μόνο από φύλλωση) σε LS τεκτονίτες (φύλλωση και γράμμωση) και τελικά σε L τεκτονίτες (μόνο γράμμωση). Σε πρακτικό επίπεδο έχει παρατηρηθεί να συμβαίνουν τέτοιες μεταβάσεις σε κλίμακα μιας μόνο εμφάνισης στην ύπαιθρο. Μάλιστα πολλές γραμμώσεις μπορεί να εξελίσσονται από ή σε φυλλώσεις με το χρόνο.

Είναι σημαντικό όταν περιγράφεται μια φύλλωση να περιγράφεται και η σχέση που αυτή έχει με τη γράμμωση, αν φυσικά υπάρχει και είναι παρούσα. Τα γραμμικά στοιχεία του τεκτονικού ιστού που έχουν ίδια ηλικία με μια φύλλωση σε ένα πέτρωμα είναι πολύ σημαντικά από τεκτονική άποψη γιατί δίνουν πολλά κινηματικά στοιχεία και κυρίως τη διεύθυνση της τεκτονικής μεταφοράς (tectonic transport). Η γράμμωση επίσης είναι αυτή που λαμβάνεται υπόψη για να καθορισθεί ο προσανατολισμός της λεπτής τομής που θα γίνει σε ένα δείγμα, ώστε να συλλεχθούν όσο το δυνατόν περισσότερα κινηματικά στοιχεία (βλπ. στα επόμενα).

Πολλά πετρώματα παρουσιάζουν έναν προτιμητέο προσανατολισμό σε επίπεδο πλέγματος (lattice preferred orientation – LPO), που αντιπροσωπεύει έναν όχι τυχαίο προσανατολισμό των κρυσταλλογραφικών αξόνων των ορυκτών. Πολλές φυλλώσεις ή γραμμώσεις καθορίζονται και είναι το αποτέλεσμα αυτού του προσανατολισμού. Συνήθως όμως ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για ορυκτά όπως ο χαλαζίας ή ο ασβεστίτης ο LPO των οποίων δεν μπορεί να διακριθεί στην ύπαιθρο ή σε λεπτές τομές, χωρίς τη χρήση ειδικών τεχνικών.

4.2 Φυλλώσεις

4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σε πολλές περιπτώσεις παραμορφωμένων και μεταμορφωμένων πετρωμάτων μπορούν να διακριθούν, στην ύπαιθρο ή σε λεπτές τομές, διαδοχικές φυλλώσεις να επικαλύπτουν η μία την άλλη. Η μελέτη των φυλλώσεων αυτών και η ερμηνεία των συνθηκών παραμόρφωσης και μεταμόρφωσης κατά τη διάρκεια της δημιουργίας τους, αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την "αποκρυπτογράφηση" της τεκτονο-μεταμορφικής ιστορίας μιας περιοχής. Οι φυλλώσεις χρησιμοποιούνται επίσης ως δομές αναφοράς για το σχετικό προσδιορισμό των περιόδων ανάπτυξης των ορυκτών της μεταμόρφωσης και ιδίως των πορφυροβλαστών. Οι φυλλώσεις αλλά και οι γραμμώσεις αντιπροσωπεύουν σε γενικές γραμμές πιο διαμπερείς δομές απ' ό,τι οι πτυχές και ως εκ τούτου αποτελούν πιο αξιόπιστες δομές αναφοράς για τον προσδιορισμό των παραμορφωτικών φάσεων.

Οι πρωτογενείς φυλλώσεις (*primary foliations*) αντιπροσωπεύουν δομές που σχετίζονται με τις διαδικασίες σχηματισμού του πετρώματος. Η στρώση (*bedding*) στα ιζηματογενή πετρώματα και η μαγματική στρωμάτωση (*magmatic layering*) στα πυριγενή αποτελούν τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα πρωτογενών φυλλώσεων. Η διαγενετική φύλλωση (*diagenetic foliation*) σχηματίζεται από τη συμπίκνωση και συμπίεση λόγω διαγένεσης των ιζημάτων. Οι δευτερογενείς φυλλώσεις (*secondary foliations*) αναπτύσσονται μεταγενέστερα (π.χ. στα ιζηματογενή μετά τη λιθοποίηση) σαν αποτέλεσμα της παραμόρφωσης και της μεταμόρφωσης. Περιλαμβάνουν το σχισμό (*cleavage*), τη σχιστότητα (*schistosity*), τη μεταμορφική στρωμάτωση (*differentiated compositional layering*), τη μυλονιτική φύλλωση (*mylonitic foliation*) κλπ.

Η ανάπτυξη δευτερογενών φυλλώσεων αποτελεί συνήθως ένδειξη ότι το πέτρωμα παραμορφώνεται με όλκιμο τρόπο, αν και φυλλώσεις μπορούν να αναπτυχθούν και σε μερικές κατακλαστικές ζώνες. Δευτερογενείς φυλλώσεις που δεν είναι ομοιογενείς είναι συνήθως δύσκολο να διαχωρισθούν από την πρωτογενή στρώση ή στρωμάτωση. Η αναγνώριση της πρωτογενούς φύλλωσης είναι σημαντική γιατί στα μετα-ιζήματα επιτρέπει την αναγνώριση της τεκτονικής εξέλιξης από την ιζηματογένεση. Στην περίπτωση αυτή η πρωτογενής στρώση ονομάζεται ως S_0 και οι δευτερογενείς φυλλώσεις που ακολουθούν (με σχέσεις επικάλυψης) λόγω παραμόρφωσης και μεταμόρφωσης ως S_1 , S_2 , S_3 κλπ. Στην περίπτωση που η στρώση δεν μπορεί να αναγνωρισθεί μόνο το τελευταίο τμήμα της τεκτονο-μεταμορφικής εξέλιξης μπορεί να αναγνωρισθεί. Στην περίπτωση αυτή η πιο παλαιά αναγνωρίσιμη τεκτονική επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως S_n και οι νεότερες που ακολουθούν ως S_{n+1} , S_{n+2} , S_{n+3} κλπ.

4.2.2 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΦΥΛΛΩΣΗ

Στην περίπτωση πετρωμάτων πολύ χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης, που δεν είναι έντονα παραμορφωμένα, η αναγνώριση της στρώσης είναι συνήθως εύκολη, δεδομένου ότι τα κύρια χαρακτηριστικά της ιζηματογενούς ακολουθίας, συμπεριλαμβανομένων και των ιζηματοδομών, είναι καλά διατηρημένα. Στις περιπτώσεις όμως πιο έντονης παραμόρφωσης και σε συνθήκες υψηλότερου βαθμού μεταμόρφωσης η διάκριση της πρωτογενούς από τη δευτερογενή στρωμάτωση είναι συνήθως δύσκολη. Σε πολλά μεταμορφωμένα πετρώματα, όπως οι γνεύσιοι, η στρωμάτωση λόγω διαφοράς στη σύσταση (compositional layering) που παρουσιάζουν μπορεί να έχει ιζηματογενή, πυριγενή ή μεταμορφική/"παραμορφωτική" προέλευση, αλλά μπορεί να έχει και πιο σύνθετη φύση που να συνδυάζει αρκετές από τις προηγούμενες προελεύσεις.

Η στρώση στα ιζήματα προέρχεται συνήθως από μη συνεχείς διαδικασίες και έτσι δημιουργούνται σημαντικές μεταβολές στο πάχος και τη σύσταση, χωρίς σημαντική συμμετρία ως προς επίπεδο παράλληλο στη στρώση. Η δευτερογενής στρωμάτωση σχηματίζεται συνήθως από διαδικασίες διαφοροποίησης σε ένα εντατικό πεδίο που οδηγούν σε μια πιο μονότονη διττού χαρακτήρα δομή με επίπεδο συμμετρίας παράλληλο με τη στρώση. Μερικά κριτήρια που βοηθούν στη διάκριση των πρωτογενών από τις δευτερογενείς φυλλώσεις παρατίθενται στον πίνακα της επόμενης σελίδας. Στην πραγματικότητα μόνο το πρώτο και το τελευταίο από αυτά τα κριτήρια είναι ουσιαστικά. Η παρουσία ιζηματοδομών είναι ένας καλός δείκτης για στρώση και η συσχέτιση μιας στρωμάτωσης λόγω διαφοράς στη σύσταση με τα αξονικά επίπεδα πτυχών δείχνει καθαρά το δευτερογενή χαρακτήρα της στρωμάτωσης, που δημιουργείται ταυτόχρονα με την πτύχωση. Επίσης η παρουσία δύο διατεταμένων δομών στρωμάτωσης σε μεταμορφωμένα πετρώματα είναι καλός δείκτης ότι τουλάχιστον η μία από αυτές είναι δευτερογενής.

Σε πετρώματα μέσου ή υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης είναι δύσκολο να αναγνωρισθεί η στρώση. Διαδικασίες αντιμετάθεσης (transposition processes –βλπ. στα επόμενα) μπορεί να έχουν ολοσχερώς εξαφανίσει (obliterate) τιςγωνιώδεις σχέσεις ανάμεσα στις φυλλώσεις, αλλά και η έντονη παραμόρφωση και ανακρυστάλλωση μπορεί να έχουν εξαφανίσει τις ιζηματοδομές. Όπως αναφέρθηκε σε αυτές τις περιπτώσεις η παλαιότερη στρωμάτωση αναφέρεται ως S_0 , πάντα βέβαια πρέπει να κρατάμε στο νου μας ότι σε κάποια κλίμακα παρατήρησης μπορεί να αντιπροσωπεύει υπολείμματα της στρώσης.

Οι δομές που παρατηρούνται στη στρώση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης των νεότερων στρωμάτων σε λεπτές τομές. Σε πολλές περιπτώσεις αυτό γίνεται μέσα από την ασυμμετρία της διάθλασης μιας δευτερογενούς φύλλωσης. Προσοχή χρειάζεται στην περίπτωση που σαν κριτήριο "νεότητας" χρησιμοποιείται η διάβρωση της στρώσης, μιας και σε ορισμένες περιπτώσεις η ανάπτυξη μεταμορφωμένων ορυκτών μπορεί να αντιστρέψει την αρχική εικόνα, όπως π.χ. η ανάπτυξη μεγάλων κρυστάλλων μαρμαρυγίων ή άλλων ευμεγεθών ορυκτών όταν το αρχικό πέτρωμα είναι λεπτόκοκκος πηλίτης.

4.2.3 ΔΙΑΓΕΝΕΤΙΚΗ ΦΥΛΛΩΣΗ

Η *διαγενετική φύλλωση*, που αναφέρεται σαν φύλλωση παράλληλη στη στρώση, παρατηρείται πολύ συχνά σε πολύ χαμηλού ή χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης πηλιτικά ιζήματα

Κριτήρια διάκρισης πρωτογενών και δευτερογενών φυλλώσεων

ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΦΥΛΛΩΣΗ

Αναγνώριση ιζηματογενών δομών.

Έντονες διαφοροποιήσεις στο πάχος, ιδιαιτέρως εγκάρσια προς τη διεύθυνση των στρωμάτων.

Διαφοροποιήσεις στη σύσταση και το μέγεθος των κόκκων.

Συνήθως επίπεδη στρωμάτωση.

Σπάνια συμμετρία ως προς επίπεδο παράλληλο στη στρώση.

Δεν υπάρχει σχέση παραλληλίας της φύλλωσης με τα αξονικά επίπεδα των πτυχών

ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΦΥΛΛΩΣΗ

Απουσία ιζηματογενών δομών.

Μικρές διαφοροποιήσεις στο πάχος. Συνήθως εναλλάσσονται μεταξύ τους δύο "διαφορετικά πάχη".

Συνήθως διπλός χαρακτήρας στη σύσταση των στρωμάτων.

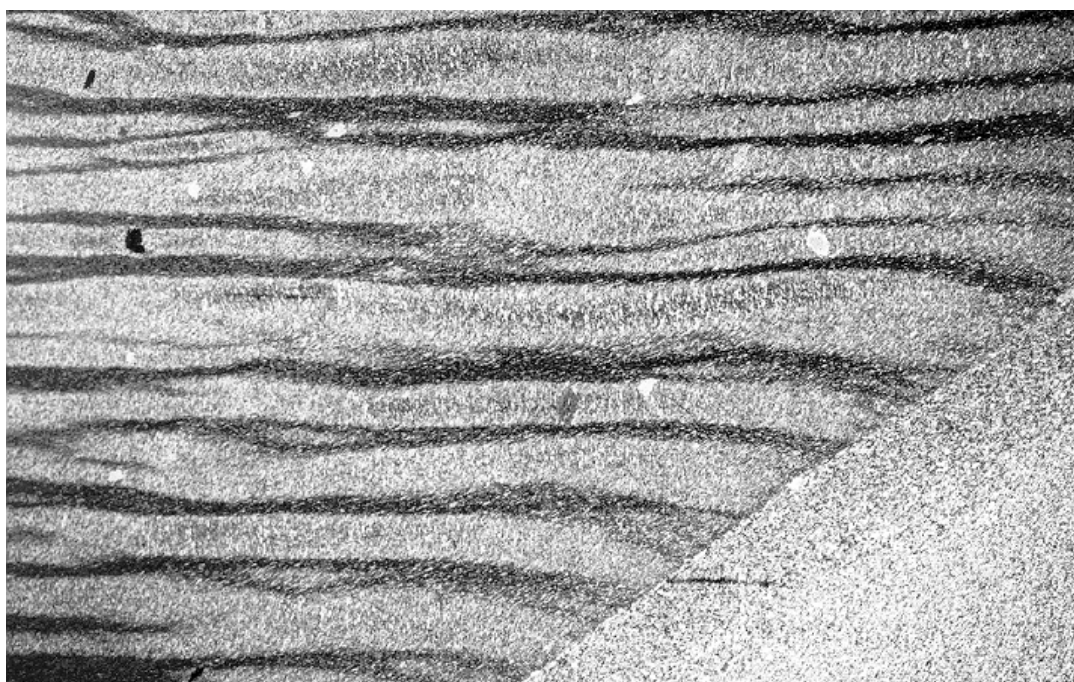
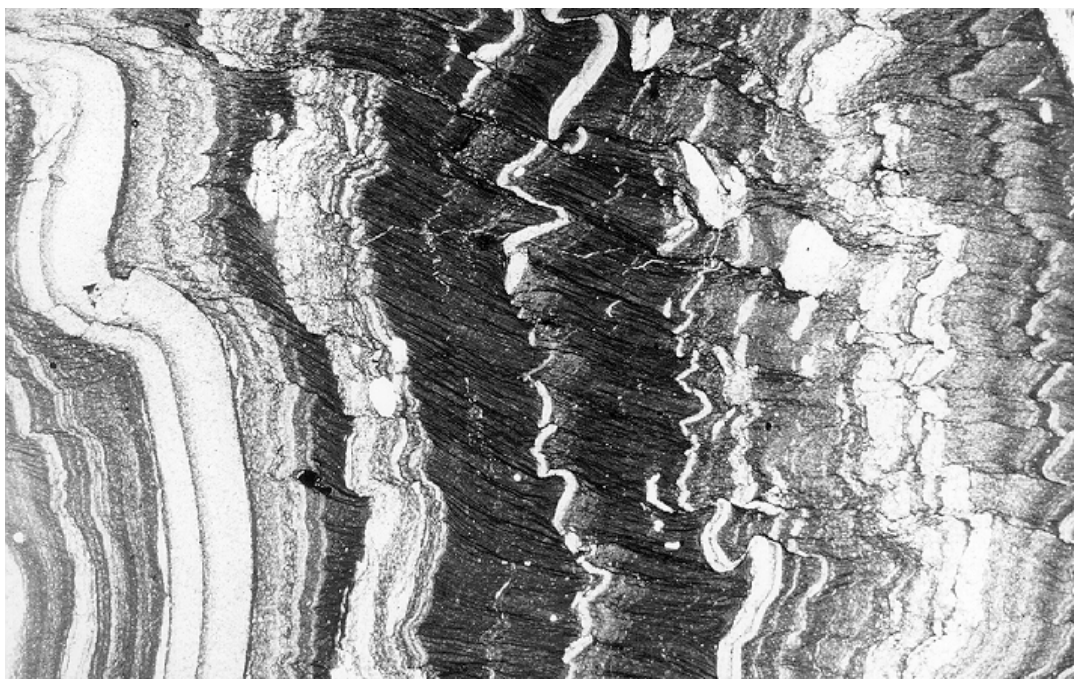
Στρωμάτωση συνήθως φακοειδής ή αναστομούμενη.

Συνήθως συμμετρία ως προς επίπεδο παράλληλο στη στρώση.

Φύλλωση παράλληλη ή υποπαράλληλη με τα αξονικά επίπεδα των πτυχών μιας παλαιότερης φύλλωσης.

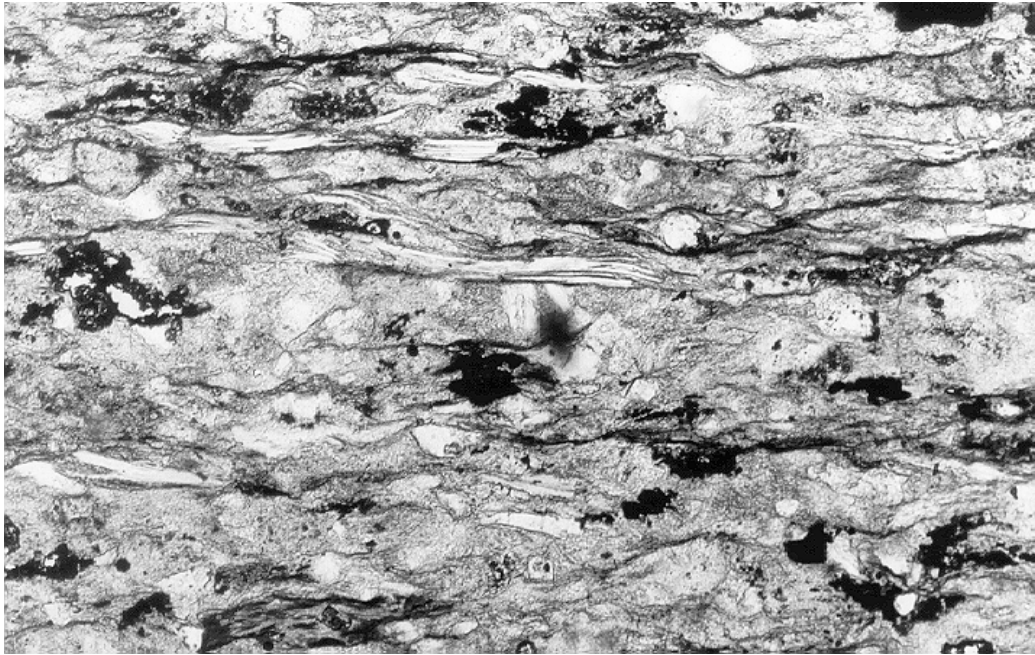
Η ύπαρξη δύο διατεμνόμενων φυλλώσεων φανερώνει ότι η μία τουλάχιστον από αυτές είναι δευτερογενής.

Εικ. 4.3. Κριτήρια διάκρισης πρωτογενών και δευτερογενών φυλλώσεων.



Εικ. 4.4. Στην πρώτη εικόνα φαίνεται μια πτυχωμένη στρώση S_0 . Στους σκοτεινόχρωμους ορίζοντες αναπτύσσεται μια δευτερογενής φύλλωση (spaced cleavage) S_2 , περίπου οριζόντια. Ονομάζεται S_2 γιατί όπως δείχνει η επόμενη εικόνα, που αποτελεί λεπτομέρεια της πρώτης, υπάρχει ένα παλαιότερο πτυχωμένο slaty cleavage S_1 , υποπαράλληλο της στρώσης (η διαγώνια γραμμή στο κάτω δεξί τμήμα της δεύτερης εικόνας), κατά άξονικό επίπεδο του οποίου αναπτύσσεται η S_2 .

που έχουν υποστεί ελάχιστη ή καθόλου παραμόρφωση. Καθορίζεται από τον παράλληλο προσανατολισμό λεπτών και επιμήκων κόκκων μαρμαρυγιών. Οι μαρμαρυγίες αυτοί αναπτύσσονται συνήθως υποπαράλληλα προς τη στρώση. Η διαγενετική φύλλωση θεωρείται το αποτέλεσμα της συμπίεσης και συμύκνωσης λόγω διαγένεσης, ενός ιζήματος που περιέχει κλαστικούς μαρμαρυγίες. Οι μαρμαρυγίες περιστρέφονται σταδιακά και αποκτούν ένα προσανατολισμό παράλληλο στη στρώση κατά τη διάρκεια της συμπίεσης λόγω συμύκνωσης. Η διαγενετική φύλλωση είναι ένα παράδειγμα φύλλωσης που καθορίζεται από τον προτιμητέο προσανατολισμό των μαρμαρυγιών που δεν σχετίζεται με πτυχές.



Εικ. 4.5. Στρώση και παράλληλη διαγενετική φύλλωση που καθορίζεται από επιμηκυσμένους κλαστικούς μαρμαρυγίες.

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται επίσης ότι η διαγενετική φύλλωση μπορεί να είναι πλάγια σε σχέση με τη στρώση, να συνδέεται με συνιζηματογενείς πτυχές και ακόμα να αντιπροσωπεύει τα αρχικά στάδια του *slaty cleavage* (βλπ. στα επόμενα). Για την άποψη αυτή υπάρχουν αρκετές αντιρρήσεις δεδομένου ότι τέτοιες φυλλώσεις συνήθως δείχνουν να έχουν σχηματισθεί μετά τη λιθοποίηση. Πλάγιες συνιζηματογενείς φυλλώσεις υπάρχουν, αλλά είναι εξαιρετικά σπάνιες.

4.2.4 ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΦΥΛΛΩΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια μορφολογική ταξινόμηση των δευτερογενών φυλλώσεων, καθώς και οι διαδικασίες που οδηγούν στην ανάπτυξή τους. Οι δευτερογενείς φυλλώσεις παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις στα μορφολογικά τους χαρακτηριστικά και ως εκ τούτου έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία διάφορα ονόματα για να περιγράψουν τις δομές αυτές, όπως *slaty cleavage*, *crenulation cleavage*, *differentiated layering*, *fracture cleavage* κλπ. Δυστυχώς η χρήση αυτών των όρων δεν είναι κοινή και σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται για την γενετική ταξινόμηση των φυλλώσεων. Π.χ. ο όρος *fracture cleavage* χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει ένα *spaced com-*

positional layering, δηλαδή μια στρωμάτωση λόγω διαφοράς στη σύσταση που αναπτύσσεται κατά διαστήματα, και πιθανά προέρχεται από την διάλυση υλικού κατά μήκος διαρρήξεων, οι οποίες όμως δεν είναι πλέον ορατές. Άλλες ερμηνείες για τις δομές αυτές δεν προϋποθέτουν την ύπαρξη διαρρήξεων και ως εκ τούτου τέτοιοι γενετικοί όροι είναι καλό να αποφεύγονται και να χρησιμοποιούνται απλά οι περιγραφικοί όροι.

Οι όροι *cleavage* (σχισμός) και *schistosity* (σχιστότητα) είναι ευρέως διαδεδομένοι και χρησιμοποιούνται ως οι βασικοί όροι για τις δευτερογενείς φυλλώσεις. Ο όρος σχισμός χρησιμοποιείται γενικότερα για τα λεπτόκοκκα πετρώματα, μέχρι την κλίμακα όπου τα ορυκτά (π.χ. μαρμαρυγίες) που σχηματίζουν τις επιφάνειες σχισμού είναι ορατά με γυμνό οφθαλμό. Ο όρος σχιστότητα χρησιμοποιείται γενικά για τις δευτερογενείς φυλλώσεις που καθορίζονται από πιο αδρόκοκκα ορυκτά. Οι δύο αυτοί όροι καλύπτουν όλο το φάσμα των δευτερογενών φυλλώσεων, ιδιαίτερα κατά την περιγραφή στην ύπαιθρο. Σημειώνεται πάντως ότι αυτός ο διαχωρισμός ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων δεν επεκτείνεται σε όλη την ορολογία που έχει καθιερωθεί για τις φυλλώσεις. Όροι όπως *crenulation cleavage*, *shear band cleavage*, *cleavage domain* και *cleavage lamellae* χρησιμοποιούνται γενικά άσχετα με το μέγεθος των κόκκων. Άλλος ένας όρος που επίσης χρησιμοποιείται είναι το *gneissosity* (γνευσιοσχιστότητα?, σχιστότητα γνευσίων?, γνευσιότητα?) για όλες τις αδρόκοκκες δευτερογενείς φυλλώσεις στους γνευσίους. Η χρήση του όρου αυτού δεν συνιστάται γιατί υπάρχει κίνδυνος σύγχυσης με το *compositional layering* (γνευσιακή στρωμάτωση?, στρωμάτωση λόγω διαφοράς στη σύσταση?) των γνευσίων.

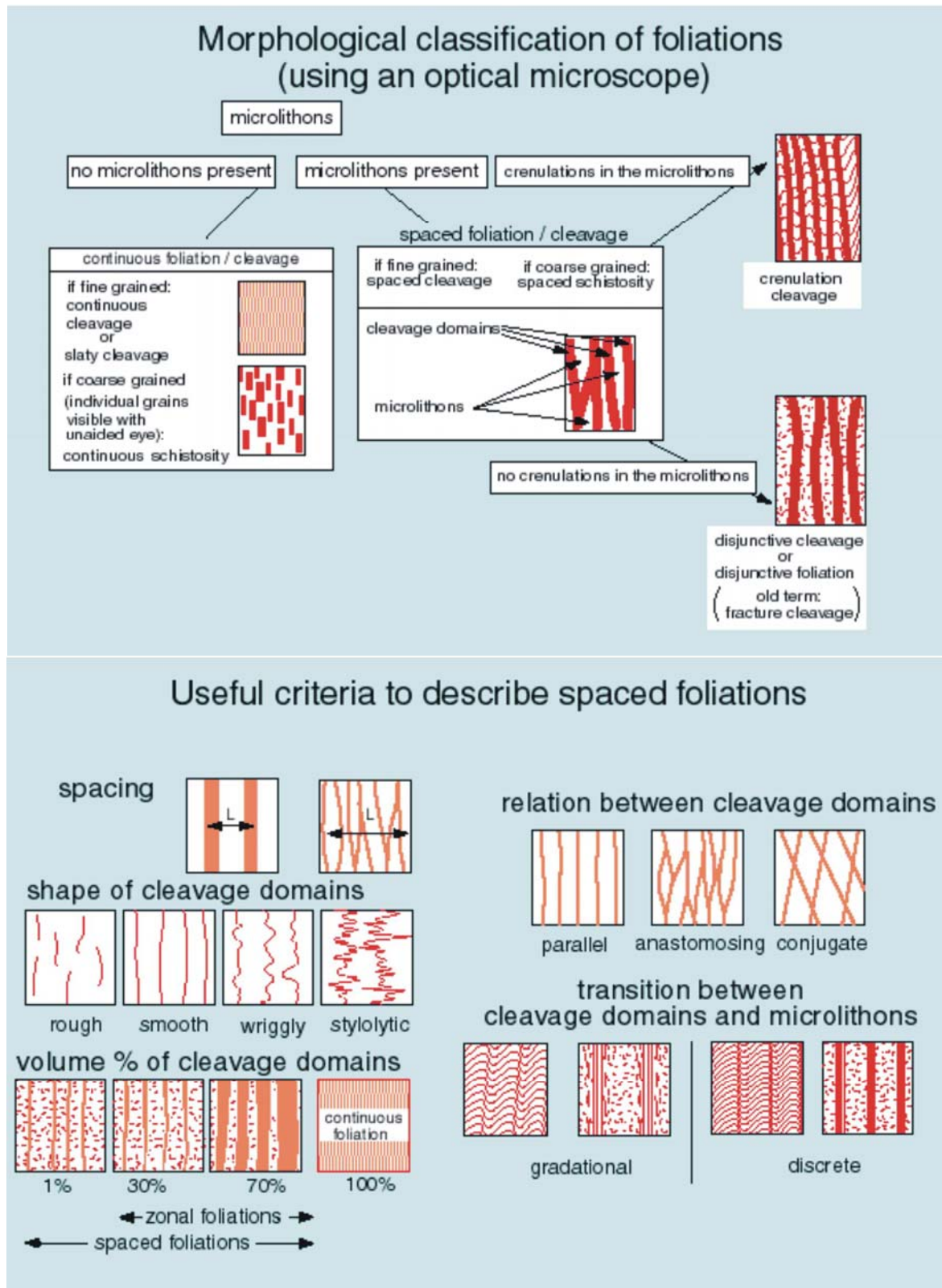
4.2.5 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΦΥΛΛΩΣΕΩΝ

4.2.5.1 Γενικά

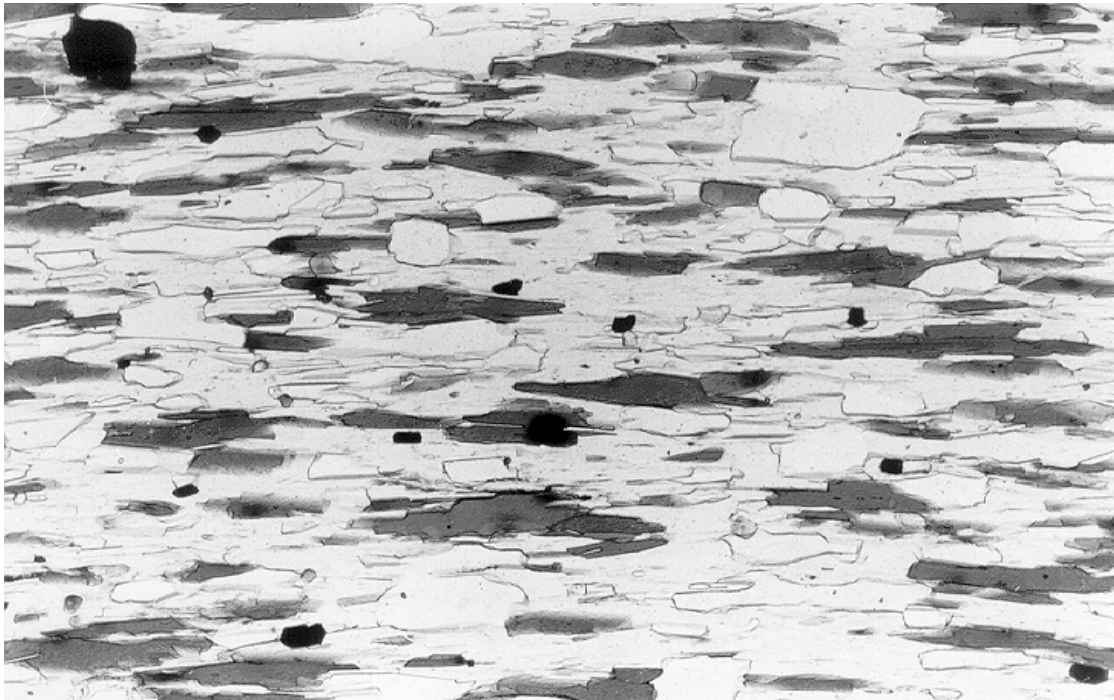
Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται η πλέον αποδεκτή στη βιβλιογραφία ταξινόμηση για τις φυλλώσεις (Εικ. 4.6), που βασίζεται κατά κύριο λόγο στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των επιφανειών, όπως αυτά είναι ορατά στην εξέταση στο μικροσκόπιο και σπανιότερα με γυμνό οφθαλμό, και έχει δοθεί από τους Powell (1979) και Borradaile et al (1982). Η ταξινόμηση αυτή βασίζεται στα στοιχεία του τεκτονικού ιστού (fabric elements) που καθορίζουν μια φύλλωση (βλπ. στα προηγούμενα), καθώς και στην κατανομή των στοιχείων αυτών στο χώρο που καθορίζει αν η φύλλωση θα είναι *συνεχής (continuous)* ή *κατά διαστήματα (spaced)*. Στη δεύτερη περίπτωση τα στοιχεία του τεκτονικού ιστού δεν είναι ομοιογενώς κατανομημένα και ως εκ τούτου το πέτρωμα διαχωρίζεται σε φακούς ή στρώματα με διαφορετική σύσταση. Αντίθετα στην πρώτη περίπτωση τα στοιχεία του τεκτονικού ιστού είναι ομοιογενώς κατανομημένα, μέχρι την κλίμακα σε επίπεδο ορυκτού.

4.2.5.2 Συνεχής φύλλωση (continuous foliation)

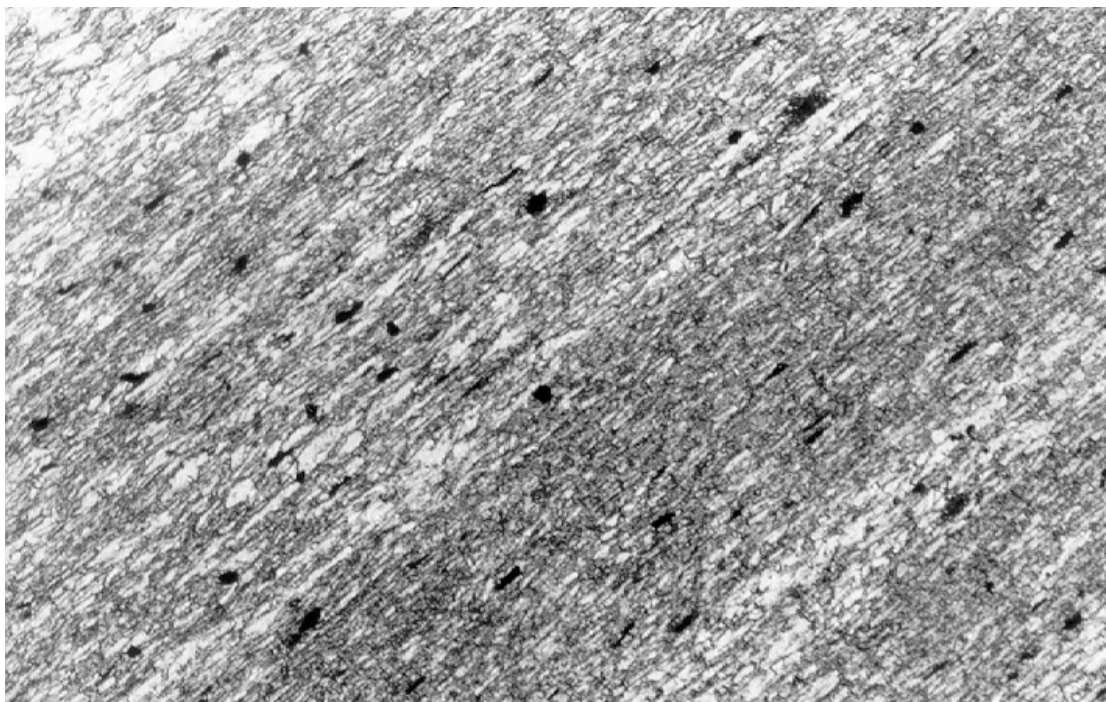
Η συνεχής φύλλωση καθορίζεται από μια ομοιογενή κατανομή (χωρίς στρωμάτωση) και ένα προτιμητέο προσανατολισμό φυλλωδών κυρίως αλλά και άλλων ορυκτών. Τα πιο συνήθη ορυκτά είναι οι μαρμαρυγίες και οι αμφίβολοι, αλλά και ο χαλαζίας, ο ασβεστίτης ή άλλα ορυκτά μπορούν επίσης να καθορίσουν μια συνεχή φύλλωση. Πολύ λεπτόκοκκα πετρώματα, όπως οι φυλλίτες, που δείχνουν ένα συνεχή σχισμό (continuous cleavage) στην εξέταση σε κλίμακα λεπτής τομής, μπορεί σε μεγαλύτερες μεγεθύνσεις (π.χ. με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο – SEM) να αποκαλύψουν μια φύλλωση κατά διαστήματα (spaced foliation). Κανονικά η ταξινόμηση που αναφέρθηκε στα προηγούμενα βασίζεται στην



Εικ. 4.6. Μορφολογική ταξινόμηση των φυλλώσεων.



Εικ. 4.7. Συνεχής σχιστότητα (*continuous schistosity*) που καθορίζεται από την παράλληλη διάταξη των ορυκτών (μοσχοβίτης, βιοτίτης και χαλαζίας).



Εικ. 4.8. Συνεχής σχισμός (*continuous cleavage ή slaty cleavage*) που καθορίζεται από την παράλληλη διάταξη των πολύ λεπτόκοκκων μαρμαρυγιών.

εξέταση σε επίπεδο λεπτής τομής. Καλό είναι λοιπόν για οποιαδήποτε περιγραφή να αναφέρεται και η κλίμακα παρατήρησης και οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται, αν φυσικά υπάρχουν τα απαραίτητα στοιχεία.

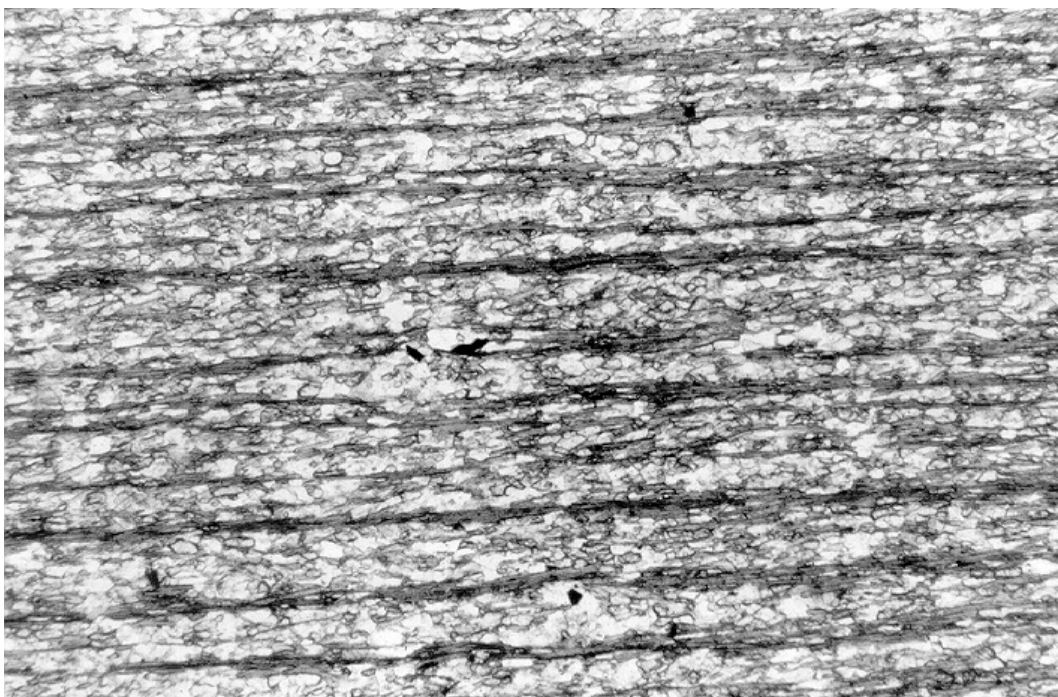
Οι συνεχείς φυλλώσεις μπορούν να περιγραφούν περαιτέρω με βάση το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων. Στην περίπτωση που τα ορυκτά είναι ορατά με γυμνό οφθαλμό μιλάμε για *συνεχή σχιστότητα* (*continuous schistosity*), ενώ αν τα ορυκτά είναι πιο λεπτόκοκκα μιλάμε *συνεχή σχισμό* (*continuous cleavage*) ή *slaty cleavage*. Δεδομένου ότι το κατά πόσο θα είναι συνεχής μια φύλλωση εξαρτάται άμεσα από την κλίμακα παρατήρησης, στη βιβλιογραφία έχει γίνει αποδεκτό το όριο των 50μm (για την απόσταση ανάμεσα στις επιφάνειες της φύλλωσης) πάνω από το οποίο μια φύλλωση θεωρείται "κατά διαστήματα" και όχι "συνεχής". Οι συνεχείς φυλλώσεις μπορούν επίσης να υποδιαιρεθούν σε *ορυκτολογικές φυλλώσεις* (*mineral foliations*), που καθορίζονται από τον προτιμητέο προσανατολισμό φυλλωδών, αλλά απαραμόρφωτων ορυκτών, όπως οι μαρμαρυγίες ή οι αμφίβολοι, και σε φυλλώσεις που δημιουργούν έναν *επιπεδόμορφο ιστό* (*planar shape fabric*) που καθορίζεται από πεπλατυσμένους κρυστάλλους ορυκτών όπως ο χαλαζίας, ο ασβεστίτης κλπ. Συμβαίνει δηλαδή και εδώ το ίδιο όπως ακριβώς και στη διάκριση ανάμεσα στην *ορυκτολογική γραμμωση* (*mineral lineation*) και την *γραμμωση έκτασης* (*stretching lineation*) που είναι επίσης γνωστή και ως *γραμμικός ιστός* (*linear shape fabric*).

4.2.5.3 Φύλλωση κατά διαστήματα (*spaced foliation*)

Στα πετρώματα που χαρακτηρίζονται από φύλλωση κατά διαστήματα διακρίνονται δύο πεδία (*domain*) που συνθέτουν τον τεκτονικό ιστό. Το ένα από αυτά είναι γνωστό ως *πεδίο σχισμού* (*cleavage domain*) ή ως *ελάσματα σχισμού* (*cleavage lamellae*) και το άλλο είναι γνωστό με τον όρο *μικρολιθώνας* (*microlithon*). Εναλλακτικά για τους μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους και τους φυλλίτες έχουν χρησιμοποιηθεί και οι όροι *M domain* (το πεδίο του σχισμού που συνήθως είναι πλούσιο σε μαρμαρυγίες) και *Q domain* (το πεδίο του μικρολιθώνα που συνήθως είναι πλούσιο σε χαλαζία).

Τα πεδία του σχισμού είναι σχετικά επίπεδες δομές και περιέχουν στοιχεία του τεκτονικού ιστού που είναι παράλληλα με αυτές. Στους μεταπηλίτες τα πεδία του σχισμού είναι συνήθως πλούσια σε μαρμαρυγίες και ορυκτά όπως ο ιλμενίτης, ο γραφίτης, το ρουτίλιο, ο απατίτης και το ζirkόνιο. Σημειώνεται ότι τα πεδία του σχισμού αποτελούν διαμπερείς δομές στο γεωλογικό σώμα – τεκτονίτη, μέσα από τις οποίες λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της τεκτονικής ροής.

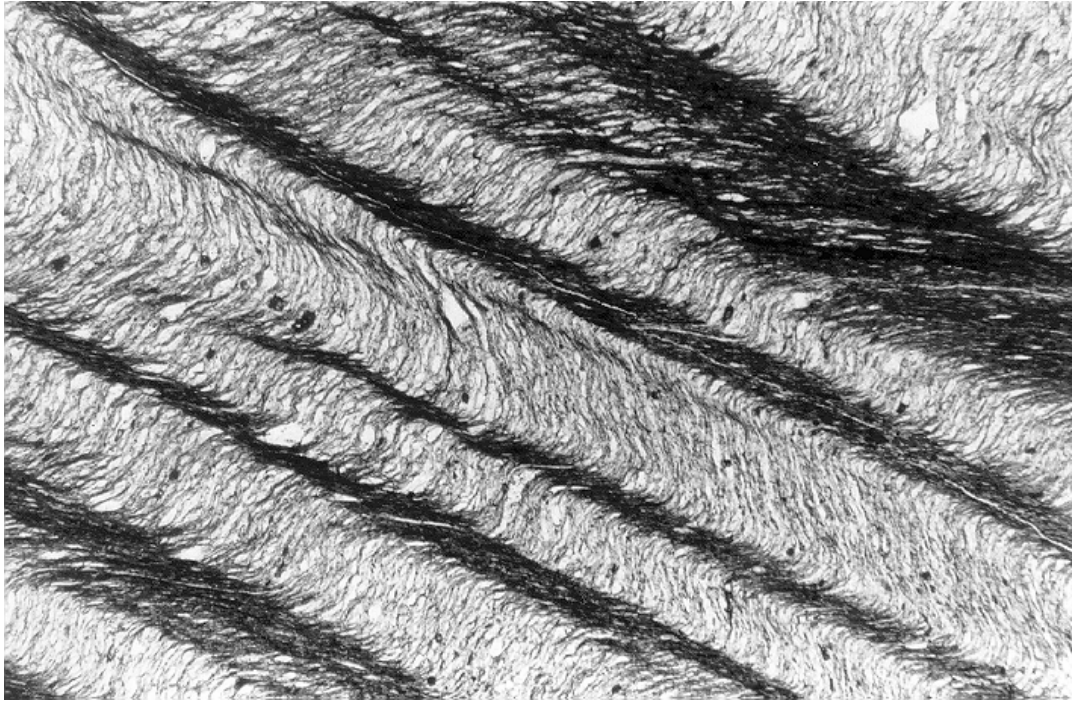
Οι μικρολιθώνες βρίσκονται ανάμεσα στα πεδία του σχισμού και περιλαμβάνουν στοιχεία του τεκτονικού ιστού που παρουσιάζουν έναν ασθενή ή καθόλου προτιμητέο προσανατολισμό, η περιλαμβάνουν στοιχεία του τεκτονικού ιστού που έχουν σαφή γωνιακή σχέση με τα πεδία του σχισμού. Οι φυλλώσεις κατά διαστήματα μπορούν να υποδιαιρεθούν περαιτέρω με βάση τη δομή των μικρολιθώνων. Αν αυτοί περιέχουν μικροπτυχωμένη μια παλαιότερη φύλλωση χρησιμοποιείται ο όρος *πτυχοσχισμός* (*crenulation cleavage*). Αν όχι χρησιμοποιείται ο όρος *διαζευκτική? φύλλωση* (*disjunctive foliation*) ή *διαζευκτικός? σχισμός* (*disjunctive cleavage*) αν τα ορυκτά είναι λεπτόκοκκα. Ο τελευταίος αυτός όρος είναι συνώνυμος με τον παλαιότερο όρο *fracture cleavage*. Συχνά στην βιβλιογραφία απαντάται και ο όρος *strain-slip cleavage*, ο οποίος ερμηνεύει ότι η κίνηση (ροή) κατά μήκος των επιφανειών που οριοθετούν τον μικρολιθώνα γίνεται μέσα από διάτμηση και σχεδόν ταυτίζεται με αυτό που σήμερα ονομάζουμε S-C μυλονίτες (βλπ. στα επόμενα).



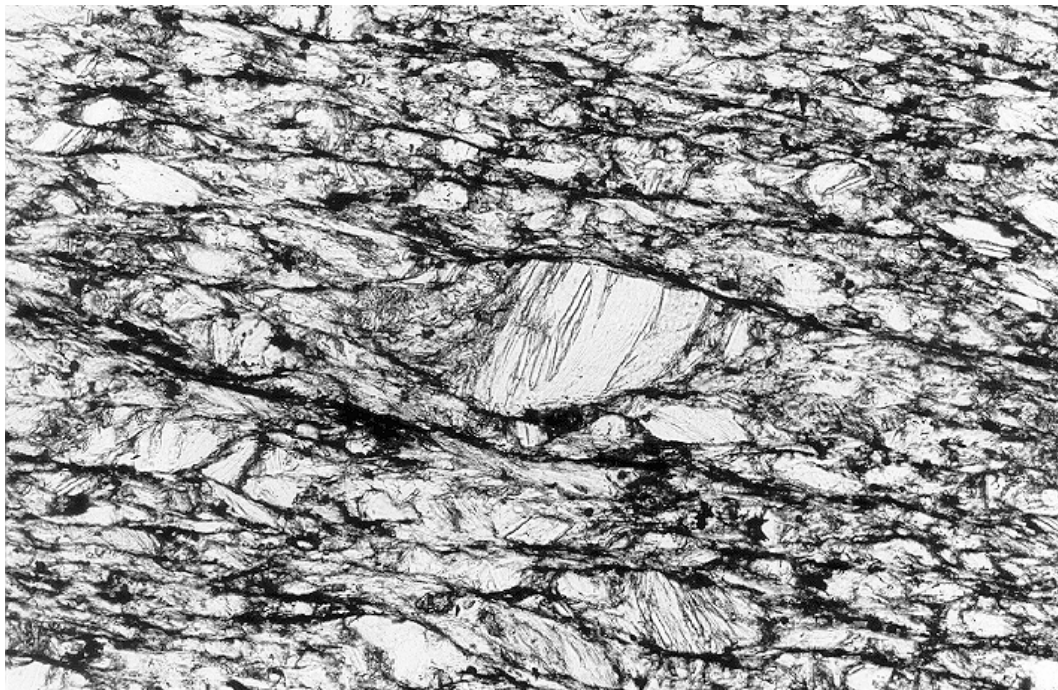
Εικ. 4.9. Διαζευκτικός? σχισμός (*disjunctive cleavage*) σε ένα χαλαζιακό, μαρμαρυγιακό φυλλίτη, που καθορίζεται από "στρωματίδια" πλούσια σε βιοτίτη.



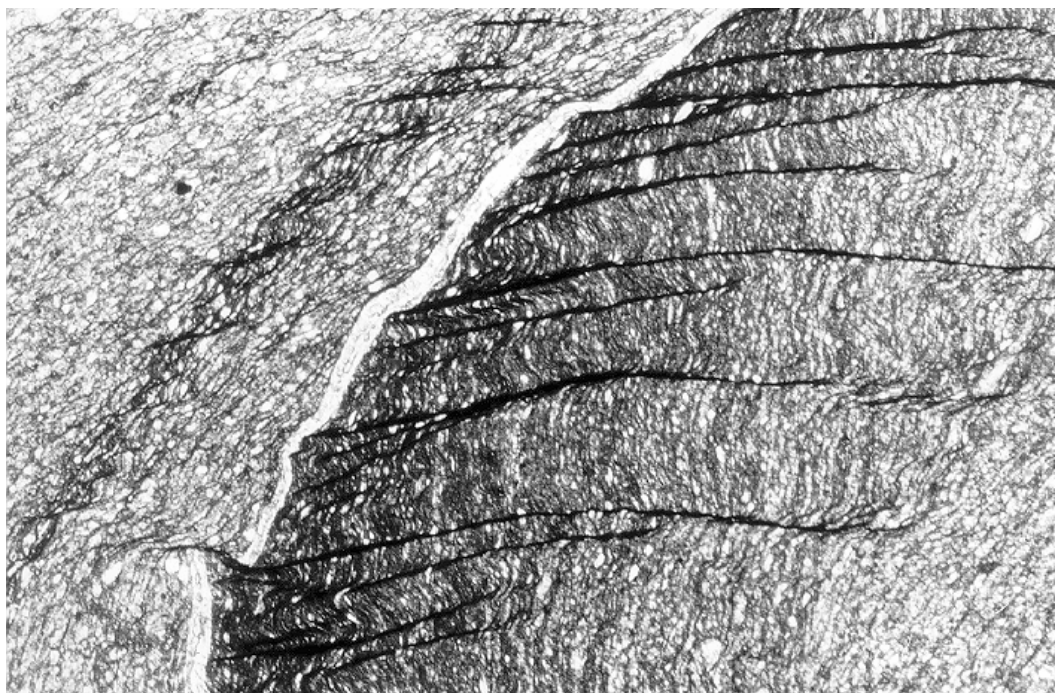
Εικ. 4.10. Πτυχοσχισμός (*crenulation cleavage*) σε φυλλίτη. Διακρίνονται τα πεδία του σχισμού (*cleavage domains*) και οι μικρολιθόνες (*microlithons*) που είναι πτυχωμένοι. Σημειώνεται η διαφορά στη σύσταση των δύο πεδίων και η προοδευτική μετάβαση από το ένα στον άλλο.



Εικ. 4.11. Ζωνώδης πτυχοσχισμός (zonal crenulation cleavage). Σημειώνεται η προοδευτική μετάβαση ανάμεσα στα πεδία του σχισμού και τους μικρολιθώνες.



Εικ. 4.12. Domainal spaced cleavage.



Εικ. 4.13. Διακεκριμένος πτυχοσχισμός (*discrete crenulation cleavage*) S_2 που επικαλύπτει ένα παλαιότερο μικροπτυχωμένο *slaty cleavage* S_1 . Η λευκή ταινία ανάμεσα στο σκοτεινόχρωμο και πιο ανοικτό τμήμα της τομής αντιπροσωπεύει τη στρώση S_0 .

Οι πιο γενικοί όροι *σχισμός κατά διαστήματα* (*spaced cleavage*) και *σχιστότητα κατά διαστήματα* (*spaced schistosity*) χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν λεπτόκοκκες ή αδρόκοκκες, αντίστοιχα, φυλλώσεις κατά διαστήματα. Ορισμένες φυλλώσεις κατά διαστήματα χαρακτηρίζονται από φακοειδείς μικρολιθώνες και ονομάζονται *domainal spaced foliation* ή *domainal spaced cleavage* αν η απόσταση ανάμεσα στις επιφάνειες της φύλλωσης είναι αρκετά στενή (ο όρος στα ελληνικά αποδίδεται δύσκολα, πιθανά ως *φακοειδής? φύλλωση* ή *σχισμός κατά διαστήματα*).

Άλλα μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυλλώσεων κατά διαστήματα που μπορούν να διευκολύνουν και να συμπληρώσουν την περιγραφή τους είναι (Εικ. 4.6):

- Η απόσταση ανάμεσα στα πεδία του σχισμού.
- Το σχήμα των πεδίων του σχισμού. Διακρίνονται φυλλώσεις *αδρές*, όχι καλά εκπεφρασμένες (*rough*), *ομαλές*, *ακύμαντες* (*smooth*), *συστραμμένες*, *οφιοειδείς?* (*wriggly*) και *στυλολιθικές* (*stylolitic*).
- Το % ποσοστό των πεδίων του σχισμού στο συνολικό όγκο του πετρώματος. Αν αυτό είναι > από 30% χρησιμοποιείται ο όρος *ζωνώδης φύλλωση* (*zonal foliation*). Στο 100% φυσικά η φύλλωση γίνεται συνεχής.
- Η γεωμετρική σχέση ανάμεσα στα πεδία του σχισμού. Διακρίνονται φυλλώσεις *παράλληλες* (*parallel*), *αναστομούμενες* (*anastomosing*) και *συζυγείς* (*conjugate*).
- Η μετάβαση ανάμεσα στα πεδία του σχισμού και τους μικρολιθώνες, που μπορεί να είναι *προοδευτική* (*gradational*) ή *καλά διακριτή*, *διακεκριμένη* (*discrete*).
- Η γεωμετρία των μικροπτυχών στον πτυχοσχισμό. Μπορεί να είναι *συμμετρικές*, *κλειστές*, *ανοικτές* κλπ.

Επισημαίνεται ότι τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του πτυχοσχισμού παρουσιάζουν πολλές διακυμάνσεις. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την τελική μορφή του πτυχοσχισμού, εκτός από τη λιθολογία, αποτελούν η θερμοκρασία και η ένταση της παραμόρφωσης (Εικ. 4.16).

Ένας ειδικός τύπος φύλλωσης κατά διαστήματα είναι και το *compositional layering*, δηλαδή η *στρωμάτωση λόγω διαφοράς στη σύσταση (μεταμορφική? στρωμάτωση)*. Ο όρος χρησιμοποιείται όταν οι μικρολιθώνες και τα πεδία του σχισμού έχουν ικανό πλάτος και είναι συνεχόμενα, ώστε να δικαιολογείται ο όρος στρωμάτωση. Κανονικά ο όρος χρησιμοποιείται όταν η στρωμάτωση αυτή είναι καλά ορατή με γυμνό οφθαλμό σε ένα δείγμα στο χέρι.

Η ταξινόμηση που παρουσιάστηκε δεν μπορεί σε γενικές γραμμές να καλύψει όλες τις περιπτώσεις, δεδομένου ότι στη φύση υπάρχουν πολλές ακόμα μορφές αλλά και μεταβατικοί τύποι. Πολλές φορές μια καλή φωτογραφία ή ένα καλό σκίτσο μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως μια "μονολεκτική" ταξινόμηση.

Μια φύλλωση μπορεί να αλλάξει ριζικά τη μορφή της ή και να εξαφανισθεί εντελώς σε κλίμακα λεπτής τομής. Αυτό συνήθως συνδέεται με τη μετάβαση από μια λιθολογία σε μία άλλη, αφού η ανάπτυξη μιας φύλλωσης εξαρτάται άμεσα από τη λιθολογία. Σημειώνεται ότι η τοπική κατανομή της καταπόνησης γύρω από τα κορυφαία των πτυχών έχει επίσης σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη της φύλλωσης και μπορεί να προκαλέσει σημαντικές διαφοροποιήσεις στη μορφολογία της φύλλωσης κατά μήκος ενός μόνο στρώματος.

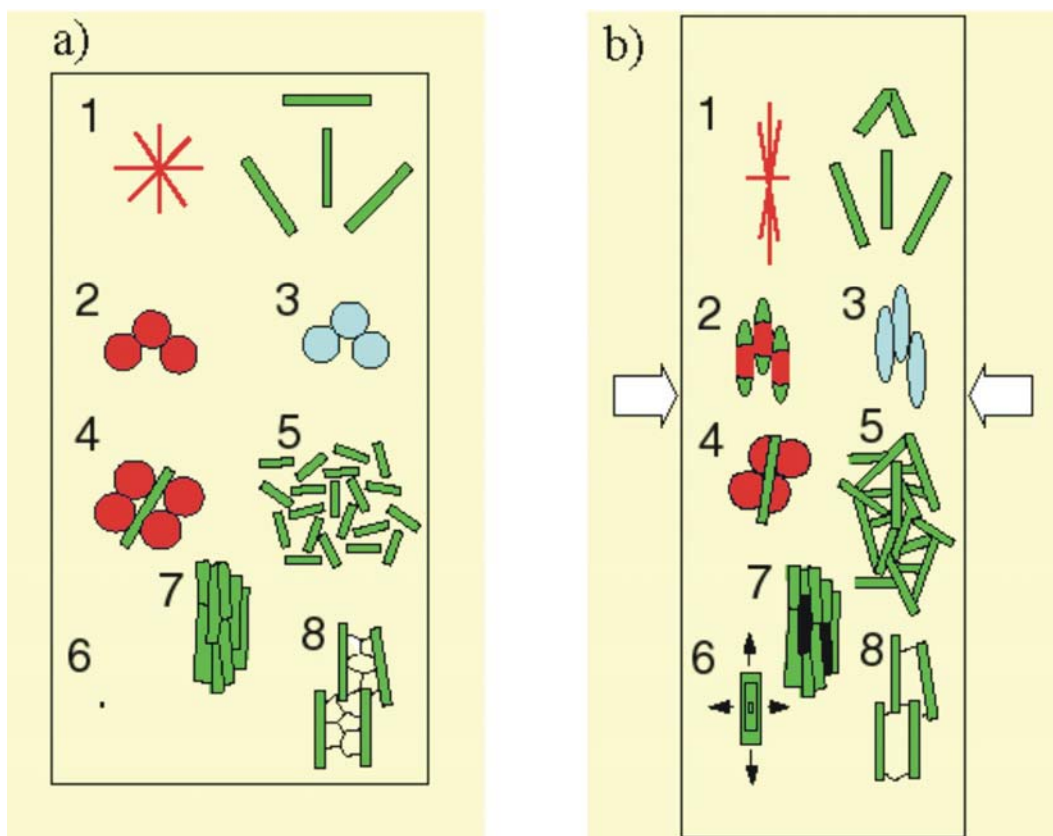
4.2.6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΦΥΛΛΩΣΕΩΝ

Οι δευτερογενείς φυλλώσεις αναπτύσσονται σαν απάντηση στην παραμένουσα παραμόρφωση των πετρωμάτων. Οι κύριοι παράγοντες που ελέγχουν την ανάπτυξή τους είναι:

- 1) Η σύσταση του πετρώματος.
- 2) Ο προσανατολισμός και το μέγεθος των τάσεων.
- 3) Οι συνθήκες μεταμόρφωσης που περιλαμβάνουν θερμοκρασία, λιθοστατική πίεση και πίεση και σύσταση των ρευστών των πόρων.

Η συσχέτιση ανάμεσα στις γενετικές διαδικασίες και τη μορφολογία των φυλλώσεων είναι συνήθως πολύπλοκη και ως εκ τούτου εξετάζονται χωριστά. Η γνώση που έχει αποκτηθεί για τους μηχανισμούς ανάπτυξης φυλλώσεων είναι ακόμα ανεπαρκής, αν και τα τελευταία 30 χρόνια έχουν γίνει πολύ σημαντικές προόδους στον τομέα αυτό.

Στα επόμενα δίνονται εν συντομία οι μηχανισμοί εκείνοι που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία μιας δευτερογενούς φύλλωσης (Εικ. 4.14 & 4.15). Άλλοι είναι σημαντικότεροι και άλλοι όχι και σε πολλές περιπτώσεις λειτουργούν ταυτόχρονα. Στην Εικ. 4.14 παρουσιάζονται σχηματικά οι κυριότεροι μηχανισμοί και πιο συγκεκριμένα στο τμήμα α του σχήματος παρουσιάζονται τα στοιχεία του τεκτονικού ιστού πριν ή κατά την έναρξη της παραμόρφωσης και στο τμήμα β μετά από αυτή. Οι μηχανισμοί αυτοί λοιπόν είναι οι ακόλουθοι:



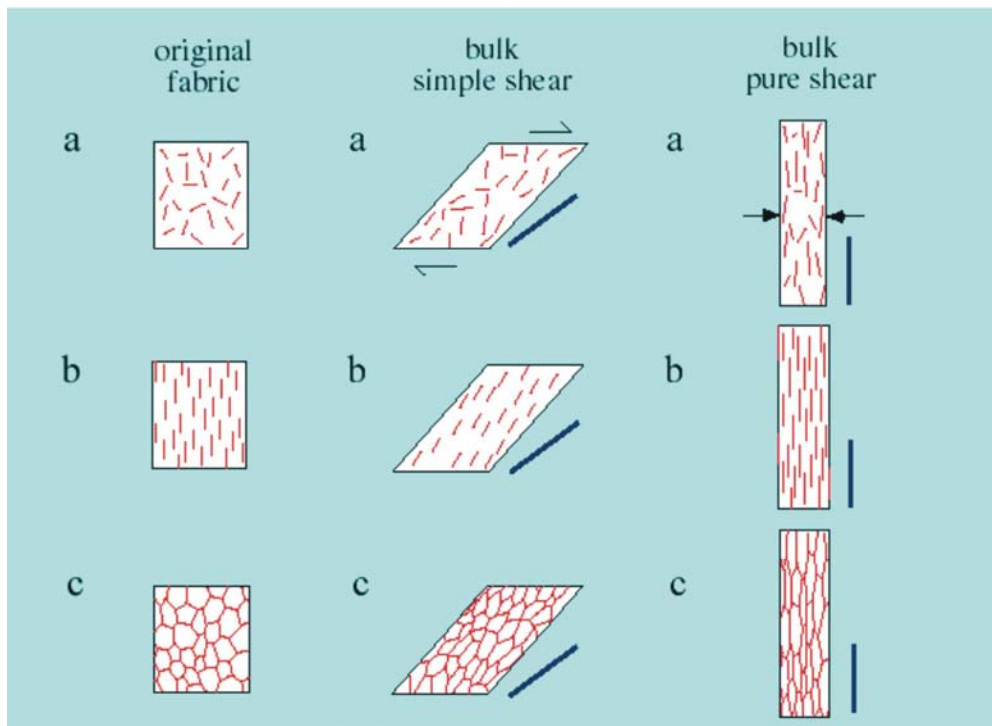
Εικ. 4.14. Οι σημαντικότεροι μηχανισμοί ανάπτυξης δευτερογενών φυλλώσεων.

1. Περιστροφή (rotation) επιμήκων κρυστάλλων λόγω της παραμόρφωσης (όταν αυτοί φυσικά δεν είναι παράλληλοι με τη διεύθυνση της τάσης οπότε πτυχώνονται).
2. Αλλαγή στο σχήμα των ορυκτών με μετακίνηση διαλυμάτων λόγω επιβολής τάσεων (stress induced solution transfer). Στην εικόνα η γκρί περιοχή αντιπροσωπεύει το πρωτογενές ορυκτό και η άσπρη το καινούργιο.
3. Αλλαγή στο σχήμα των ορυκτών που υφίστανται κρυσταλλοπλαστική παραμόρφωση (crystalplastic deformation) με αλλαγές σε επίπεδο πλέγματος (dislocation creep ή solid state volume diffusion).
4. Πολυκρυσταλλικές συγκεντρώσεις ορυκτών αναπτύσσονται φυλλώσεις με τους μηχανισμούς 1+2 όταν επιβοηθούνται από μετακίνηση διαλυμάτων λόγω επιβολής τάσεων (stress induced solution transfer).
5. Ανάπτυξη μαρμαρυγιών παράλληλα στην (001), κατά τη διάρκεια ή μετά τη βράχυνση (shortening), οδηγεί σε μια αύξηση της έκφρασης της φύλλωσης γιατί οι αρχικοί κρύσταλλοι που είναι προσανατολισμένοι παράλληλα με τη φύλλωση αναπτύσσονται πολύ κατά μήκος σε σχέση με αυτούς που έχουν πλάγια θέση.
6. Δημιουργία και ανάπτυξη νέων ορυκτών, προσανατολισμένων ανάλογα με το εντατικό πεδίο.
7. Μιμητική ανάπτυξη "επιμήκων" κρυστάλλων λόγω του περιορισμού της ανάπτυξης παράλληλα στην υπάρχουσα φύλλωση.

8. Περιορισμένη ανάπτυξη νέων ορυκτών ανάμεσα σε δύο φυλλώδη και όμοια προσανατολισμένα ορυκτά.

Στο επόμενο σχήμα της Εικ. 4.14 παρουσιάζεται ο μηχανισμός ανάπτυξης ορισμένων φυλλώσεων σε καθεστώς προοδευτικής παραμόρφωσης σε απλή διάτμηση (progressive simple shear) και σε καθαρή διάτμηση (progressive pure shear), για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις αρχικού ιστού:

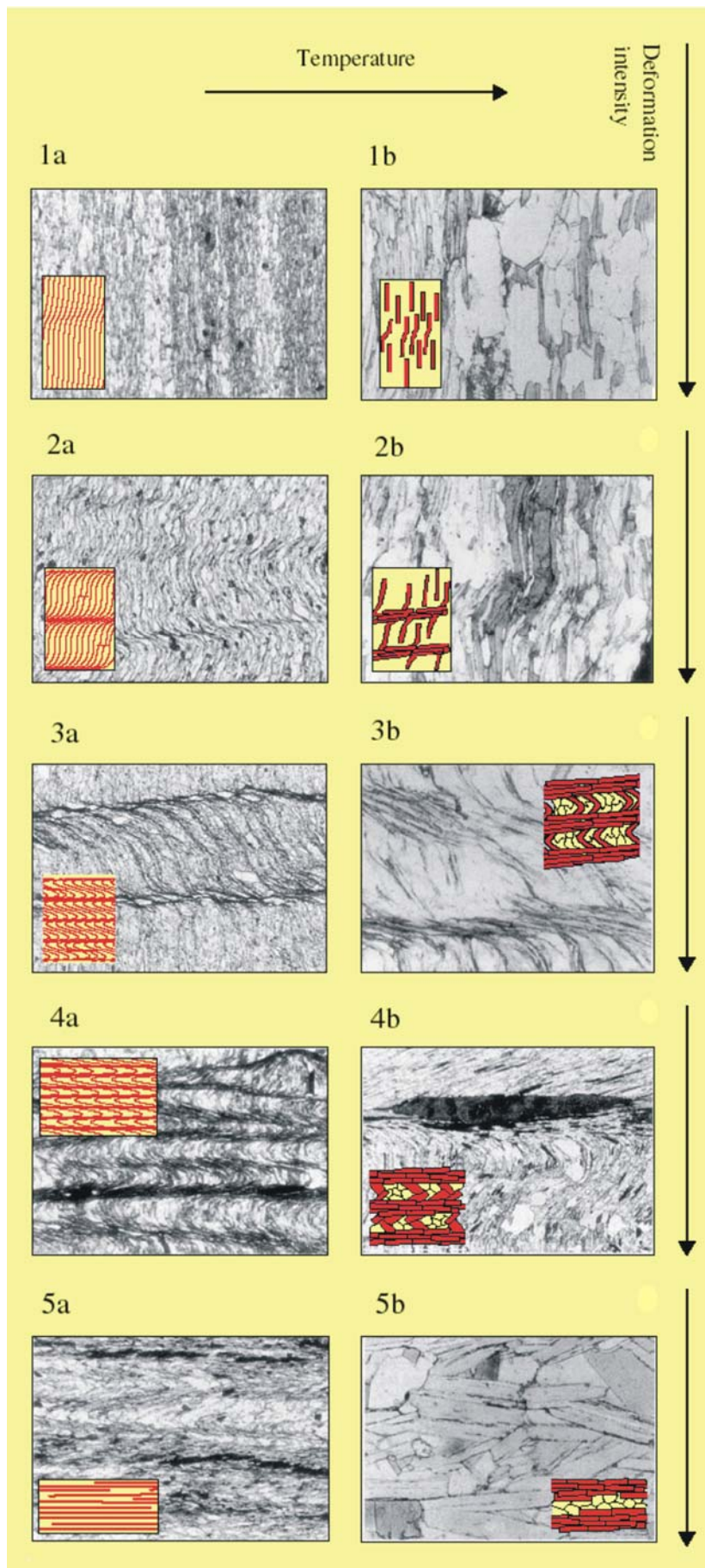
- όταν ο αρχικός ιστός χαρακτηρίζεται από επιμήκη ή φυλλώδη ορυκτά με τυχαίο προσανατολισμό,
- όταν ο αρχικός ιστός χαρακτηρίζεται από επιμήκη ή φυλλώδη ορυκτά με προσανατολισμό και
- όταν ο αρχικός ιστός χαρακτηρίζεται από κοκκώδη ορυκτά.



Εικ. 4.15. Ανάπτυξη φυλλώσεων σε καθεστώς προοδευτικής απλής και καθαρής διάτμησης (progressive simple & pure shear).

Στην Εικ. 4.16 της επόμενης σελίδας, παρουσιάζεται μια ακολουθία προοδευτικής ανάπτυξης crenulation cleavage κατά την αύξηση της θερμοκρασίας (οριζόντιος άξονας) και της παραμόρφωσης (κατακόρυφος άξονας). Η ακολουθία αυτή είναι ένα τυπικό παράδειγμα που μπορεί κατ' αντιστοιχία να χρησιμοποιηθεί για την προοδευτική ανάπτυξη όλων των spaced foliations.

Σε χαμηλές θερμοκρασίες (Εικ. 4.16a, μέχρι την κάτω πρασινοσχιστολιθική φάση) οι κύριοι μηχανισμοί ανάπτυξης πτυχοσχισμού είναι η μετακίνηση διαλυμάτων (solution transfer) και η περιστροφή (rotation). Σε υψηλότερες θερμοκρασίες οι μηχανισμοί που κυριαρχούν είναι η ανακρυστάλλωση και η ανάπτυξη των κόκκων (συμπεριλαμβάνεται και η ανάπτυξη νέων ορυκτών).



Εικ. 4.16. Τυπική ακολουθία ανάπτυξης *crenulation cleavage* με την αύξηση της θερμοκρασίας και της έντασης της παραμόρφωσης.

Στο στάδιο 1 απαλές μικροπτυχώσεις παραμορφώνουν την αρχική φύλλωση S_1 , χωρίς όμως να αναπτύσσεται νέα φύλλωση S_2 . Τοπικής κλίμακας ανακρυστάλλωση μπορεί να παρατηρείται στα κορυφαία των B_2 πτυχών. Στο στάδιο 2 η μικροπτυχώση είναι λίγο πιο έντονη και ένας διακεκριμένος S_2 πτυχοσχισμός (discrete crenulation cleavage) είναι πλέον ορατός. Η S_1 παραμένει ακόμα η κυρίαρχη δομή. Στο στάδιο 3 οι νέες επιφάνειες του σχισμού αναπτύσσονται ακόμα περισσότερο, έτσι ώστε να έχουν ισοδύναμη παρουσία με τις S_1 στο πέτρωμα. Ανακρυσταλλωμένες μικροπτυχές, γνωστές και σαν *πολυγωνικά τόξα* (*polygonal arcs*), απαντώνται στις περιπτώσεις που η θερμοκρασία είναι αυξημένη (b3). Στο στάδιο 4 η S_2 κυριαρχεί και η S_1 είναι πλέον αναγνωρίσιμη μόνο σε μερικά υπολειμματικά κορυφαία μικροπτυχών. Στην περίπτωση b4 νέοι κόκκοι αναπτύσσονται κατά μήκος της S_2 , κάνοντάς τη να κυριαρχεί ακόμα περισσότερο. Τέλος στο στάδιο 5 έχει συμβεί η ολοκληρωτική αντιμετάθεση της S_1 , η οποία δεν είναι πλέον αναγνωρίσιμη. Τα περισσότερα πετρώματα ακολουθούν στη φύση μια πορεία από το στάδιο a1 προς το στάδιο b5 (διαγώνια δηλαδή στο σχήμα της Εικ. 4.16).

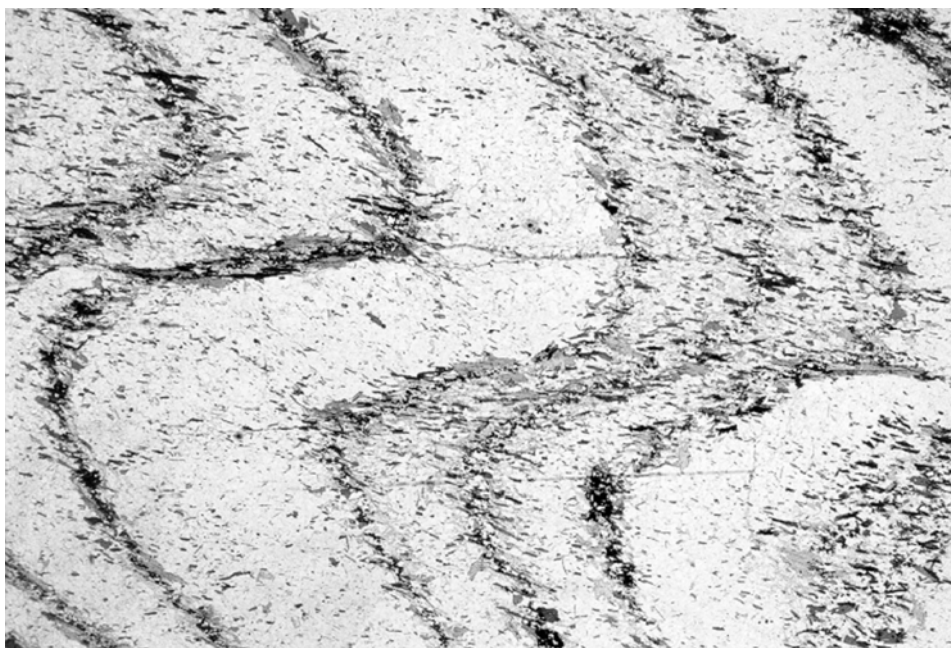
Άλλοι παράγοντες που επιδρούν στην ανάπτυξη του πτυχοσχισμού είναι η παρουσία μιας ρευστής φάσης, η παρουσία ευδιάλυτων ορυκτών και η ανάπτυξη νέων ορυκτών. Στην περίπτωση α (χαμηλές θερμοκρασίες), η ολοκλήρωση της αντιμετάθεσης της S_1 , ώστε να πάρει τη θέση της η S_2 (στάδιο a4 → a5), είναι δύσκολο να γίνει χωρίς ανακρυστάλλωση και ανάπτυξη νέων ορυκτών. Αυτός είναι και ο λόγος που οι παλαιότερες φυλλώσεις είναι πιο καλά αναγνωρίσιμες στα χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης πετρώματα.

Η φύλλωση στους μυλονίτες (βλπ. στα επόμενα) συνήθως αναφέρεται με το όνομα *μυλονιτική φύλλωση* (*mylonitic foliation*) και αντιπροσωπεύει μια φύλλωση κατά διαστήματα, που συνίσταται από εναλλαγές στρωμάτων και φακών με διαφορετική ορυκτολογική σύσταση ή μέγεθος των κόκκων, εντός των οποίων είναι ενσωματωμένοι, περισσότερο ή λιγότερο παραμορφωμένοι, πορφυροκλάστες, που περιβάλλονται από τη μυλονιτική φύλλωση. Ορισμένοι φακοί είναι μονοκρυσταλλικοί και παρουσιάζουν ένα ασυνήθιστα επιπεδόμορφο ή γραμμικό σχήμα, δημιουργώντας μια φύλλωση στο πέτρωμα. Αυτοί οι φακοί είναι γνωστοί με το όνομα *μονοκρυσταλλικές ταινίες* (*monocrystalline ribbons*), με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τις *χαλαζιακές ταινίες* (*quartz ribbons*). Στους μικρού – μέσου βαθμού μυλονίτες οι χαλαζιακές ταινίες είναι έντονα επιμηκυμένες και παρουσιάζουν έντονη κυματοειδή κατάσβεση και ελάσματα παραμόρφωσης, δομές υποκόκκων (*subgrain structures*) και δυναμική ανακρυστάλλωση. Στους υψηλού βαθμού γενεσίους οι χαλαζιακές ταινίες είναι μονοκρυσταλλικές και χαρακτηρίζονται από την απουσία δομών ενδοκρυσταλλικής παραμόρφωσης. Συνήθως είναι γνωστές με το όνομα *platy quartz*. Μηχανισμοί ανάκτησης (*recovery*), μετανάστευσης των ορίων των κόκκων (*grain boundary migration*) και στατικής ανακρυστάλλωσης (*static recrystallisation*) φαίνεται ότι υπεισέρχονται στη δημιουργία τους.

4.2.7 Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΦΥΛΛΩΣΕΩΝ

Συνήθως οι δευτερογενείς φυλλώσεις αναφέρονται στη βιβλιογραφία σαν *φυλλώσεις κατά αξονικό επίπεδο* (*axial planar foliations*), δεδομένου ότι αυτές παρουσιάζουν μια πολύ στενή γεωμετρική σχέση με τα αξονικά επίπεδα των πτυχών, αφού συνήθως αναπτύσσονται παράλληλα με αυτά (Εικ. 4.17). Η διαπίστωση αυτή δείχνει ότι η πτύχωση και η δη-

μιουργία των νέων επιφανειών πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της ίδιας παραμορφωτικής φάσης.



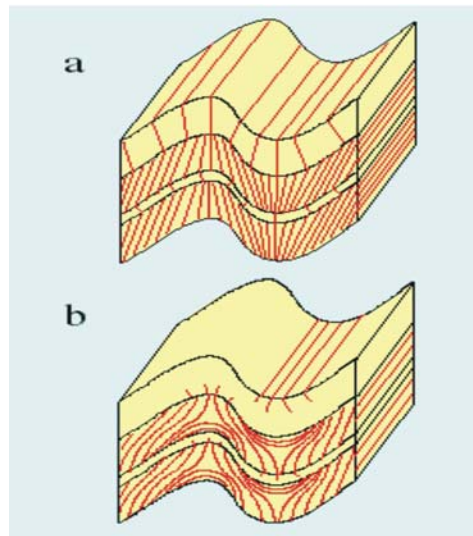
Εικ. 4.17. Δευτερογενής φύλλωση που αναπτύσσεται από τον προτιμητέο προσανατολισμό των μαρμαρυγιών παράλληλα με τα αξονικά επίπεδα των πτυχών.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η παραλληλία αυτή δεν είναι απόλυτη, δεδομένου ότι οι επιφάνειες της φύλλωσης αναπτύσσονται συμμετρικά ως προς το αξονικό επίπεδο, συνήθως αποκλίνοντας και σπανιότερα συγκλίνοντας από τα αξονικά επίπεδα, εν είδη "βεντάλιας", προς το κορυφαίο της πτυχής (Εικ. 4.18). Είναι δηλαδή σχετικά παράλληλα όσο βρίσκονται πιο κοντά στο αξονικό επίπεδο και αποκλίνουν όσο απομακρύνονται από αυτό. Υπάρχουν μάλιστα και περιπτώσεις που η φύλλωση φθάνει να αναπτύσσεται εγκάρσια προς τα αξονικά επίπεδα.

Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως *foliation fanning* (ακτινωτή ανάπτυξη φύλλωσης?). Επίσης συχνό είναι και το φαινόμενο της διάθλασης της φύλλωσης, όταν αυτή τέμνει διαφορετικές λιθολογίες (μαλακό, σκληρό), με αποτέλεσμα τόσο οι επιφάνειες της φύλλωσης να μην είναι επίπεδες αλλά τεθλασμένες ή καμπύλες, όσο και η πυκνότητά τους να διαφοροποιείται από λιθολογία σε λιθολογία (Εικ. 4.18).

Η γράμμωση που προέρχεται από τη διατομή της φύλλωσης με την πτυχωμένη επιφάνεια είναι παράλληλη με τους άξονες των πτυχών, στην περίπτωση που πτύχωση και φύλλωση είναι ταυτόχρονες. Αν η γράμμωση από διατομή έχει γωνιακή σχέση με τον άξονα, η δομή αυτή είναι γνωστή με το όνομα *foliation – transacted folds* (πτυχές διατεμνόμενες με τη φύλλωση?). Οι πτυχές αυτές είτε σχηματίζονται σε μη ομοαξονική παραμόρφωση, είτε έχουν διαφορετική ηλικία από τη φύλλωση.

Επισημαίνεται ότι ρισμένες φυλλώσεις, όπως η διαγενετική φύλλωση και η φύλλωση που αναπτύσσεται στις ζώνες διάτμησης, δεν συσχετίζονται με πτυχές.



Εικ. 4.18. Διάθλαση της φύλλωσης και *foliation fanning*.

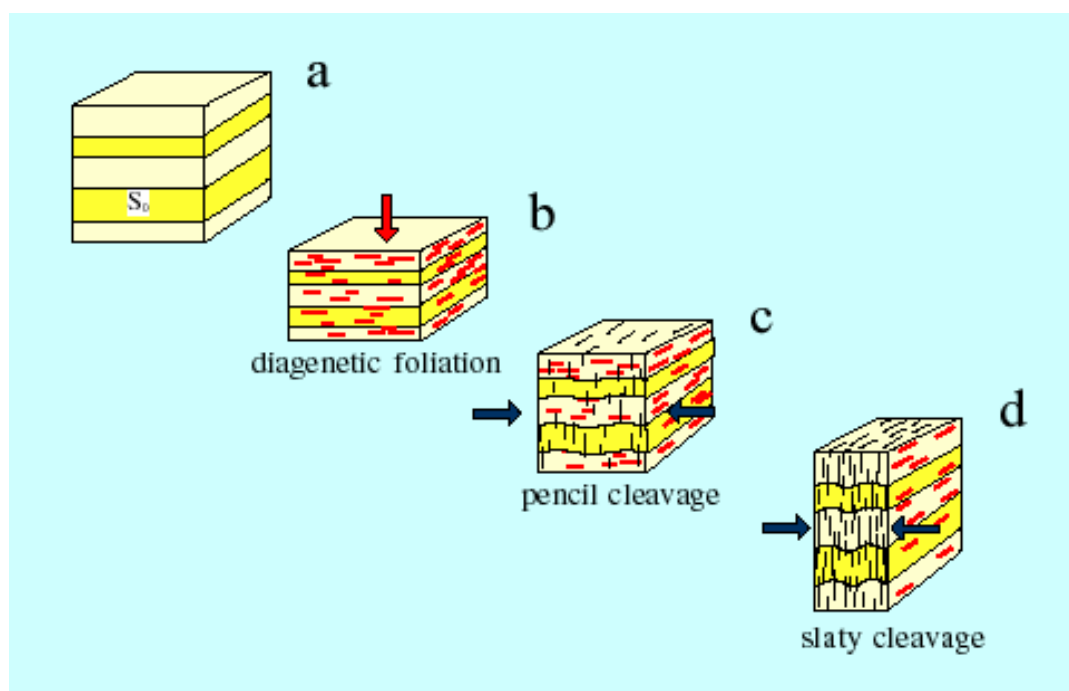
Ανεξάρτητα από τη διαδικασία που προϋποθέτει την ανάπτυξη μιας φύλλωσης, η γεωμετρία μιας αναπτυσσόμενης δομής σε ένα πέτρωμα μπορεί να αλλάξει ριζικά κατά τη διάρκεια της εξέλιξής του. Το πιο απλό παράδειγμα αποτελεί η παραμόρφωση ενός τυχαίου ιστού που οδηγεί στη δημιουργία μιας φύλλωσης ή μιας γράμμωσης, που στην ουσία είναι το αποτέλεσμα της αύξησης της καταπόνησης.

Αν ένας παλαιότερος ιστός υπάρχει σε ένα πέτρωμα, η παραμόρφωσή του μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιογένειες, όπως πτυχές ή *boudinage*, αλλά μπορεί να οδηγήσει και σε ομοιογενή παραμόρφωση σε ορισμένες κλίμακες. Αυτή η ομοιογενής παραμόρφωση φανερώνει δραστικές αλλαγές στη γεωμετρία του ελλειψοειδούς παραμόρφωσης και των δομών που προκύπτουν.

Ένα τυπικό τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η ανάπτυξη *slaty cleavage* σε μεγάλη γωνιακή σχέση με τη διαγενετική φύλλωση και τη στρώση (Εικ. 4.19). Μετά την απόθεση ένα πηλιτικό ίζημα θα υποστεί τη διαγενετική συμπίκνωση, με αποτέλεσμα να μικρύνει σε όγκο, λόγω της απομάκρυνσης ενός μέρους των ρευστών των πόρων. Η διαδικασία αυτή προκαλεί τη δημιουργία της διαγενετικής φύλλωσης που είναι παράλληλη στη στρώση.

Η επακόλουθη επιβολή τεκτονικής καταπόνησης, συνήθως οδηγεί στην δημιουργία μιας νέας φύλλωσης, που βρίσκεται σε γωνιακή σχέση με τη διαγενετική φύλλωση. Σε μικρή τεκτονική καταπόνηση, η διαγενετική και η τεκτονική καταπόνηση μπορεί να προξενούν τον ίδιο βαθμό ανισοτροπίας και να οδηγούν στη δημιουργία ενός γραμμικού ιστού. Όταν τα πετρώματα αυτά αναδυθούν στην επιφάνεια, στη δομή αυτή δίνεται το όνομα *pencil cleavage* (μολυβοειδής σχισμός?).

Αν η τεκτονική καταπόνηση αυξηθεί, στη θέση του γραμμικού ιστού θα αναπτυχθεί μια νέα φύλλωση, στους μικρολιθώνες της οποίας θα απαντώνται υπολείμματα της διαγενετικής φύλλωσης. Αυτή η ακολουθία των ιστών που περιγράφηκε φαίνεται να είναι συνήθης στη δημιουργία ενός αρχικού *slaty cleavage* στα πηλικά πετρώματα.



Εικ. 4.19. Διαδικασία ανάπτυξης *slaty cleavage*.

Γραμμικές δομές αντίστοιχες με το pencil cleavage (μολυβοειδής σχισμός?) μπορούν να αναπτυχθούν από περιορισμένη καταπόνηση, κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, κατά προτίμηση απ' ό,τι από την επικάλυψη φυλλώσεων.

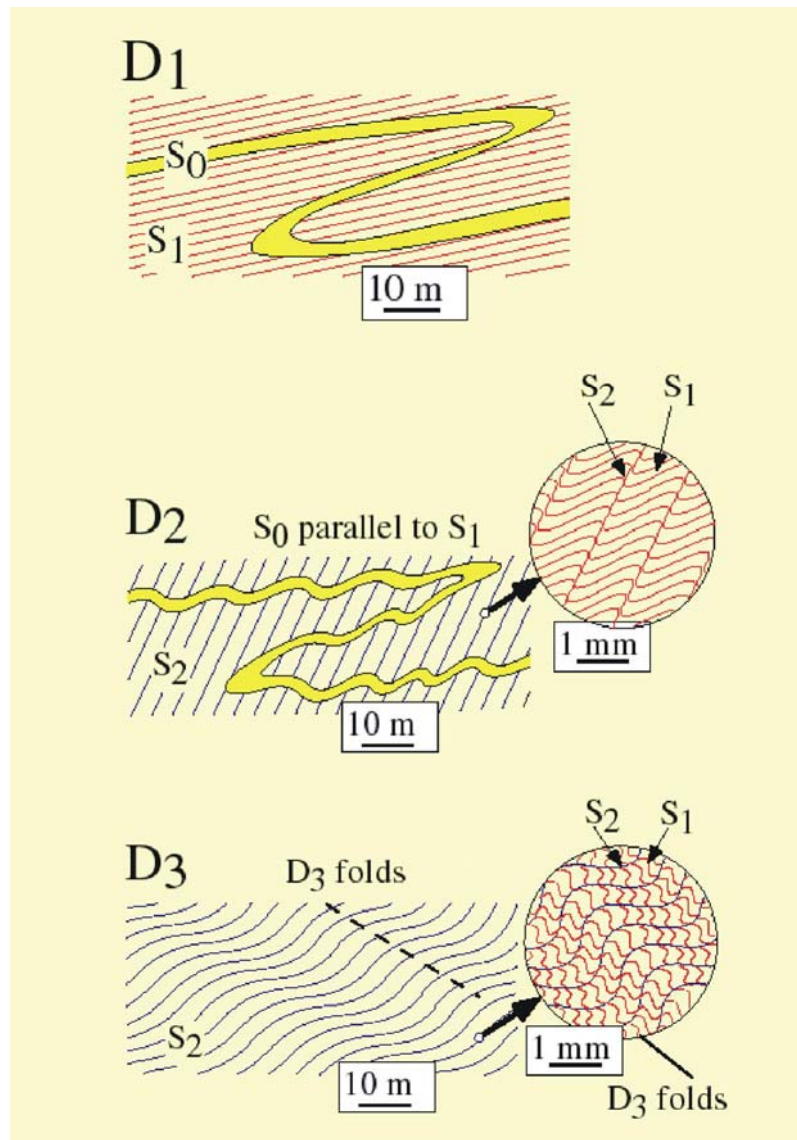
4.2.8 Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΦΥΛΛΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η μελέτη των φυλλώσεων μπορεί να δώσει πολλές πληροφορίες για το είδος και τα χαρακτηριστικά της παραμόρφωσης και του εντατικού πεδίου, τις συνθήκες της μεταμόρφωσης αλλά και την τεκτονική εξέλιξη της περιοχής. Οι σχέσεις επικάλυψης (*overprinting relations*), που αναπτύσσονται ανάμεσα στις φυλλώσεις αποτελούν το πιο "δημοφιλές εργαλείο" για την μελέτη της τεκτονικής εξέλιξης μιας ακολουθίας στρωμάτων. Στην περίπτωση που υπάρχουν πτυχές, ο προσδιορισμός της σχετικής ηλικίας των φυλλώσεων είναι γενικά απλός, βασισμένος στον κανόνα που λέει ότι "*οι πτυχωμένες επιφάνειες είναι πάντα παλαιότερες από τις τεκτονικές δομές που αναπτύσσονται κατά μήκος των αξονικών επιπέδων ή τέμνουν τις πτυχές*". Κάθε επιφάνεια που με κάποιο τρόπο σχετίζεται με τα αξονικά επίπεδα των πτυχών δημιουργείται ταυτόχρονα με αυτές, ενώ αντίθετα φυλλώσεις που τέμνουν τις πτυχές είναι νεότερες από αυτές.

Ένα γενικό πλαίσιο για τον τρόπο που χρησιμοποιείται η ανάλυση των σχέσεων επικάλυψης ανάμεσα στις τεκτονικές δομές, σε σχιστολιθικά μεταμορφωμένα πετρώματα, παρουσιάζεται στην Εικ. 4.20. Σύμφωνα με το σχήμα, κατά τη διάρκεια της D_1 παραμορφωτικής φάσης πτυχώνεται η στρώση S_0 (άξονες B_1) και αναπτύσσεται κατά αξονικό επίπεδο η S_1 καινούργια διαμπερής επιφάνεια που αντιπροσωπεύει συνήθως ένα *slaty cleavage*, είτε *continuous* είτε *spaced*, παράλληλα με το οποίο διατάσσονται όλα τα ορυκτά της μεταμόρφωσης. Η επιφάνεια αυτή στα σκέλη των πτυχών είναι παράλληλη ή υποπαράλληλη με

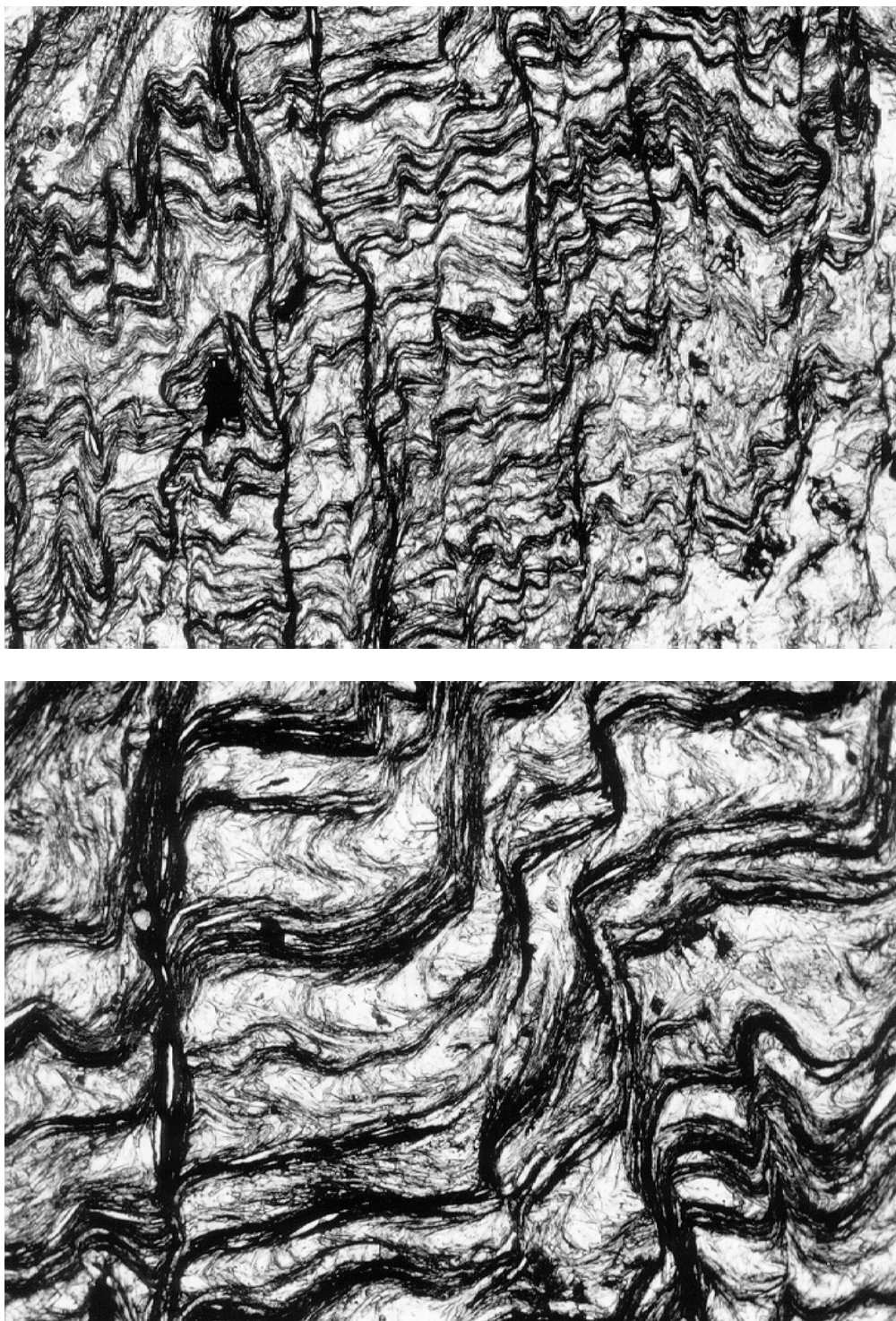
τη στρώση, ενώ αντίθετα στα κορυφαία των πτυχών έχει μια γωνιακή σχέση αρκετά μεγαλύτερη μέχρι και εγκάρσια.

Μια δεύτερη παραμορφωτική φάση D_2 συνήθως είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία νέων διαμπερών επιφανειών τύπου crenulation cleavage (S_2), πτυχώνοντας τις S_1 και S_0 (άξονες B_2). Από μορφολογική άποψη οι επιφάνειες αυτές μπορεί να είναι διαφόρων τύπων (βλπ. Εικ. 4.6), γεγονός που εξαρτάται άμεσα από την ένταση της παραμόρφωσης, την ύπαρξη ή όχι μεταμόρφωσης και τις συνθήκες που αυτή έλαβε χώρα.



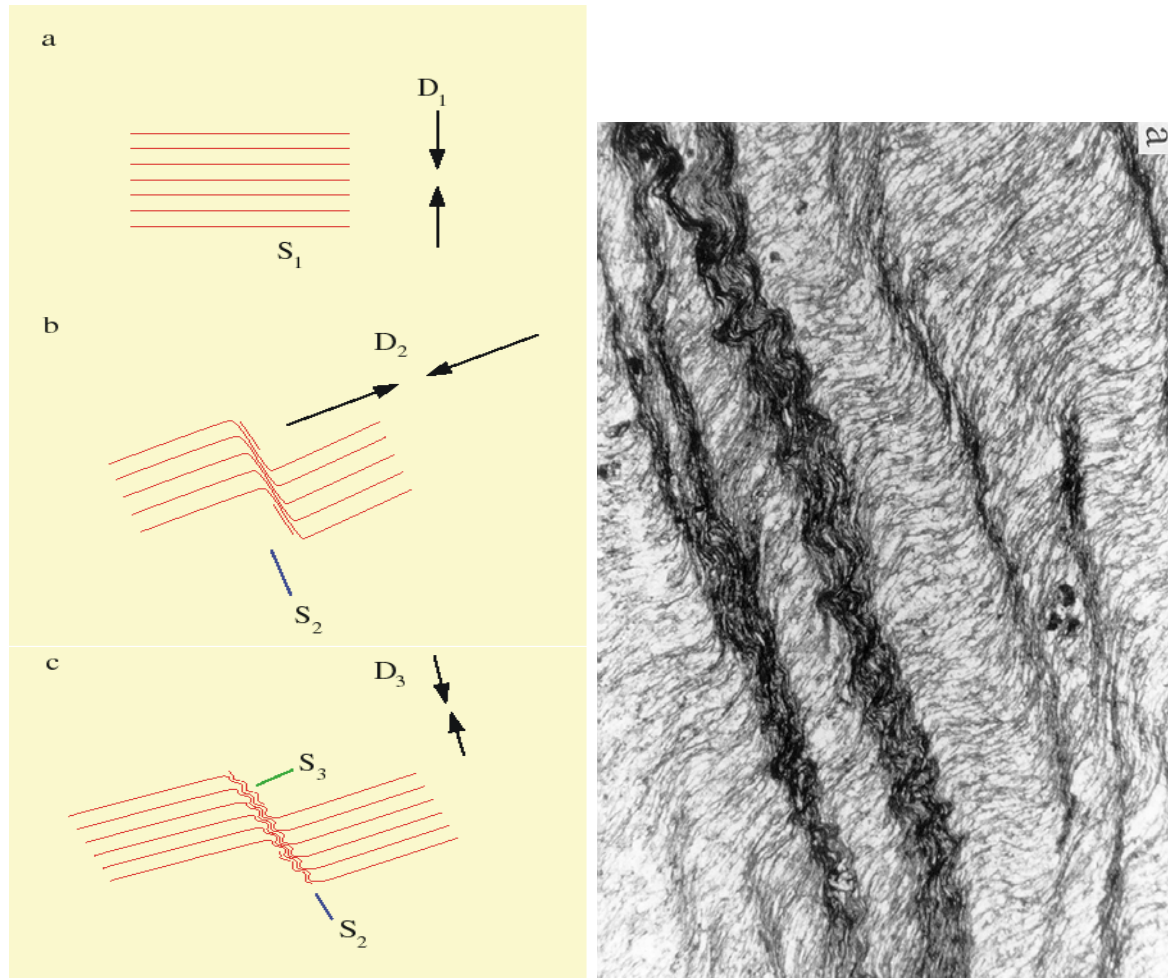
Εικ. 4.20. Σχηματικό παράδειγμα της συνήθους ακολουθίας και επικάλυψης φυλλώσεων που παρατηρείται στα σχιστολιθικά πετρώματα.

Μια τρίτη φάση παραμόρφωσης (D_3) μπορεί να παρατηρηθεί επίσης, η οποία πτυχώνει (άξονες B_3) την S_2 (και φυσικά και όλες τις παλαιότερες επιφάνειες). Μεταγενέστερες φάσεις παραμόρφωσης μπορούν να αναγνωρισθούν με αντίστοιχο τρόπο, δηλαδή από την επικάλυψη (πτύχωση) των παλαιότερων δομών.



Εικ. 4.21. Τυπικό παράδειγμα της συνήθους επικάλυψης φυλλώσεων που παρατηρείται στα σχιστολιθικά πετρώματα. Στην πρώτη φωτογραφία παρατηρείται ένας πτυχοσχισμός S_3 (περίπου κατακόρυφος). Οι πτυχωμένοι μικρολιθώνες (D_3 φάση) αντιπροσωπεύουν ένα παλαιότερο πτυχοσχισμό S_2 (περίπου οριζόντιο), όπως φανερώνει η δεύτερη φωτογραφία, που αποτελεί λεπτομέρεια της πρώτης και όπου διακρίνεται καλά η πτυχωμένη αρχική φύλλωση S_1 (μικρολιθώνες D_2 φάσης), κατά αξονικό επίπεδο της οποίας αναπτύσσεται η S_2 .

Στην Εικ. 4.22 παρουσιάζεται μια ακολουθία παραμορφωτικών γεγονότων που οδηγούν στην επιλεκτική επαναπύκνωση μιας δεύτερης φύλλωσης S_2 από το D_3 παραμορφωτικό γεγονός, το οποίο όμως φαίνεται ότι δεν επηρεάζει την παλαιότερη φύλλωση S_1 . Η S_1 δημιουργείται από κατακόρυφη συμπίεση. Πλάγια συμπίεση κατά την D_2 δημιουργεί έναν S_2 πτυχοσχισμό. Η πλάγια συμπίεση κατά την D_3 οδηγεί στη επιλεκτική επαναπύκνωση του ενός μόνο σκέλους των D_2 πτυχών, λόγω του προσανατολισμού του. Αντίθετα το άλλο σκέλος παραμένει απαραμόρφωτο, δεδομένου ότι τα αξονικά επίπεδα των D_3 πτυχών είναι παράλληλα με αυτό.



Εικ. 4.22. Ακολουθία τεκτονικών γεγονότων και επικάλυψης δομών που οδηγούν σε επιλεκτική επαναπύκνωση. Η φωτογραφία αντιπροσωπεύει ένα ακριβώς όμοιο παράδειγμα με το σχήμα.

Το πρόβλημα που τίθεται στο είδος αυτό της ανάλυσης είναι ο τρόπος που θα συνδυασθούν και θα συσχετισθούν οι φυλλώσεις από το ένα δείγμα στο άλλο, από την μια εμφάνιση στην ύπαιθρο στην άλλη, ή ακόμα περισσότερο από την μια περιοχή στην άλλη. Και αυτό γιατί δεν μπορεί να υπάρχουν γενικοί κανόνες, δεδομένου ότι σε ορισμένες περιπτώσεις υφίστανται αρκετές διαφορές (ακόμα και σε γειτονικά δείγματα της ίδιας ακολουθίας), αφού η δημιουργία ή όχι επιφανειών είναι σε άμεση συνάρτηση με τον τρόπο που κατανέμεται η παραμόρφωση σε ένα γεωλογικό σώμα.

4.3 Γραμμώσεις

4.3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ορισμένα στοιχεία για τα είδη των γραμμώσεων και για τα στοιχεία του τεκτονικού ιστού που διαμορφώνουν μια γράμμωση παρουσιάστηκαν στην εισαγωγή του κεφαλαίου αυτού. Από την άλλη μεριά οι γραμμώσεις παρουσιάζουν σε γενικές γραμμές τα ίδια μορφολογικά χαρακτηριστικά με τις φυλλώσεις και επιπλέον η διάκρισή τους σε επίπεδο λεπτής τομής είναι πρακτικά αδύνατη. Για το λόγο αυτό δεν έχει νόημα η περαιτέρω εξέτασή τους.

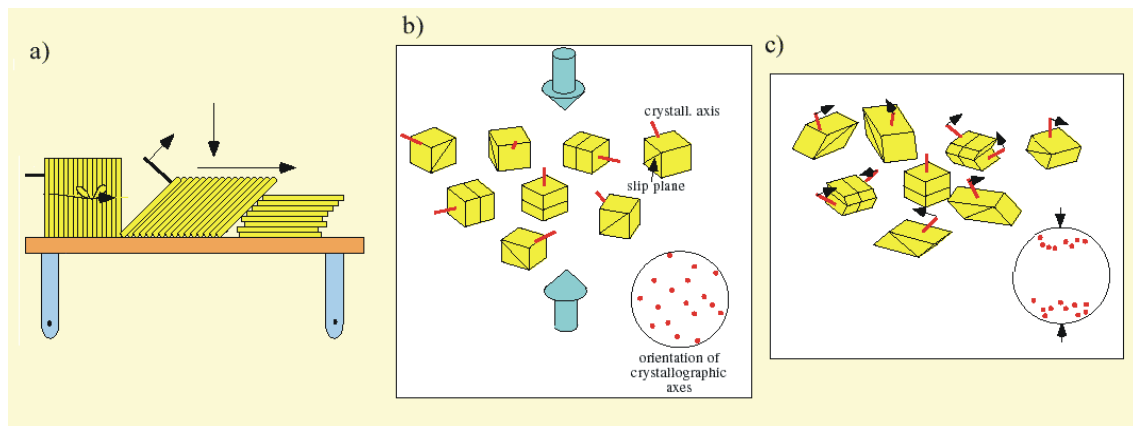
Εκείνο όμως το οποίο φαίνεται να παρουσιάζει ενδιαφέρον από μικροτεκτονική άποψη είναι αυτό που ονομάζουμε *προτιμητέο προσανατολισμό κρυσταλλικού πλέγματος (lattice preferred orientation – LPO)* και για το οποίο θα δοθούν ορισμένα στοιχεία στα επόμενα.

4.3.2 ΠΡΟΤΙΜΗΤΕΟΣ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (LATTICE PREFERRED ORIENTATION)

Σε πολλά παραμορφωμένα πετρώματα ο προσανατολισμός του κρυσταλλικού πλέγματος των ορυκτών που τα αποτελούν δεν είναι τυχαίος αλλά διευθετείται με ένα συστηματικό τρόπο. Αυτά τα πετρώματα παρουσιάζουν ως εκ τούτου έναν *προτιμητέο προσανατολισμό κρυσταλλικού πλέγματος (lattice preferred orientation – LPO)* για ένα ή περισσότερα ορυκτά. Στην περίπτωση των ορυκτών που παρουσιάζουν ένα επιπεδόμορφο ή επίμηκες σχήμα σε μια επιμέρους κρυσταλλογραφική διεύθυνση, όπως οι μαρμαρυγίες και οι αμφίβολοι, ο προτιμητέος προσανατολισμός κρυσταλλικού πλέγματος αναγνωρίζεται εύκολα ως φύλλωση ή γράμμωση. Για ορυκτά όπως ο χαλαζίας και ο ασβεστίτης αυτό είναι περισσότερο δύσκολο. Για το χαλαζία η ύπαρξη LPO είναι εύκολο να αναγνωρισθεί με το οπτικό μικροσκόπιο. Για άλλα ορυκτά χρειάζονται ειδικές τεχνικές.

Ο προτιμητέος προσανατολισμός κρυσταλλικού πλέγματος μπορεί να σχηματισθεί με βάση τους μηχανισμούς που περιγράφησαν για τις φυλλώσεις. Για ορυκτά όμως με κανονικό σχήμα το *dislocation creep* φαίνεται να είναι ο σημαντικότερος μηχανισμός. Ο μηχανισμός αυτός μεταβάλλει το σχήμα ενός κρυστάλλου και η αλληλεπίδραση με τους γειτονικούς κρυστάλλους μπορεί να οδηγήσει στην περίστρεψή τους σύμφωνα με τους στιγμιαίους άξονες έκτασης (*instantaneous stretching axes – ISA*) της τεκτονικής ροής. Οι διδυμίες από παραμόρφωση χαρακτηρίζονται από ένα όμοιο φαινόμενο περίστρεψης.

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αναπαρασταθεί με τον επαναπροσανατολισμό μιας στοίβας βιβλίων λόγω ολίσθησης (Εικ. 4.23a). Ο άξονας που είναι κάθετος στα βιβλία περιστρέφεται προς τη διεύθυνση της βαρύτητας. Η ανάπτυξη LPO σε κρυστάλλους, λόγω της ολίσθησης των εκτοπίσεων του πλέγματος (*dislocation glide*) σε συγκεκριμένα επίπεδα ολίσθησης, λειτουργεί με έναν αντίστοιχο τρόπο. Στην Εικ. 4.23b παρουσιάζεται η εξομάλυνση? (*flattening*) ενός συσσωματώματος ορυκτών λόγω ενός συστήματος ολίσθησης εγκάρσιου σε ένα κρυσταλλογραφικό άξονα. Στην Εικ. 4.23c όλοι οι άξονες των κρυστάλλων περιστρέφονται σύμφωνα με τη διεύθυνση της συμπίεσης, εκτός από εκείνους που είναι παράλληλοι ή εγκάρσιοι σε αυτή. Η παραλληλία με τον άξονα της συμπίεσης παραμορφώνει τον κρύσταλλο με λοξοζωνικές πτυχές (*kinking*) ή δημιουργεί διδυμίες, που και οι δύο συνοδεύονται από περιστροφές των επιμέρους τμημάτων των κρυστάλλων.



Εικ. 4.23. Ανάπτυξη *LPO* σε κρυστάλλους λόγω ολίσθησης των εκτοπίσεων του πλέγματος σε συγκεκριμένα επίπεδα.

Ο τύπος των επιπέδων ολίσθησης που θα είναι ενεργά στον κρύσταλλο εξαρτάται από τις συνθήκες μεταμόρφωσης και παραμόρφωσης. Συνήθως λειτουργούν περισσότερα από ένα συστήματα ολίσθησης σε ένα κρύσταλλο.

Ο προσδιορισμός του *LPO* των κρυστάλλων που αποτελούν ένα πέτρωμα μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τις συνθήκες μεταμόρφωσης και παραμόρφωσης. Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή είναι ο προσδιορισμός των *c-axis fabrics* στο χαλαζία, με σκοπό τον προσδιορισμό της φοράς διάτμησης στα μυλονιτικά πετρώματα (βλπ. στα επόμενα).