

1. Το Πλαίσιο Εργασίας της Μικροτεκτονικής

1.1 Γενικές έννοιες

Μικροτεκτονική είναι η επιστήμη που ασχολείται με την μελέτη, ανάλυση και ερμηνεία των τεκτονικών δομών και της παραμόρφωσης στη μικρή κλίμακα παρατήρησης, δηλαδή από την κλίμακα των λίγων μέτρων (≈ 10 m, επίπεδο στρώσης) μέχρι την κλίμακα του μικροσκοπίου (≈ 1 mm – 1 μ m, επίπεδο αθροίσματος ορυκτών ή ορυκτού).

Στην Εικ. 1.1 παρουσιάζονται τα διάφορα πεδία της τεκτονικής, ανάλογα με την κλίμακα παρατήρησης, απ' όπου διακρίνεται ότι τα πεδία της Μικροτεκτονικής αντιπροσωπεύονται από αυτά που στη βιβλιογραφία αναφέρονται συνήθως ως *Minor Structures* (Μικροδομές) και *Petro Fabrics* (Πετρομηχανική).

Κατά Carey (1962, 1976) μπορούμε να διακρίνουμε 5 τάξεις (κλίμακες) παραμόρφωσης (από Παπανικολάου 1986):

1η τάξη: Ηπειρωτικές και παγκόσμιες δομές. Τεκτονική (Tectonics).

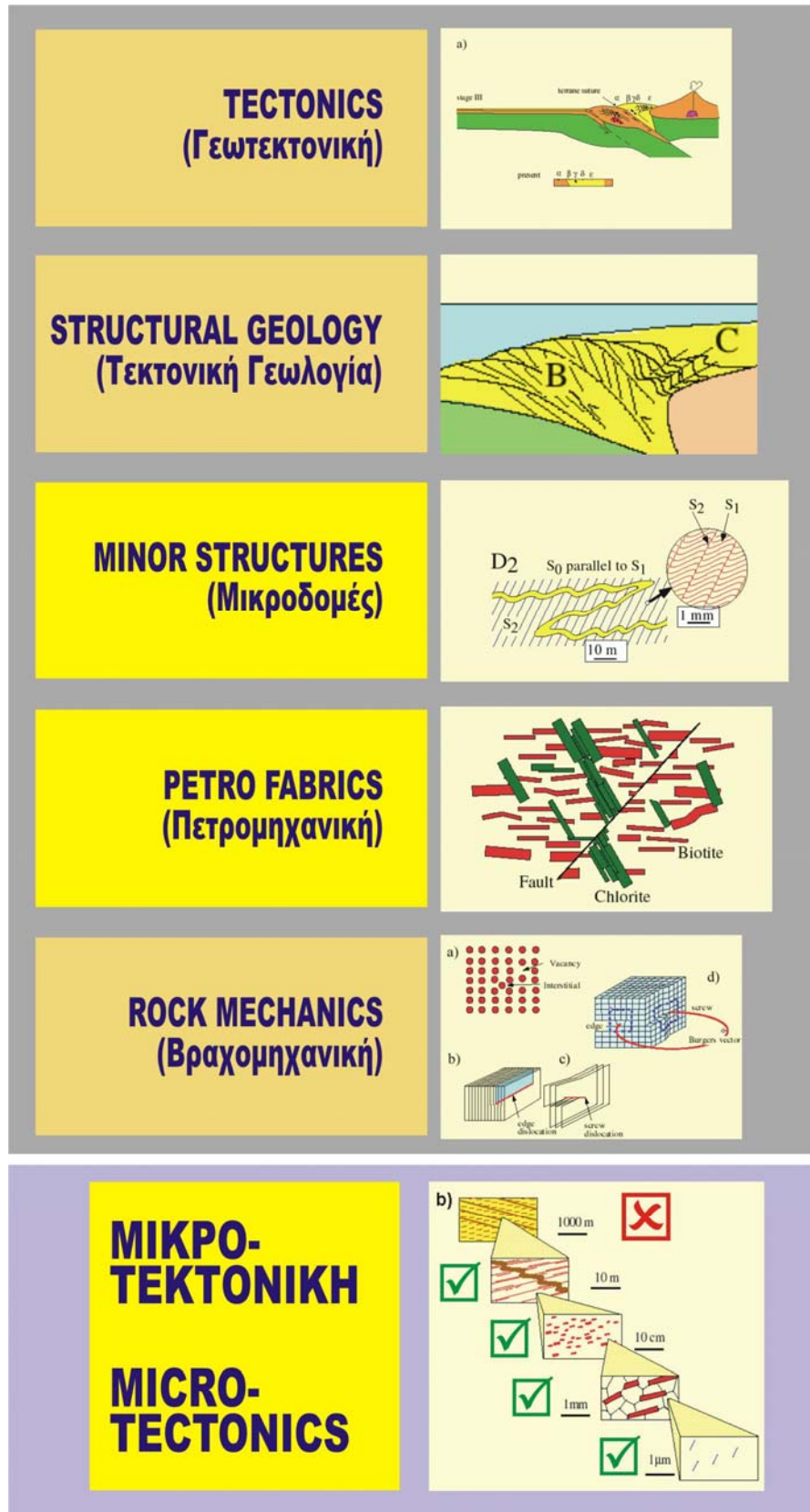
Περιλαμβάνει δομές από 10 έως 10.000 Km, όπως γεωσύγκλινα, ορογενετικά τόξα, μεγάλες επωθήσεις και εγκάρσια ρήγματα μετασχηματισμού, μεσοωκεάνιες ράχες και συστήματα τάφρων διάνοιξης (rifts) κλπ. και η μελέτη γίνεται παύω σε ηπειρωτικούς και παγκόσμιους χάρτες.

2η τάξη: Δομές περιοχής χάρτη. Τεκτονική Γεωλογία (Structural Geology).

Περιλαμβάνει δομές από 10 m έως 10 Km, με σύνθεση των μικρότερων δομών πάνω σε γενικούς τοπικούς χάρτες, όπως πτυχές, ρήγματα, πλουτωνίτες κλπ.. Οι παραμορφωμένες ενότητες δεν είναι πετρώματα ή στρώματα αλλά στρωματογραφικοί σχηματισμοί. Οι μεγαλύτερες δομές περιλαμβάνουν τεκτονικές τάφρους και κέρατο καθώς και μικρά τεκτονικά καλύμματα και γεωαντίκλινα.

3η τάξη: Δομές εμφάνισης στο ύπαιθρο: Μικροδομές (Minor structures).

Περιλαμβάνει δομές από 1 cm έως 10 m, που μελετούνται με τη βοήθεια της πυξίδας (με κλισίμετρο), του σφυριού και του υποδεκάμετρου, όπως μικροπτυχές, boudíns, γραμμώσεις, ραβδώσεις, διακλάσεις, τεκτονικά λατυποπαγή, μυλονίτες κλπ. Μελετώνται πετρώματα και στρώματα και διακρίνονται οι ιζηματογενείς δομές από τις τεκτονικές δομές, ενώ περιλαμβάνονται και μικρής κλίμακας πυριγενή σώματα όπως φλεβίδια, φλέβες, κοίτες.



Εικ. 1.1. Τα διάφορα πεδία της τεκτονικής ανάλογα με την κλίμακα παρατήρησης (από Παπανικολάου 1986, με τροποποιήσεις).

4η τάξη: Δομές κλίμακας μικροσκοπίου: Πετροτεκτονική (Petrofabrics).

Περιλαμβάνει δομές από 10 μ έως 1 cm, που μελετώνται σε επίπεδο κόκκων, κρυστάλλων και ορυκτολογικών αθροισμάτων, όπως σχιστότητα, φύλλωση, γράμμωση, οφθαλμοί, πορφυροκλάστες, μικροδιακλάσεις κλπ. Εδώ αναλύεται κυρίως η σχέση μεταξύ των διαφόρων ορυκτών μέσα στο πέτρωμα και όχι η σχέση μεταξύ διαφόρων πετρωμάτων όπως στην προηγούμενη τάξη.

5η τάξη: Δομές σε επίπεδο πλέγματος ορυκτών. Βραχομηχανική (Rock mechanics).

Περιλαμβάνει δομές από 1 Α έως και 10 μ και μελετά επιφάνειες ολίσθησης, ελαστικότητα, υδαρότητα, πλαστικότητα, παραμόρφωση και ροή ανάμεσα σε κρυστάλλους και πολυκρυσταλλικά αθροίσματα, με μελέτη της τάσης, παραμόρφωσης και της αντοχής. Ο χώρος έρευνας είναι το εργαστήριο και η θεωρητική ανάλυση ενώ η παρατήρηση γίνεται με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Από το σύνολο των 5 αυτών τάξεων παραμόρφωσης από άποψη μεγέθους η 3η και 4η αποτελούν το πεδίο της κλασικά αποκαλούμενης Μικροτεκτονικής, δηλαδή δομές μεσοσκοπικής ως μικροσκοπικής κλίμακας που σημαίνει μετρήσεις και έρευνα στο ύπαιθρο και στο εργαστήριο (μικροσκόπιο). Δηλαδή από την παραμόρφωση ενός πετρώματος ή μιας δέσμης στρωμάτων στο επίπεδο παραμόρφωσης αθροίσματος ορυκτών ή και ενός ορυκτού.

Η μικροτεκτονική δεν μπορεί μόνη της να δώσει λύση στα διάφορα προβλήματα, αλλά αποτελεί ένα απαραίτητο συμπλήρωμα της Τεκτονικής. Γενικά στις διάφορες κατηγορίες - κλίμακες δουλεύουμε με διαφορετική μεθοδολογία, συνδυάζοντάς τες όμως μεταξύ τους, ώστε να αποτελέσουν τους συνδετικούς κρίκους, όπου προχωρώντας από την πιο μικρή στην πιο μεγάλη κλίμακα (γεωτεκτονική), να φθάσουμε στο αίτιο που προκάλεσε όλες αυτές τις μορφές. Δεν μπορούμε σε μια περιοχή να ασχοληθούμε μόνο με μικροτεκτονική, γιατί χρειάζεται οπωσδήποτε μια υποδομή. Δηλαδή χρειάζονται λεπτομερείς γεωλογικοί – τεκτονικοί χάρτες, λεπτομερής τεκτονική ανάλυση των μικροδομών της περιοχής και γενικά λεπτομερής περιγραφή όλων των δομών, ούτως ώστε να ακολουθήσει η μικροτεκτονική ανάλυση σε συγκεκριμένα - επιλεγμένα σημεία, που η πυκνότητα τους εξαρτάται από την λεπτομέρεια που θέλουμε να δουλέψουμε.

Το κύριο πεδίο της Μικροτεκτονικής εστιάζεται στη μελέτη λεπτών τομών, που αποτελούν και τη σημαντικότερη πηγή πληροφορίας. Αποτελεί ένα σχετικά καινούργιο κλάδο, δεδομένου ότι η χρήση τους παλαιότερα περιοριζόταν μόνο από τους πετρογράφους, οι οποίοι περιέγραφαν κάποιους ιστούς (π.χ. λεπιδοβλαστικός, νηματοβλαστικός κλπ.), χωρίς όμως να δίνουν σημασία στην παραμόρφωση, σε κινηματικά ή δυναμικά χαρακτηριστικά κλπ. Τις τελευταίες δεκαετίες όμως έγινε σαφής η αναγκαιότητα της μελέτης των λεπτών τομών και από τους τεκτονικούς γεωλόγους και μάλιστα η συνεργασία ανάμεσα στους δύο αυτούς κλάδους έδωσε πολλά στοιχεία ώστε να κατανοηθούν καλύτερα οι διαδικασίες της παραμόρφωσης και της μεταμόρφωσης.

Τα παραμορφωμένα πετρώματα αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή για να "ξεδιπλωθεί" η τεκτονική εξέλιξη των σχηματισμών. Κυρίαρχο στοιχείο στη μελέτη αποτελεί η γεωμετρία των δομών, η οποία όμως πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή, δεδομένου ότι αυτό που βλέπει κανείς σήμερα σαν παραμορφωμένο πέτρωμα είναι το αποτέλεσμα σύνθετων διεργασιών και μόνο αν κατανοηθεί και ερμηνευθεί πλήρως η τελική αυτή μορφή του πετρώ-

ματος θα γίνει δυνατό να κατανοηθεί και να ερμηνευθεί η τεκτονική εξέλιξη, δηλαδή όλα εκείνα τα στάδια από τα οποία πέρασε το συγκεκριμένο πέτρωμα, ώστε από την αρχική μορφή στο χώρο δημιουργίας του να φθάσει στη μορφή και το χώρο που παρατηρείται σήμερα.

Η ερμηνεία των δομών χρειάζεται πολύ μεγάλη προσοχή δεδομένου ότι όχι μόνο οι σύνθετες, αλλά και απλές σχετικά δομές μπορούν να δημιουργηθούν με πολλούς τρόπους αλλά και σύνθετες διαδικασίες. Πολύ συχνά επίσης μικρές και δύσκολα διακριτές διαφορές στην εμφάνιση και τη γεωμετρία των δομών μπορεί να σημαίνουν σε ορισμένες περιπτώσεις μεγάλες διαφορές στην κινηματική και δυναμική εξέλιξη της παραμόρφωσης και εν γένει στον τρόπο δημιουργίας των δομών. Η διάκριση επιτυγχάνεται με την εμπειρία όπως π.χ. συμβαίνει και με τα ανθρώπινα πρόσωπα, όπου η σχετικά απλή γεωμετρία του προσώπου, που αποτελείται από όμοια συνθετικά στοιχεία, δεν μας εμποδίζει να διακρίνουμε τα 6 δις πρόσωπα του πλανήτη.

Πολλές από τις δομές, τις οποίες μελετά η Μικροτεκτονική, περιλαμβάνουν πληροφορίες τις οποίες δεν μπορούμε ακόμα να ερμηνεύσουμε, δεν γνωρίζουμε τον τρόπο που θα γίνει αυτό. Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία μπορεί να παρατηρήσει κανείς πως για δομές π.χ. όπως οι πορφυροκλάστες ή τα εγκλείσματα στους γρανάτες, έγιναν πολλές θεωρήσεις και αναπτύχθηκαν πολλές σκέψεις και ερμηνείες, άλλες απλές και άλλες σύνθετες, μέχρι να γίνουν κατανοητές οι διεργασίες που σχετίζονται με τις δομές αυτές.

Πρέπει πάντα να έχουμε υπόψη μας ότι ένα ποσοστό παρανοήσεων και λαθών υπεισέρχεται πάντα στην ερμηνεία των μικροδομών, κάτι το οποίο αποτελεί μια φυσική διαδικασία δεδομένου ότι η γνώση δεν είναι κάτι στατικό αλλά προχωράει και εξελίσσεται με το χρόνο.

Επανερχόμενοι σε θέματα ορολογίας, οι συνήθεις όροι που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για την περιγραφή των μικροδομών είναι οι όροι *fabric*, *texture* και *microstructure*. Σωστότερος φαίνεται ο όρος *fabric* δεδομένου ότι περιλαμβάνει το σύνολο της χωρικής και γεωμετρικής σύνθεσης και κατανομής όλων εκείνων των στοιχείων και συστατικών που σχηματίζουν ένα πέτρωμα. Καλύπτει τους όρους *texture*, *structure* και *crystallographic preferred orientation* (κρυσταλλογραφικός προτιμητέος προσανατολισμός). Τα στοιχεία που δημιουργούν τον τεκτονικό ιστό (*fabric*) ονομάζονται *fabric elements* και αντιπροσωπεύουν διαμπερείς (*penetrative*) δομές που επηρεάζουν το σύνολο της μάζας του πετρώματος. Ο όρος *random fabric* χρησιμοποιείται για τις δομές εκείνες που η κατανομή και ο προσανατολισμός τους είναι τυχαία μέσα στο πέτρωμα, ενώ αντίθετα ο όρος *non-random fabric* για εκείνες που παρουσιάζουν συγκεκριμένο προσανατολισμό, όπως μια φύλλωση (*foliation*) ή μια γράμμωση (*lineation*).

Για το πεδίο της Μικροτεκτονικής πολύ συχνά χρησιμοποιείται και ο όρος *microfabrics* (τεκτονικός μικροϊστός*), ενώ τα στοιχεία (*elements*) που σχηματίζουν ένα τεκτονικό μικροϊστό, περιλαμβάνουν το σχήμα των κρυστάλλων, τα όρια των κρυστάλλων, συσσωματώματα ορυκτών με το ίδιο σχήμα ή προσανατολισμό και τον προτιμητέο προσανατολισμό λόγω μεταβολών σε επίπεδο κρυσταλλικού πλέγματος (*lattice preferred orientation*).

* Σε όσα σημεία στο κείμενο αναφέρεται, χάριν συντομίας, ο όρος τεκτονικός ιστός στην ουσία δηλώνει τον τεκτονικό μικροϊστό (*microfabric*) στα πλαίσια του πεδίου της Μικροτεκτονικής.

Στη μη γεωλογική βιβλιογραφία για τα μέταλλα και τα κεραμικά ο όρος *texture* ταυτίζεται με το *lattice preferred orientation*. Από την άλλη μεριά οι πετρολόγοι χρησιμοποιούν τους όρους *texture* και *structure* με διαφορετική σημασία. Ο όρος *texture* αναφέρεται κυρίως στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των στοιχείων που συγκροτούν ένα πέτρωμα και περιλαμβάνει το μέγεθος, το σχήμα και τον προσανατολισμό, ενώ ο όρος *structure* αναφέρεται κυρίως στην παρουσία πτυχών, φύλλωσης, γράμμωσης, στρωμάτωσης κλπ. Φαίνεται ότι η διαφορά ανάμεσα σε αυτούς τους δύο όρους δεν είναι σαφής και για το λόγο αυτό η IUGS πρότεινε την αντικατάσταση του όρου *texture* με τον όρο *microstructure*, ο οποίος είναι στην ουσία συνώνυμος με τον όρο *microfabric*.

1.2 Φάσεις παραμόρφωσης και μεταμορφικά γεγονότα (Deformation phases and metamorphic events)

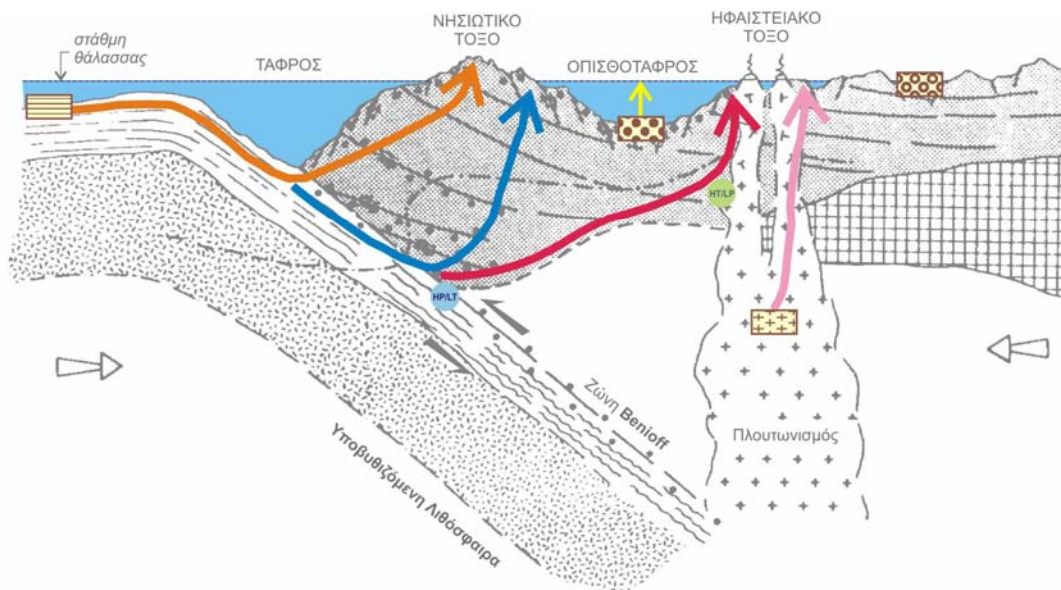
Η μελέτη των μικροδομών και του τεκτονικού ιστού, ιδίως σε κλίμακα λεπτών τομών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αφενός μεν για την κατανόηση των μηχανισμών παραμόρφωσης και μεταμόρφωσης, αφετέρου δε για τον προσδιορισμό της τεκτονο-μεταμορφικής ιστορίας ενός πετρώματος ή μιας ακολουθίας πετρωμάτων. Ένα πέτρωμα από τη στιγμή που θα δημιουργηθεί σε κάποιο γεωδυναμικό περιβάλλον (Εικ. 1.2) μέχρι τη στιγμή που θα φθάσει στο χώρο που το βλέπουμε σήμερα θα έχει υποστεί κάποια παραμόρφωση, η οποία σαν αποτέλεσμα μπορεί να έχει τη δημιουργία τεκτονικού μικροϊστού (*microfabric*). Αντιλαμβάνεται κανείς ότι όσο πιο σύνθετη είναι η πορεία του πετρώματος στο χώρο και το χρόνο, τόσο πιο σύνθετος θα είναι και ο τεκτονικός μικροϊστός, αφού τα στοιχεία και οι δομές που τον απαρτίζουν θα έχουν δημιουργηθεί σε διαδοχικά ή όχι στάδια και κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Οι παράγοντες οι οποίοι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία τεκτονικού μικροϊστού είναι οι ακόλουθοι:

- Το παλαιογεωδυναμικό περιβάλλον δημιουργίας ενός πετρώματος.
- Η λιθολογία.
- Η πορεία που ακολούθησε μέχρι την επιφάνεια που το παρατηρούμε σήμερα.
- Ο χρόνος, τόσο ο συνολικός όσο και αυτός του κάθε επιμέρους σταδίου της πορείας του.
- Τα σημαντικά τεκτονικά γεγονότα στα οποία "έλαβε μέρος".
- Οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της πορείας του, που καθόρισαν το αν και πόσα μεταμορφικά γεγονότα υπέστη.

Μέσα από το σχήμα αυτό γίνεται αντιληπτό ότι π.χ. ένα πέτρωμα μιας μεταλλικής λεκάνης που σαν παραμόρφωση έχει απλά τη μεταβολή της κλίσης και κάποιο ρήγμα που το τέμνει, δεν έχει φυσικά τεκτονικό ιστό. Αντίθετα ένα πέτρωμα που στην πορεία της εξέλιξής του έχει μεταμορφωθεί, ακολουθώντας μια πορεία βάθους μέχρι να αναδυθεί στην επιφάνεια, έχει παραμορφωθεί και μεταμορφωθεί κάτω από διαφορετικές συνθήκες σε επιμέρους στάδια σε καθένα από τα οποία αποκτούσε κάποιο τεκτονικό ιστό. Στις περιπτώσεις αυτές μιλάμε για φάσεις παραμόρφωσης (*deformation phases*) και μεταμορφικά γεγονότα (*metamorphic events*) που χαρακτηρίζουν την τεκτονομεταμορφική ιστορία του πετρώματος μέσα στο χρόνο.

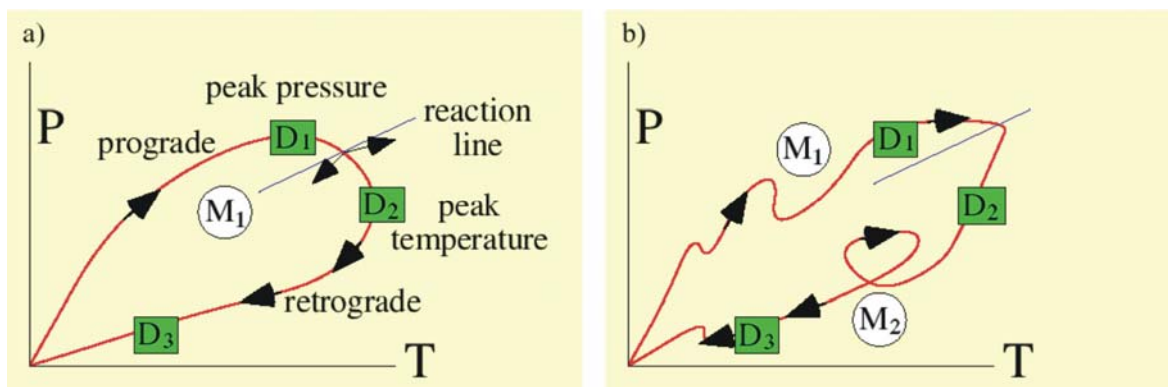
Σε θεωρητικό επίπεδο θα περίμενε κανείς ότι ένα ιζηματογενές π.χ. πέτρωμα που υποβυθίζεται, παραμορφώνεται, μεταμορφώνεται και ανέρχεται ξανά στην επιφάνεια θα έπρεπε να έχει την ίδια ορυκτολογική σύσταση, όπως το πρωτογενές ίζημα, με την προϋπόθεση ότι οι

συνθήκες ισορροπίας θα ήταν ιδανικές για κάθε ένα στάδιο. Αυτό όμως δεν συμβαίνει σχεδόν ποτέ στην πραγματικότητα. Στα περισσότερα παραμορφωμένα πετρώματα δομές με διαφορετικό "στυλ" και γεωμετρία και ορυκτά που αντιπροσωπεύουν διαφορετικό βαθμό μεταμόρφωσης επικαλύπτονται (overprint) μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι ιδανική ισορροπία δεν επιτυγχάνεται σε κάθε στάδιο. Με τον όρο επικάλυψη (overprint) χαρακτηρίζονται όλες εκείνες οι περιπτώσεις που δομές ή ορυκτολογικά αθροίσματα διαφορετικής ηλικίας με τη διαδικασία της υπέρθεσης επικαλύπτουν το ένα το άλλο. Επισημαίνεται βέβαια ότι πολλές φορές οι σχέσεις επικάλυψης ανάμεσα στις δομές είναι δύσκολο να αποσαφηνισθούν και πολύ περισσότερο να "μεταφρασθούν" σε παραμορφωτικές φάσεις και μεταμορφικά γεγονότα.



Εικ. 1.2. Το γεωδυναμικό περιβάλλον δημιουργίας ενός πετρώματος και η πορεία μέχρι την επιφάνεια είναι οι παράγοντες που διαμορφώνουν τον τεκτονικό ιστό (το σχήμα του ορογενετικού τόξου από Παπανικολάου 1986).

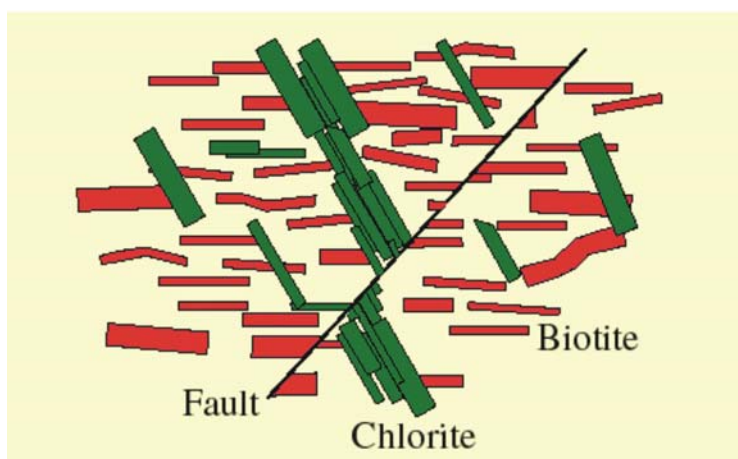
Με άλλα λόγια η μελέτη και ερμηνεία των τεκτονικών μικροδομών, τόσο από τεκτονική όσο και από πετρολογική άποψη, μας επιτρέπει να καταλήξουμε σε αυτό που λέμε P-T-t-D path (P=πίεση, T=θερμοκρασία, t=χρόνος, D=παραμόρφωση και path=πορεία), που περιγράφει την τεκτονική και μεταμορφική ιστορία και εξέλιξη ενός πετρώματος (Εικ. 1.3). Φυσικά ο προσδιορισμός των φάσεων παραμόρφωσης και μεταμόρφωσης θα μας οδηγήσει να συνειδητοποιήσουμε τα μεγάλα τεκτονικά γεγονότα και κύκλους μεταμόρφωσης που συνδέονται με σημαντικά γεωδυναμικά φαινόμενα στον κύκλο μιας ορογένεσης, όπως η κίνηση των πλακών, η σύγκρουση κλπ.



Εικ. 1.3. Παραμορφωτικές φάσεις και μεταμορφικά γεγονότα. Στην εικ. a) παρουσιάζεται ένας απλός μεταμορφικός κύκλος, ενώ στην εικ. b) μια πιο σύνθετη κατάσταση με περισσότερους του ενός κύκλους και υποκύκλους.

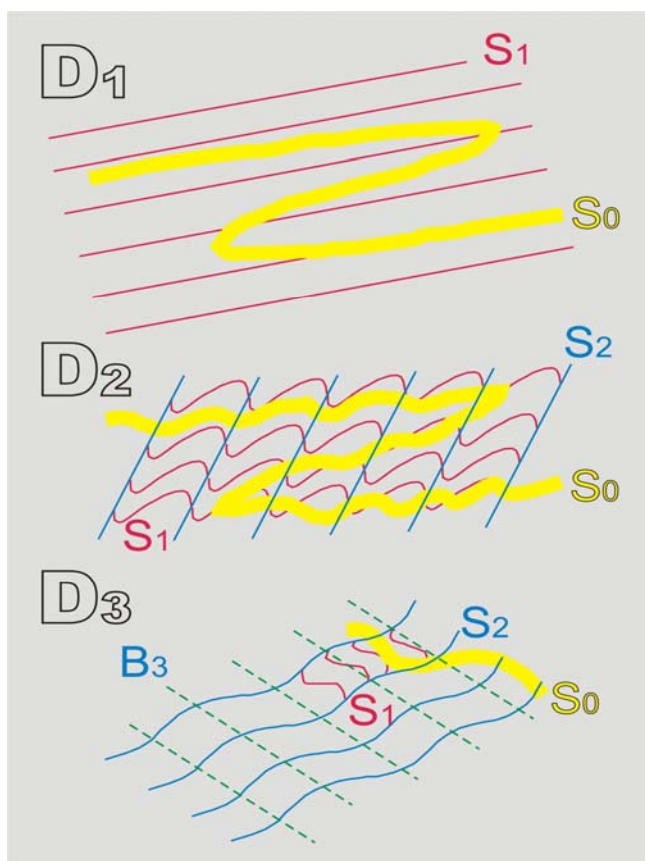
Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι τα μεταμορφικά γεγονότα είναι διαφορετικής "φύσης" από τις παραμορφωτικές φάσεις. Οι παραμορφωτικές φάσεις αντικατοπτρίζουν περιόδους με έντονη παραμόρφωση ανάμεσα στις οποίες παρεμβάλλονται περιόδους με ελάχιστη ή και καθόλου παραμόρφωση. Αντίθετα τα μεταμορφικά γεγονότα αντικατοπτρίζουν μόνο το πέρασμα από τις κρίσιμες εκείνες συνθήκες P και T που είναι απαραίτητες για να ξεκινήσουν οι χημικές αντιδράσεις που θα οδηγήσουν στη δημιουργία ενός ή περισσότερων νέων ορυκτών στο πέτρωμα. Από τη στιγμή όμως που η παραμόρφωση έχει μια καταλυτική επίδραση στην αντίδραση μεταξύ των ορυκτών, πολύ συχνά μεταμορφικά γεγονότα ταυτίζονται σε γενικές γραμμές με παραμορφωτικές φάσεις, ή πιο συγκεκριμένα πολλά ορυκτά της μεταμόρφωσης αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης παραμορφωτικής φάσης.

Όπως προαναφέρθηκε, κατά τη διάρκεια του κύκλου της τεκτονομεταμορφικής εξέλιξης ενός πετρώματος, ή μιας ακολουθίας πετρωμάτων, οι νεότερες τεκτονικές δομές έρχονται και επικαλύπτουν (overprint) τις παλαιότερες. Αυτός είναι και ο βασικός τρόπος της σχετικής χρονολόγησης των δομών που δημιουργούνται στις διάφορες παραμορφωτικές φάσεις, δεδομένου ότι όλες οι νεότερες δομές παραμορφώνουν, πτυχώνουν ή κόβουν τις παλαιότερες. Το ίδιο ισχύει και σε ότι αφορά στη διάκριση των μεταμορφικών γεγονότων, δεδομένου ότι οι ορυκτολογικές παραγενέσεις των νεότερων από αυτά έρχονται και επικαλύπτουν αυτές των παλαιότερων (Εικ. 1.4).



Εικ. 1.4. Οι σχέσεις επικάλυψης των τεκτονικών δομών μας παρέχουν τα απαραίτητα στοιχεία για τον προσδιορισμό των παραμορφωτικών φάσεων.

Για παράδειγμα, παρατηρώντας την Εικ. 1.4 στην προηγούμενη σελίδα και βασιζόμενοι στη λογική της επικάλυψης μπορούμε να υποθέσουμε ότι η πρώτη παραμορφωτική φάση (με μια συνιστώσα κατακόρυφης συμπίεσης – vertical shortening) δημιούργησε μια φύλλωση σε συνθήκες μεταμόρφωσης (πρώτο μεταμορφικό γεγονός) τέτοιες που ήταν κατάλληλες για τη δημιουργία του βιοτίτη. Στη συνέχεια μια δεύτερη παραμορφωτική φάση (με μια συνιστώσα πλάγιας συμπίεσης – oblique shortening) δημιούργησε μια δεύτερη φύλλωση (που τέμνει και επικαλύπτει την προηγούμενη) που συνοδεύεται από την παρουσία χλωρίτη που φανερώνει ένα δεύτερο μεταμορφικό γεγονός, σε συνθήκες χαμηλής μεταμόρφωσης. Μια τρίτη παραμορφωτική φάση, η οποία δεν συνοδεύεται από κάποιο μεταμορφικό γεγονός, δημιούργησε τη διάρρηξη που τέμνει και μετακινεί τις δομές που δημιουργήθηκαν από τις προηγούμενες φάσεις.



Εικ. 1.5. Επικαλυπτόμενες τεκτονικές δομές και παραμορφωτικές φάσεις.

Μια αντίστοιχη διαδοχή παραμορφωτικών φάσεων παρατηρείται και στην Εικ. 1.5 όπου κατά τη διάρκεια της πρώτης παραμορφωτικής φάσης (D₁) πτυχώνεται η στρώση S₀ και δημιουργείται η φύλλωση S₁. Κατά τη διάρκεια της δεύτερης παραμορφωτικής φάσης (D₂) πτυχώνονται και η S₀ και η S₁ και δημιουργείται η S₂, ενώ κατά τη διάρκεια της τρίτης παραμορφωτικής φάσης πτυχώνονται όλες οι προηγούμενες επιφάνειες. Οι επιφάνειες S₁ & S₂ μπορεί να συνδέονται με μεταμορφικά γεγονότα, αν οι συνθήκες είναι τέτοιες ώστε κατά μήκος τους να έχουν αναπτυχθεί νέα ορυκτά.

Σε γενικές γραμμές η διάκριση παραμορφωτικών φάσεων από την ανάλυση του τεκτονικού ιστού των πετρωμάτων είναι μια διαδικασία η οποία απαιτεί πολύ μεγάλη προσοχή,

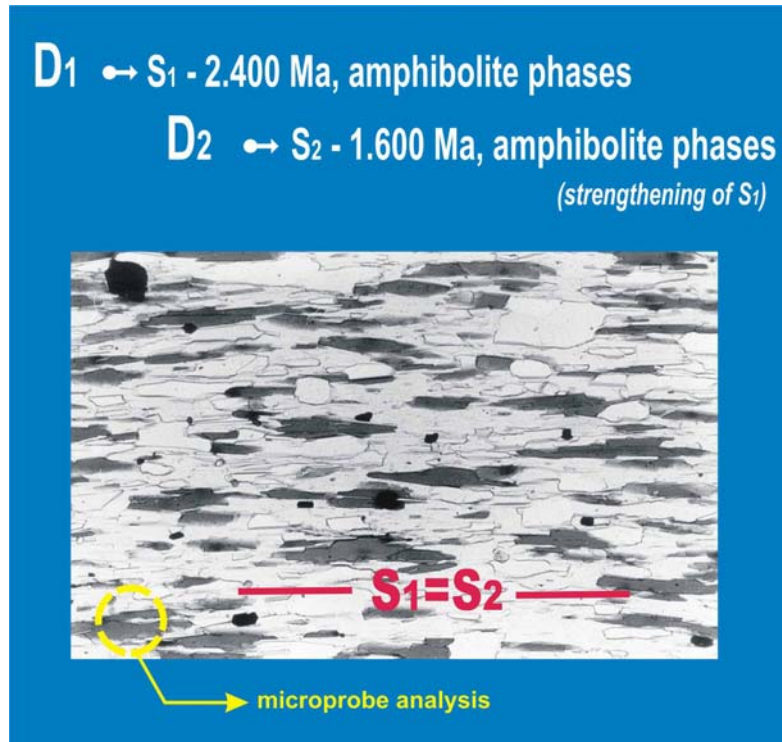
δεδομένου ότι ο κανόνας των επικαλυπτόμενων δομών (του overprinting) παρουσιάζει και ορισμένες εξαιρέσεις. Τα προβλήματα, λοιπόν, στη διάκριση των φάσεων παραμόρφωσης, συνοπτικά, είναι τα ακόλουθα:

1. Μπορεί να δημιουργούνται επικαλυπτόμενες δομές κατά τη διάρκεια της ίδιας παραμορφωτικής φάσης. Μη ομοαξονική προοδευτική παραμόρφωση μπορεί να δημιουργήσει επικαλυπτόμενες δομές χωρίς σημαντική αλλαγή στον προσανατολισμό και το μέγεθος του γενικού εντατικού πεδίου. Το φαινόμενο αυτό είναι συχνό στα μυλονιτικά πετρώματα που αναπτύσσονται σε ζώνες διάτμησης (βλπ. στα επόμενα κεφάλαια) όπου πολύ συχνά εντοπίζονται πτυχές (συνήθως sheath folds) που παραμορφώνουν μεν τη μυλονιτική φύλλωση (Εικ. 1.6), είναι όμως το αποτέλεσμα της ίδιας παραμορφωτικής φάσης, η οποία είναι υπεύθυνη τόσο για τη δημιουργία της φύλλωσης όσο και για τη δημιουργία της πτύχωσης.



Εικ. 1.6. Σε συνθήκες μη ομοαξονικής προοδευτικής παραμόρφωσης μπορούν να δημιουργηθούν επικαλυπτόμενες δομές κατά τη διάρκεια της ίδιας παραμορφωτικής φάσης.

2. Διαφορετικές παραμορφωτικές φάσεις δεν είναι απαραίτητο να δημιουργούν επικαλυπτόμενες δομές. Δύο διαφορετικές παραμορφωτικές φάσεις με ίδιο προσανατολισμό εντατικού πεδίου και ίδιες συνθήκες μεταμόρφωσης δίνουν δομές που είναι πολύ δύσκολο να διακριθούν αφού διαμορφώνουν με τον ίδιο τρόπο τον τεκτονικό ιστό. Π.χ. μπορεί να υφίσταται μια παλαιότερη φύλλωση με κροστίλβη ηλικίας 2400 Ma, που έχει σχηματισθεί σε συνθήκες αμφιβολιτικής φάσεως (Εικ. 1.7) η οποία επικαλύπτεται από μια νεότερη παραμορφωτική φάση, ηλικίας 1600 Ma, σε ίδιες συνθήκες μεταμόρφωσης κάτω από ένα εντατικό πεδίο με περίπου ίδιο προσανατολισμό. Το αποτέλεσμα δεν θα είναι τίποτε περισσότερο από μια "δυναμοποίηση" (strengthening) τις παλαιότερης φύλλωσης και μόνο λεπτομερείς μικροαναλύσεις στα ορυκτά θα μας αποκαλύψουν τα παραμορφωτικά και μεταμορφωτικά γεγονότα που έχουν συμβεί.

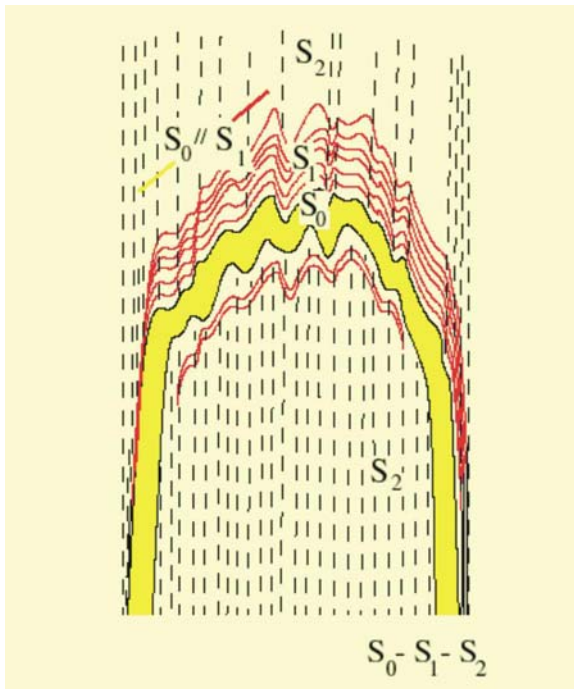


Εικ. 1.7. Διαφορετικές παραμορφωτικές φάσεις δεν είναι απαραίτητο να δημιουργούν επικαλυπτόμενες δομές.

3. Μόνο η σχετική ηλικία των παραμορφωτικών φάσεων μπορεί να προσδιορισθεί. Πανομοιότυπες επικαλυπτόμενες δομές μπορεί να δημιουργούνται είτε στον ίδιο είτε σε διαφορετικούς ορογενετικούς κύκλους. Π.χ. στην Εικ. 1.8 διακρίνεται μια παλαιότερη φύλλωση S₁ που επικαλύπτεται από ένα νεότερο πτυχοσχισμό (crenulation cleavage) S₂. Η φύλλωση μπορεί να είναι αρχαϊκής ηλικίας και ο πτυχοσχισμός φανεροζωϊκής, αλλά μπορεί επίσης και οι δύο αυτές δομές να είναι το αποτέλεσμα μιας επώθησης ενός καλύμματος και να έχουν δημιουργηθεί μέσα σε μερικές εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια.



Εικ. 1.8. Προσδιορισμός σχετικής ηλικίας παραμορφωτικών φάσεων από επικαλυπτόμενες δομές.

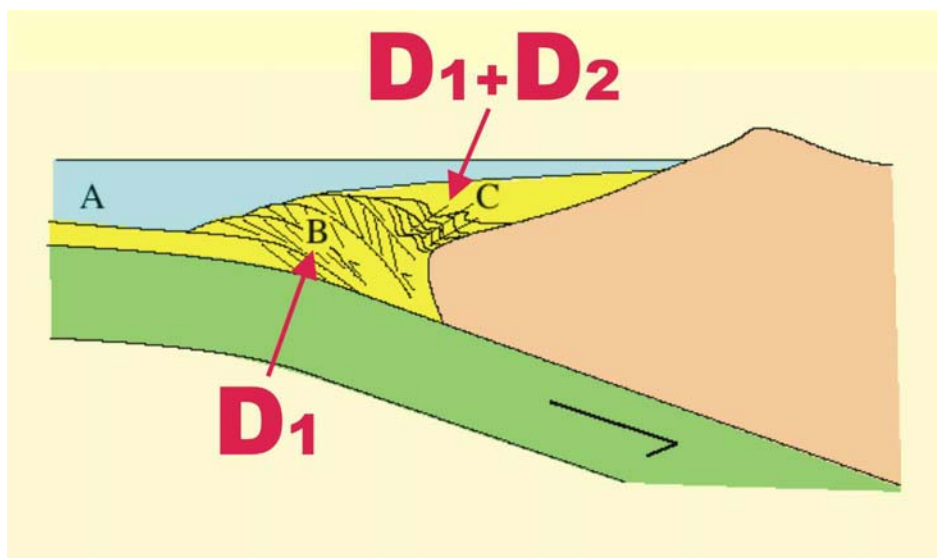


Εικ. 1.9. βλπ. κείμενο.

4. Η σπουδαιότητα των παραμορφωτικών φάσεων εξαρτάται από την κλίμακα παρατήρησης. Κατά τη διάρκεια της δημιουργίας μιας πτυχής η φύλλωση που δημιουργείται παράλληλα με τα αξονικά επίπεδα μπορεί να περιστραφεί σε ακραίες τιμές και να δώσει ένα τοπικό πτυχοσχισμό (crenulation cleavage) που επικαλύπτει την αρχική φύλλωση (Εικ. 1.9). Και οι δύο αυτές δομές όμως έχουν σχηματισθεί κατά τη διάρκεια της ίδιας παραμορφωτικής φάσης. Εξετάζοντας λοιπόν την παραμόρφωση σε κλίμακα λεπτής τομής ή κλίμακα τομής δρόμου μπορεί να διακρίνω επικαλυπτόμενες δομές που δείχνουν δύο παραμορφωτικές φάσεις. Αντίθετα εξετάζοντας την

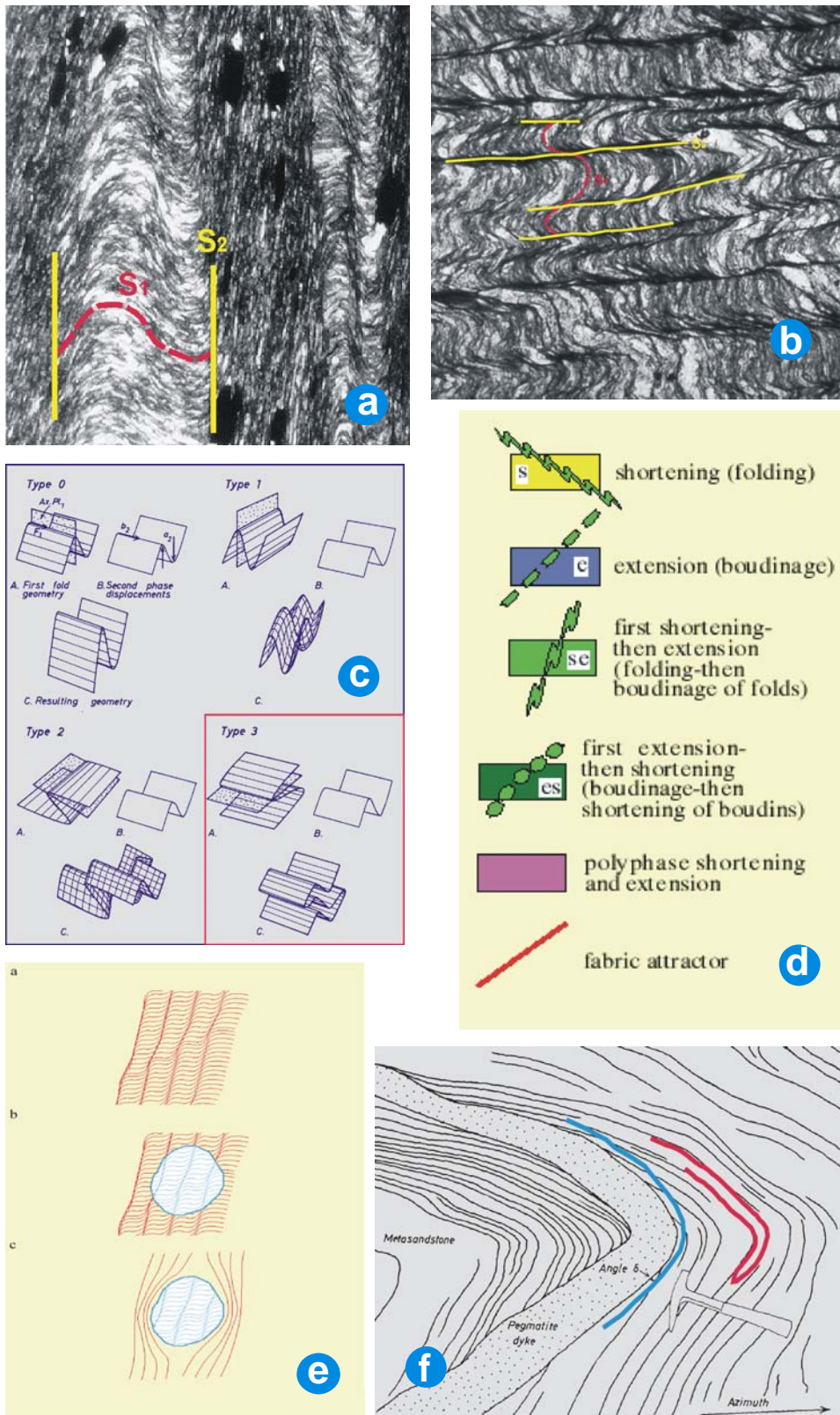
παραμόρφωση σε κλίμακα μεγάλης περιοχής διακρίνω ότι και οι δύο αυτές δομές αποτελούν μέρη της ίδιας παραμορφωτικής φάσης.

5. Οι παραμορφωτικές φάσεις μπορεί να είναι διαχρονικές. Η παραμόρφωση μπορεί να επηρεάζει τα πετρώματα με ένα προοδευτικό και διαχρονικό τρόπο, όπως π.χ σε ένα πρίσμα συσσώρευσης σε μια ζώνη καταβύθισης (Εικ. 1.10). Στο σημείο Β δημιουργείται μια πρώτη φύλλωση (D_1) ενώ στο σημείο C (που έχει ήδη περάσει από την περιοχή του σημείου Β) δημιουργείται μια νεότερη δομή (D_2) που επικαλύπτει την παλαιά φύλλωση. Αυτό σημαίνει ότι το D_2 στην θέση C μπορεί να είναι ισόχρονο ή και παλαιότερο από το D_1 στη θέση Β.



Εικ. 1.10. Ο διαχρονικός χαρακτήρας των παραμορφωτικών φάσεων σε συνθήκες προοδευτικής παραμόρφωσης.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα κριτήρια εκείνα που βοηθούν να αποσαφηνισθεί αν επικαλυπτόμενες δομές αντιστοιχούν σε διαφορετικές παραμορφωτικές φάσεις (Εικ. 1.11).



Εικ. 1.11. Κριτήρια διάκρισης παραμορφωτικών φάσεων (βλπ. κείμενο).

- a) Δύο επικαλυπτόμενες φυλλώσεις που χαρακτηρίζονται από παραγενέσεις που προϋποθέτουν διαφορετικό βαθμό μεταμόρφωσης, πρέπει να ανήκουν σε διαφορετικές παραμορφωτικές φάσεις.
- b) Φυλλώσεις που, σε επίπεδο λεπτής τομής, επικαλύπτουν η μία την άλλη αντιπροσωπεύουν διαφορετικές παραμορφωτικές φάσεις, αν και εξαιρέσεις, όπως τα oblique fabrics και τα shear band cleavages (βλπ. στα επόμενα), υπάρχουν.
- c) Επικαλυπτόμενες φάσεις πτυχώσεων, που τα αξονικά τους επίπεδα έχουν γωνιακή σχέση, αντιπροσωπεύουν διαφορετικές παραμορφωτικές φάσεις. Προσοχή χρειάζεται στην περίπτωση ισοκλινών επαναπτυχώσεων με παράλληλους άξονες (Type III κατά Ramsay), που μπορεί να σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της ίδιας παραμορφωτικής φάσης.
- d) Boudins που έχουν υποστεί βράχυνση (shortened boudins), σχηματίζονται συνήθως από την επικάλυψη δύο παραμορφωτικών φάσεων. Η πρώτη φάση (extension) δημιουργεί τα boudins και η δεύτερη φάση (shortening) δημιουργεί τα shortened boudins.
- e) Μερικές εσωτερικές δομές σε πορφυροκλάστες (βλπ. στα επόμενα) αντιπροσωπεύουν διαφορετικές φάσεις παραμόρφωσης.
- f) Οι φλέβες και οι κοίτες πολύ συχνά είναι σημαντικές δομές που βοηθούν να διακριθούν οι παραμορφωτικές φάσεις και οι φυλλώσεις που σχετίζονται με αυτές.

