

6. Δομές σε Χώρους Διεύρυνσης (Dilatation Sites) – Πορφυροβλάστες (Porphyroblasts)

6.1 Γενικά

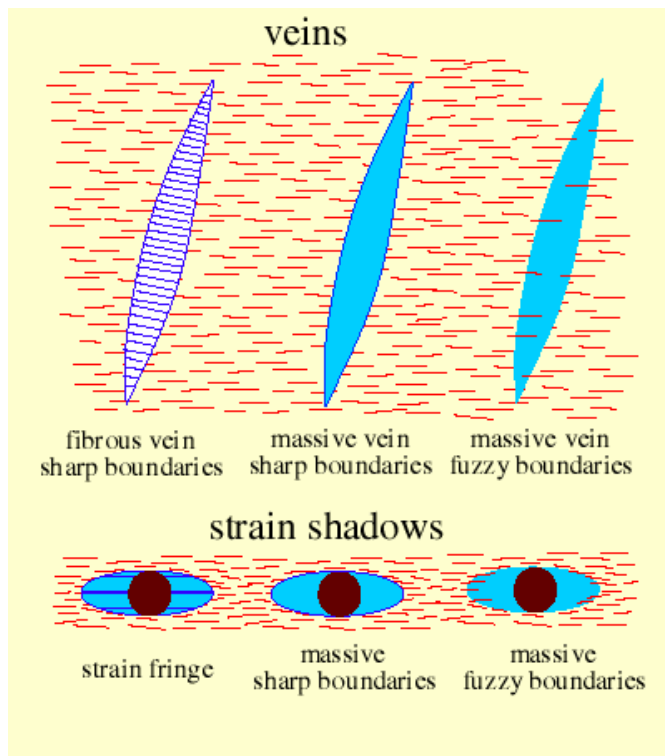
Στο κεφάλαιο αυτό θα δοθούν ορισμένα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται στη Μικροτεκτονική για τη μελέτη των χαρακτηριστικών της παραμόρφωσης και της μεταμόρφωσης. Τα στοιχεία αυτά αφορούν τις *φλέβες (veins)*, τις *σκιές* και τους *θυσάνους παρυφών παραμόρφωσης? (strain shadows & strain fringes)*, τα *boudins* και τους *πορφυροβλάστες (porphyroblasts)*.

Επειδή οι δομές αυτές είναι αρκετά σύνθετες και πολύπλοκες και αποτελούν ύλη που μπαίνει στα "βαθεία νερά" της Μικροτεκτονικής, θα δοθούν μόνο τα βασικά στοιχεία που αφορούν τις έννοιες αυτές.

Σε πολλά παραμορφωμένα πετρώματα υπάρχουν θέσεις στις οποίες παρατηρείται μια απόκλιση, σε σχέση με το υπόλοιπο πέτρωμα, τόσο ως προς την ορυκτολογική σύσταση όσο και ως προς τον τεκτονικό ιστό. Η ιδιομορφία αυτή σε πολλές περιπτώσεις, είναι το αποτέλεσμα της αναδιάταξης των υλικών του πετρώματος στις θέσεις εκείνες που κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης επικρατεί τοπικά μια *διεύρυνση χώρου (dilatation sites)*.

Όταν οι χώροι αυτοί είναι επιμήκεις σχηματίζονται *φλέβες (veins)*, όταν βρίσκονται εκατέρωθεν σκληρών αντικειμένων μέσα στο πέτρωμα δημιουργούνται περιοχές όπου υπάρχει "*σκιά*" της *παραμόρφωσης (strain shadows)* ή τέλος βρίσκονται στις περιοχές εκλέπτυνσης των μουντιναρισμένων στρωμάτων (*boudin necks*), Εικ. 6.1.

Οι χώροι αυτοί πληρώνονται συνήθως με πολυκρυσταλλικό υλικό το οποίο μπορεί να είναι συνεκτικό αλλά αποτελείται από κρυστάλλους που έχουν νηματοειδές σχήμα. Για το λόγο αυτό αντί για τον όρο *strain shadows*, χρησιμοποιείται και ο όρος *strain fringes* (*θύσανοι παρυφών παραμόρφωσης?*). Στη βιβλιογραφία απαντώνται και οι όροι *pressure shadows* (*πιεζοσκιές?*) και *pressure fringes* (*πιεζοπαρυφές?*). Δεδομένου ότι οι χώροι αυτοί δίνουν στοιχεία για την κατανομή της παραμόρφωσης (καταπόνησης – strain), γύρω από ένα αντικείμενο και όχι για την κατανομή των τάσεων, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται οι όροι *strain shadows* ή *strain fringes*.



Εικ. 6.1. Φλέβες (veins), σκιές παραμόρφωσης (strain shadows) και θύσανοι παρυφών παραμόρφωσης (strain fringes).

6.2 Ινώδεις Φλέβες (Fibrous Veins)

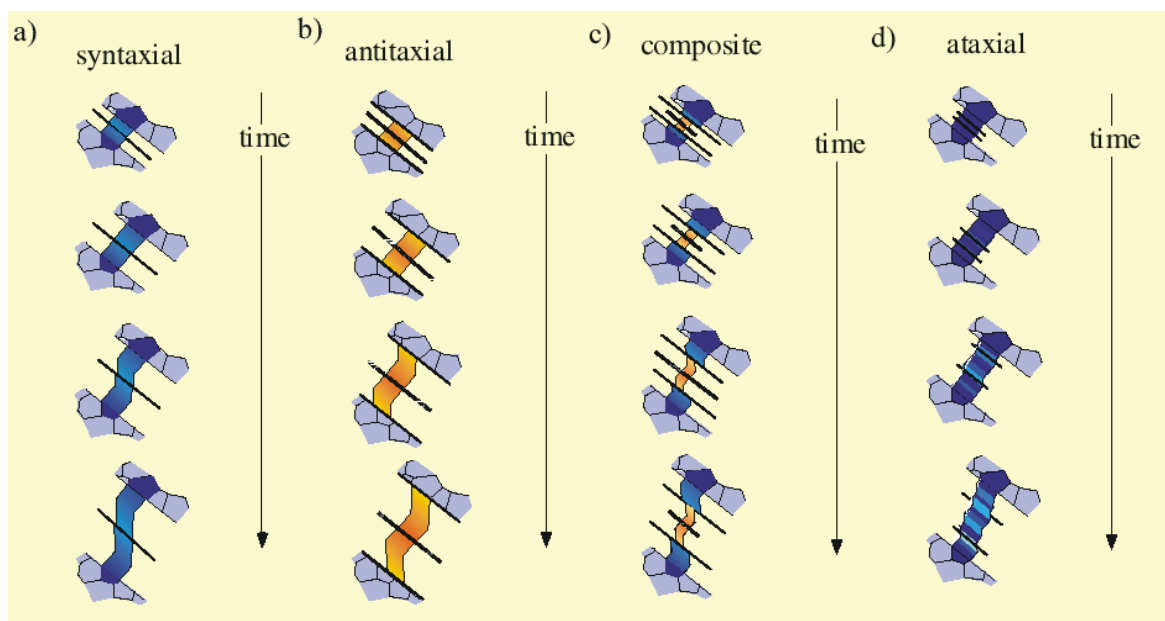
Η ινώδης μορφή που έχει σε ορισμένες περιπτώσεις ο χαλαζίας και ο ασβεστίτης σαν υλικό πλήρωσης φλεβών, είναι γενικά ασυνήθης για' αυτά τα ορυκτά και φαίνεται ότι οφείλεται σε ένα ιδιαίτερο μηχανισμό ανάπτυξης. Στην περίπτωση μιας απομονωμένης ρωγμής, σε ένα μονοκρυσταλλικό άθροισμα από χαλαζία ή ασβεστίτη, η ινώδης ανάπτυξη πραγματοποιείται και από τις δύο πλευρές ταυτόχρονα και με τον ίδιο ρυθμό. Το αποτέλεσμα είναι μια συμμετρική φλέβα με ένα κεντρικό επίπεδο όπου λαμβάνει χώρα η απόθεση του νέου υλικού.

Σε λεπτή τομή το επίπεδο αυτό εμφανίζεται σαν μια γραμμή, που ονομάζεται *ενδιάμεση γραμμή (median line)*, κατά μήκος της οποίας παρατηρείται μια ασυνέχεια στον ιστό των ινωδών ορυκτών ή αναπτύσσονται μικροί κρύσταλλοι αδιαφανών ορυκτών. Η περίπτωση αυτής της ανάπτυξης (από τα τοιχώματα προς το κέντρο της φλέβας όπου και το νεότερο υλικό και με υλικό πλήρωσης που είναι το ίδιο με το υλικό του πετρώματος) ονομάζεται *συνταγμένη ανάπτυξη (syntaxial growth)* και οι φλέβες *συνταγμένες ινώδεις φλέβες (syntaxial fibre veins ή syntaxial veins)*, Εικ. 6.2.

Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις φλεβών που το υλικό πλήρωσης είναι διαφορετικό από αυτό των τοιχωμάτων της φλέβας, π.χ. ινώδης ασβεστίτης σε χαλαζίτη. Στις περιπτώσεις αυτές η ανάπτυξη του νέου υλικού λαμβάνει κατά μήκος των τοιχωμάτων της φλέβας. Παρατηρείται και εδώ μια ενδιάμεση γραμμή, που συνήθως συνοδεύεται από μικρούς κόκκους του υλικού πλήρωσης ή από μικρά θραύσματα του υλικού των τοιχωμάτων, και αντιπροσωπεύει τον αρχικό πυρήνα κρυστάλλωσης του υλικού πλήρωσης. Αυτή η περίπτωση της ανάπτυξης ονομάζεται *αντιταγμένη ανάπτυξη (antitaxial growth)* και οι φλέβες *αντιταγμένες ινώδεις φλέβες (antitaxial fibre veins ή antitaxial veins)*, Εικ. 6.2. Μονήρεις ίνες

του υλικού πλήρωσης στις αντιταγμένες φλέβες μπορεί να είναι συνεχόμενες απ' άκρη σε άκρη της ενδιάμεσης γραμμής, σε αντίθεση με τα ινώδη ορυκτά πλήρωσης των συνταγμένων φλεβών.

Επίσης υπάρχουν και *σύνθετες φλέβες (composite veins)*, στις οποίες αντιταγμένες ίνες (του υλικού πλήρωσης) αναπτύσσονται κατά μήκος της ενδιάμεσης γραμμής συνταγμένων ινών. Με αυτό τον τρόπο μια σύνθετη φλέβα έχει τρεις ενδιάμεσες γραμμές (Εικ. 6.2).



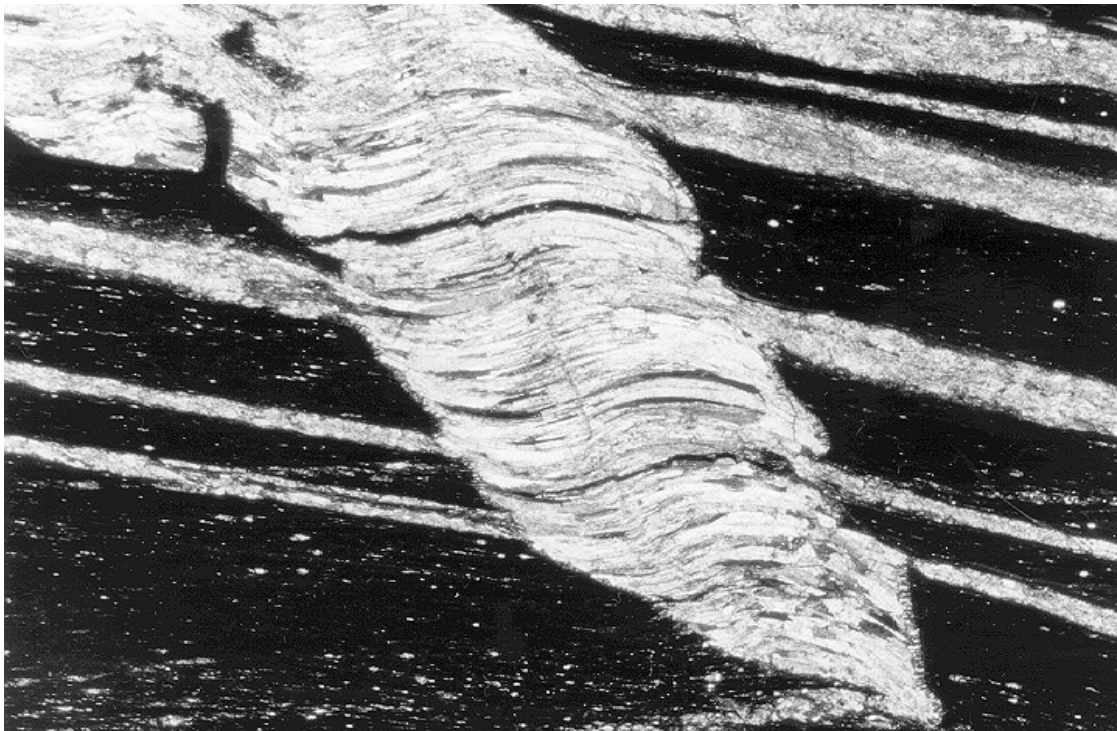
Εικ. 6.2. Οι τέσσερις τύποι ανάπτυξης ινωδών ορυκτών σε φλέβες, που απαντώνται συνήθως στη φύση.

Υπάρχει και η περίπτωση των *ασύντακτων φλεβών (ataxial veins)* που δημιουργούνται στις περιπτώσεις που παρατηρείται μια διαδοχική ρωγματοποίηση με ανάπτυξη των ινωδών ορυκτών σε εναλλακτικές, διαφορετικές θέσεις στη φλέβα και χωρίς ενδιάμεση γραμμή (Εικ. 6.2). Στην περίπτωση αυτή νεότερα και παλαιότερα μέρη των ινωδών ορυκτών παρουσιάζονται ανακατεμένα σε μια τομή από από τη μια μέχρι την άλλη άκρη της φλέβας.

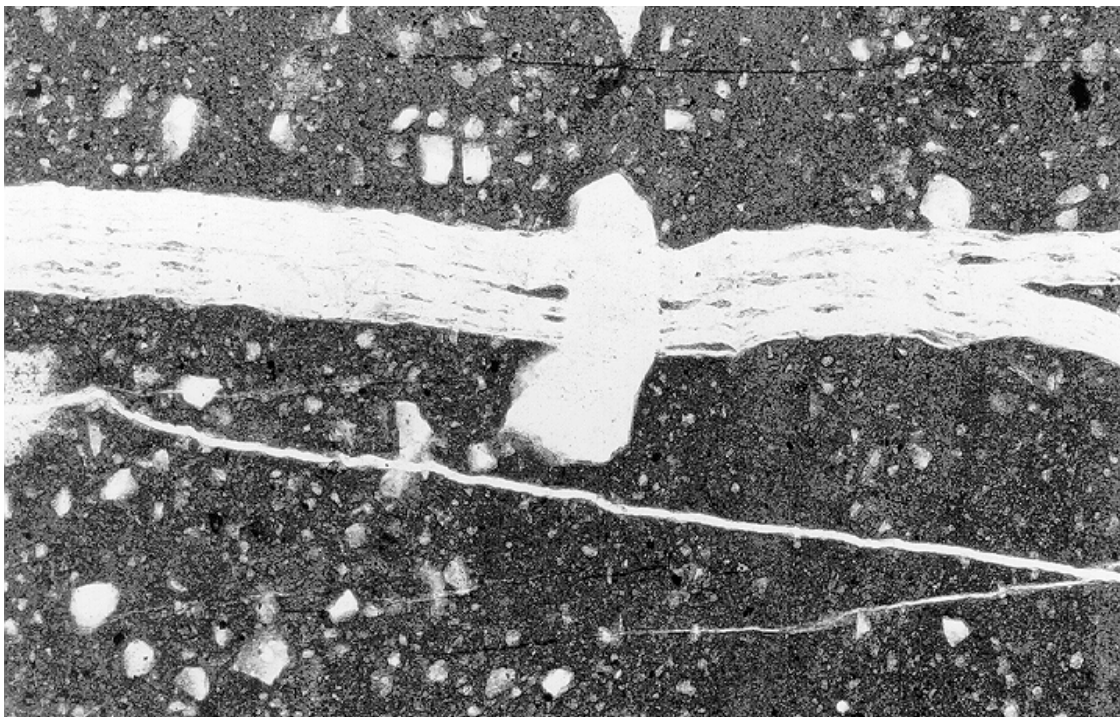
Η χρήση των δομών αυτών στη μελέτη της παραμόρφωσης αφορά κυρίως κινηματικούς δείκτες. Στην Εικ. 6.5 παρουσιάζεται σχηματικά η ανάπτυξη των τεσσάρων τύπων φλεβών που η ανάπτυξη των ινωδών ορυκτών (και άρα η γεωμετρία που παρουσιάζουν) καθορίζεται από τις κινήσεις λόγω της παραμόρφωσης στην περιοχή αυτή.

Μια μεταβολή στο σχετικό προσανατολισμό των εφελκυστικών *στιγμιαίων αξόνων έκτασης (extensional ISA – Instantaneous Strtching Axes)* της τεκτονικής ροής σε σχέση με τη φλέβα, μπορεί να δημιουργήσει μια κάμψη των αναπτυσσομένων ινωδών ορυκτών που μπορεί με τη σειρά της να χρησιμοποιηθεί στην κινηματική ανάλυση. Σημειώνεται ότι η φορά της κάμψης της φλέβας εξαρτάται από το τύπο στον οποίο ανήκει.

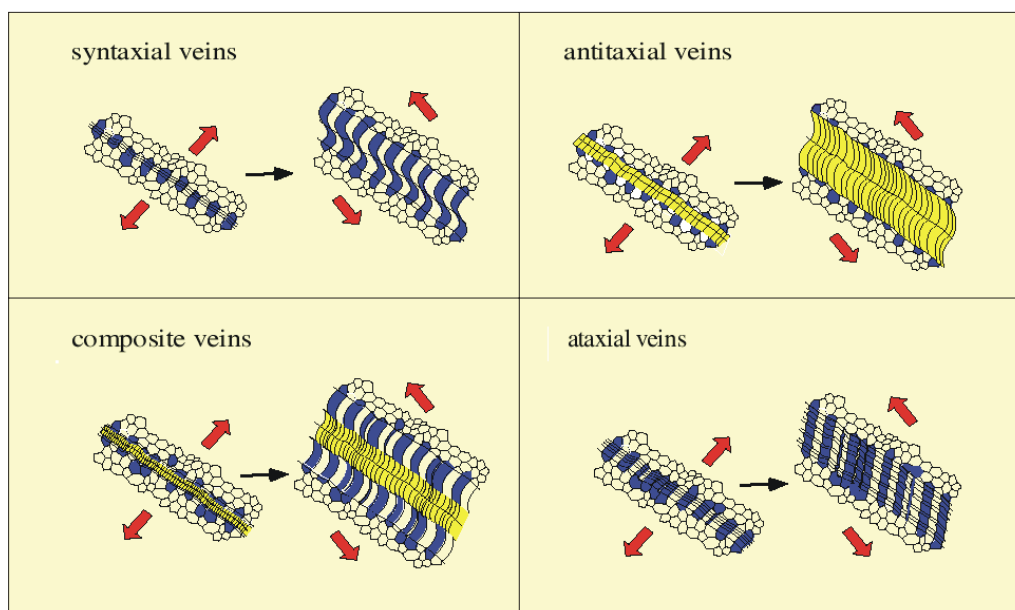
Οι φλέβες που σχηματίζουν μια μεγάλη γωνία με τη διεύθυνση του εφελκυσμού ονομάζονται επίσης και *εκτατικές ρωγμές? (tension gashes)*.



Εικ. 6.3. Αντιταγμένη φλέβα (antitaxial vein) από ίνες ασβεστίτη σε σχιστόλιθο. Διακρίνεται η ενδιάμεση γραμμή (median line).



Εικ. 6.4. Ασύντακτη φλέβα (ataxial vein) από ίνες χαλαζία σε λεπτόκοκκο τουρμαλινίτη, που τέμνει κρύσταλλο χαλαζία (κέντρο).



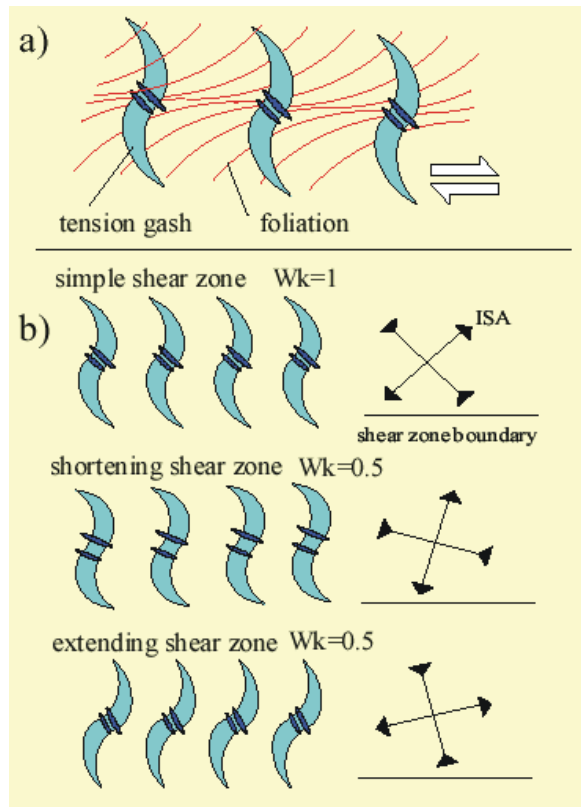
Εικ. 6.5. Ανάπτυξη ινωδών ορυκτών, στους τέσσερις τύπους φλεβών, που η γεωμετρία τους καθορίζεται από την παραμόρφωση.

Στις θραυστιγενούς χαρακτήρα ζώνες διάτμησης, αλλά και σε ορισμένες όλκιμου χαρακτήρα, εκτατικές ρωγμές (*tension gashes*), αναπτύσσονται συστήματα φλεβών που είναι διευθετημένα σε λοξή κλιμακωτή διάταξη (*en echelon*), Εικ. 6.6a. Οι μεγάλοι μεγέθους εκτατικές ρωγμές στις ζώνες διάτμησης παρουσιάζουν ένα χαρακτηριστικό καμπυλοειδές σχήμα. Τόσο στην ομοαξονική όσο και στη μη-ομοαξονική τεκτονική ροή, οι εκτατικές ρωγμές ανοίγουν περίπου παράλληλα προς τη διεύθυνση του άξονα του μέγιστου στιγμιαίου εφελκυσμού. Συνήθως ένα δεύτερο σύστημα εκτατικών ρωγμών αναπτύσσεται στο κέντρο του παλαιότερου συστήματος. Η φορά διάτμησης, όπως προσδιορίζεται από την καμπυλότητα τόσο των εκτατικών ρωγμών όσο και της φύλλωσης, είναι κοινή και στις δύο περιπτώσεις (Εικ. 6.6a).

Ο προσανατολισμός των νεότερων τμημάτων (απολήξεων) των εκτατικών ρωγμών, σε σχέση με τον προσανατολισμό των ορίων της ζώνης διάτμησης (*shear zone boundary – SZB*), εξαρτάται από την τιμή της περιστροφικής συνιστώσας της τεκτονικής ροής (*kinematic vorticity number – W_k*) και από τον προσανατολισμό του στιγμιαίου άξονα έκτασης (*instantaneous stretchin axis – ISA*), σε σχέση με τα όρια της ζώνης διάτμησης (Εικ. 6.6b).

6.3 Σκιές και Θύσανοι Παραμόρφωσης (Strain Shadows & Strain Fringes)

Σκληρά, δύσκαμπτα αντικείμενα (συνήθως αποκαλούνται *core objects* – αντικείμενα πυρήνες) σε ομοαξονική ή μη-ομοαξονική τεκτονική ροή, προκαλούν ανωμαλίες στο πεδίο των τάσεων και το πρότυπο της ροής (*flow pattern*). Στην περίπτωση που η παραμόρφωση λαμβάνει χώρα σε χαμηλές θερμοκρασίες και η πίεση των ρευστών είναι υψηλή, παρατηρείται αυξημένη διάλυση υπό πίεση στα πλαϊνά του δύσκαμπτου αντικειμένου προς την πλευρά της βράχυνσης.

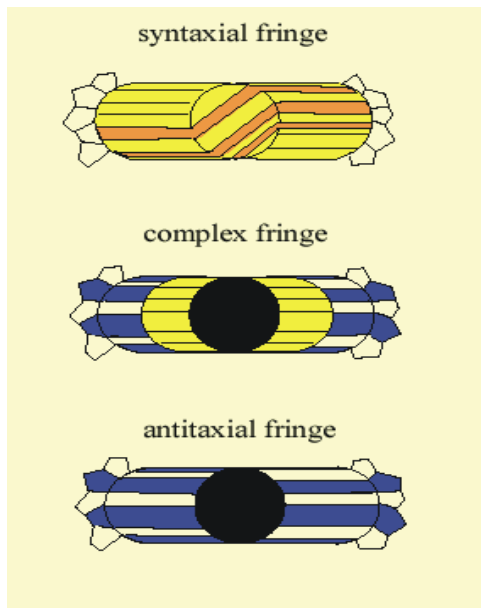


Εικ. 6.6. Σχηματικό διάγραμμα εκτατικών ρωγμών (*tension gesches*) σε λοξή κλιμακωτή διάταξη (*en echelon*) σε ζώνες διάτμησης και τα γεωμετρικά και κινηματικά τους χαρακτηριστικά.

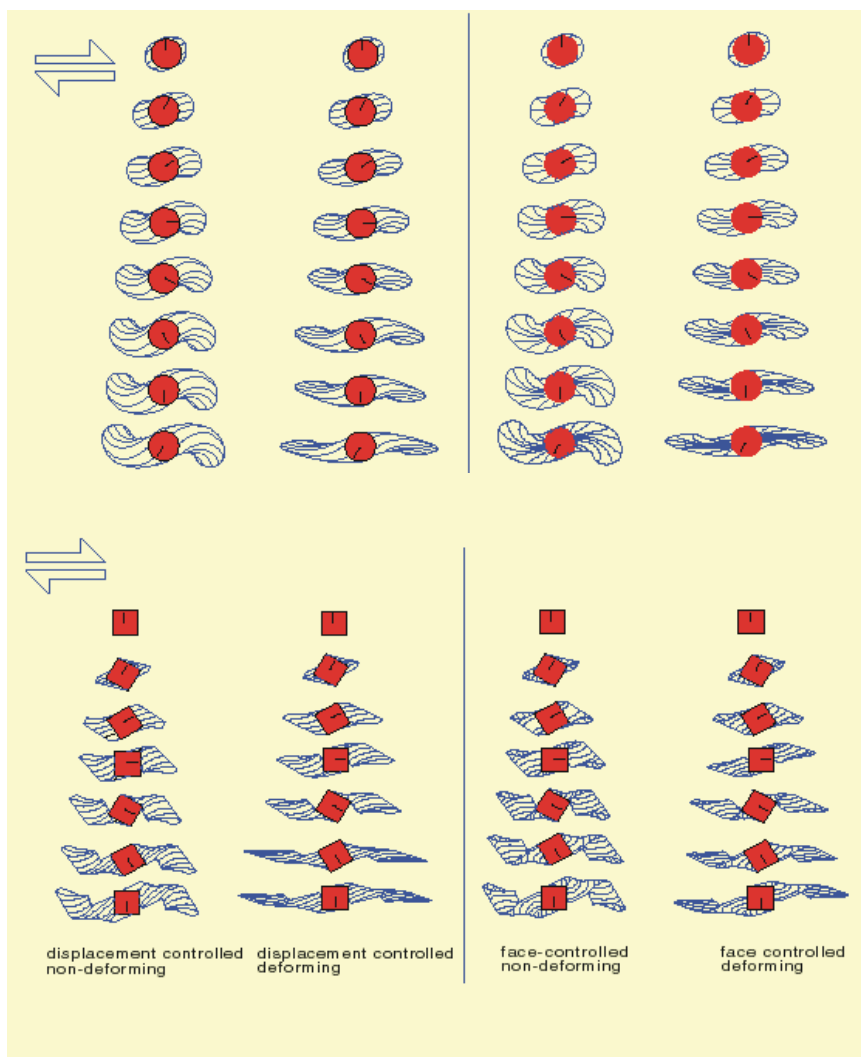
Εφελκυστικές ρωγμές? (*extensional gashes*) μπορούν να ανοίξουν στην περιοχή αυτή, δηλαδή στην πλαϊνή επαφή (παρυφή) του αντικειμένου με την κύρια μάζα του πετρώματος (όπου και η σκιά της παραμόρφωσης) και να πληρωθούν δημιουργώντας μια νέα ινώδη (με τη μορφή θυσάνου) κρυσταλλική μάζα (συνήθως από χαλαζία, ασβεστίτη ή σε τοπικό επίπεδο χλωρίτη) που ονομάζεται *strain fringe* (θύσανοι παρυφών παραμόρφωσης). Οι δομές αυτές, ανάλογα με το εσωτερικό και εξωτερικό σχήμα που παρουσιάζουν, μας δίνουν πληροφορίες για την τεκτονική ροή και την παραμόρφωση αν και κυρίως χρησιμοποιούνται ως κινηματικοί δείκτες. Η παρουσία ινωδών συναθροισμάτων ορυκτών (θυσάνων) φανερώνει ότι η πίεση των ρευστών των πόρων ήταν σχετικά υψηλή και ότι η μετακίνηση των διαλυμάτων έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης.

Η διάλυση υπό πίεση είναι πολύ σημαντικός μηχανισμός για τη δημιουργία αυτών των δομών, αν και πρέπει να συνεκτιμάται και η πιθανότητα μεταβολής στον όγκο του πετρώματος. Η παρουσία εφελκυστικών ρωγμών (*tension gashes*) φανερώνει ότι οι διαφορικές τάσεις στο πέτρωμα ήταν σχετικά μικρές. Αν αυτές ήταν μεγάλες, η υψηλή πίεση των ρευστών των πόρων θα δημιουργούσε μάλλον διατμητικές διαρρήξεις παρά εφελκυστικές ρωγμές πληρωμένες με ινώδη ορυκτά. Το σχήμα που παρουσιάζουν οι σκιερές περιοχές και οι θύσανοι σε αυτές τις δομές μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορισθεί η φορά της διάτμησης αλλά και άλλες παράμετροι της παραμόρφωσης. Διακρίνονται σε *συνταγμένους θυσάνους παρυφών* (*syntaxial fringes*), *αντιταγμένους* (*antitaxial fringes*) και *πολύπλοκους* (*complex fringes*), ανάλογα με το αν η επιφάνεια ανάπτυξης βρίσκεται ανάμεσα στους θυσάνους και την κύρια μάζα του πετρώματος, ανάμεσα στους θυσάνους και το αντικείμενο πυρήνα, ή σε ενδιάμεση θέση, αντίστοιχα (Εικ. 6.7).

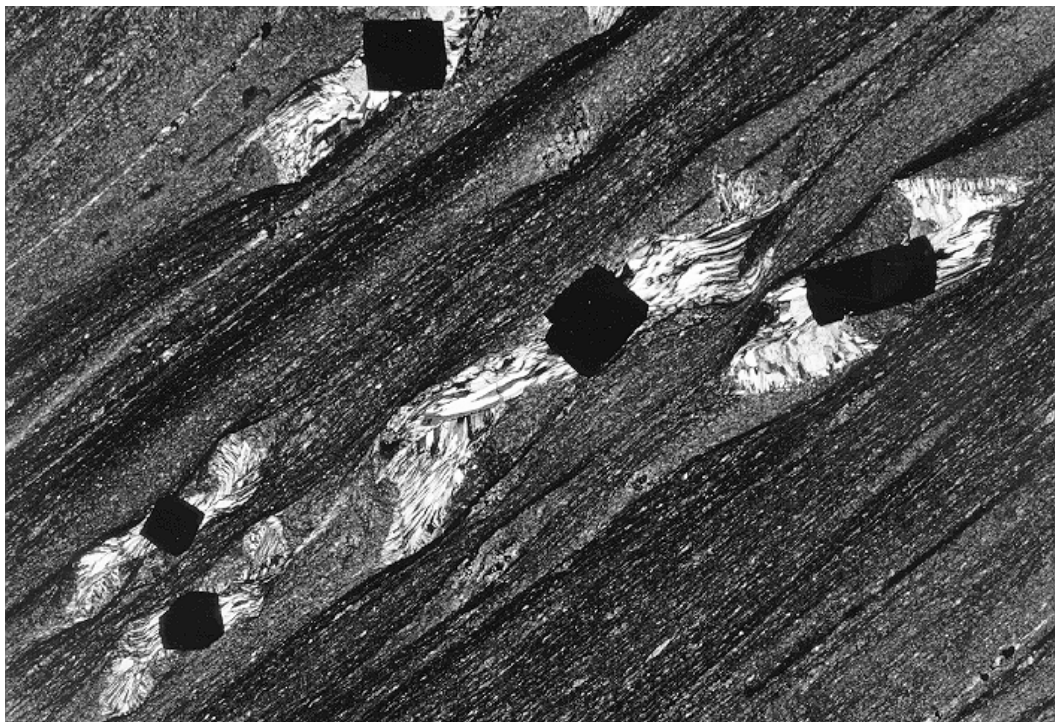
Στην Εικ. 6.8 παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τη γεωμετρία των θυσάνων που αναπτύσσονται σε απλή διάτμηση, σε σφαιρικής ή κυβικής μορφής πυρήνα.



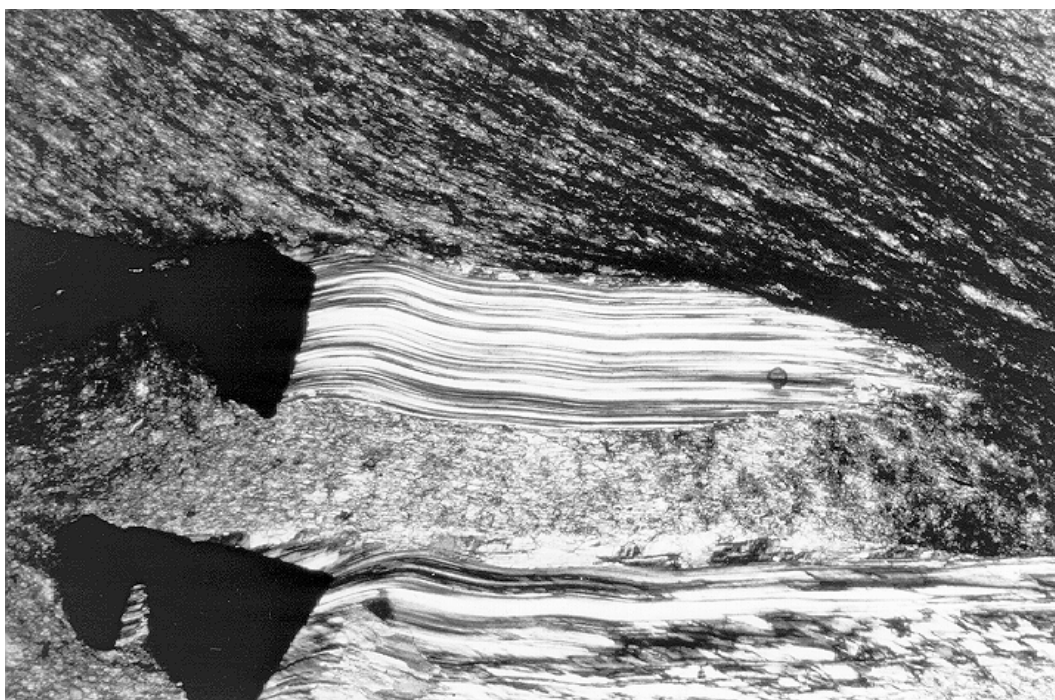
Εικ. 6.7. Σχηματική αναπαράσταση των τριών τύπων *strain fringes* που απαντώνται στη φύση.



Εικ. 6.8. Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τη γεωμετρία των θυσάνων που αναπτύσσονται σε απλή διάτμηση, σε σφαιρικής ή κυβικής μορφής πυρήνα.

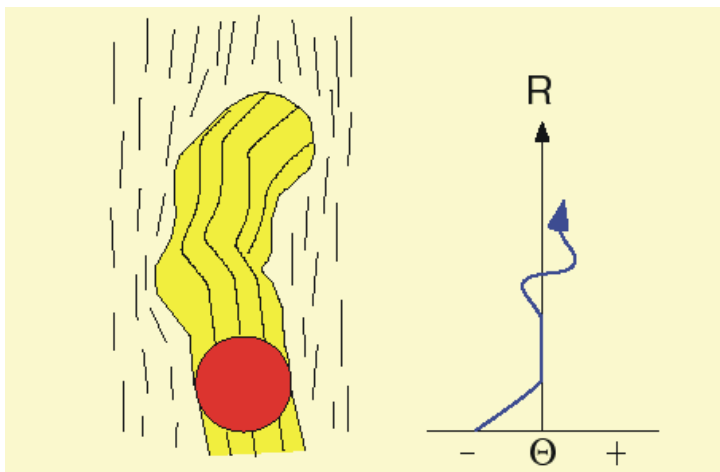


Εικ. 6.9. Θύσανοι χαλαζία και ασβεστίτη περιβάλλουν κόκκους σιδηροπυρίτη, σε ασβεστιτικό σχιστόλιθο. Η γεωμετρία τους φανερώνει μια αριστερόστροφη διάτμηση.



Εικ. 6.10. Θύσανοι παρυφών παραμόρφωσης από ινώδη χαλαζία που αναπτύσσονται εκατέρωθεν των κόκκων σιδηροπυρίτη.

Θύσανοι παρυφών με ίνες που παρουσιάζουν πολύπλοκο σχήμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση της εξέλιξης της παραμόρφωσης σε ένα πέτρωμα (Εικ. 6.11). Η γεωμετρία και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των ινωδών κρυστάλλων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή διαγραμμάτων που στον ένα άξονα περιλαμβάνουν το ρυθμό καταπόνησης (R) και στον άλλο τη γωνία Θ ανάμεσα στη φύλλωση και τον συναγόμενο εφελκυστικό στιγμιαίο άξονα έκτασης (*extensional ISA*).



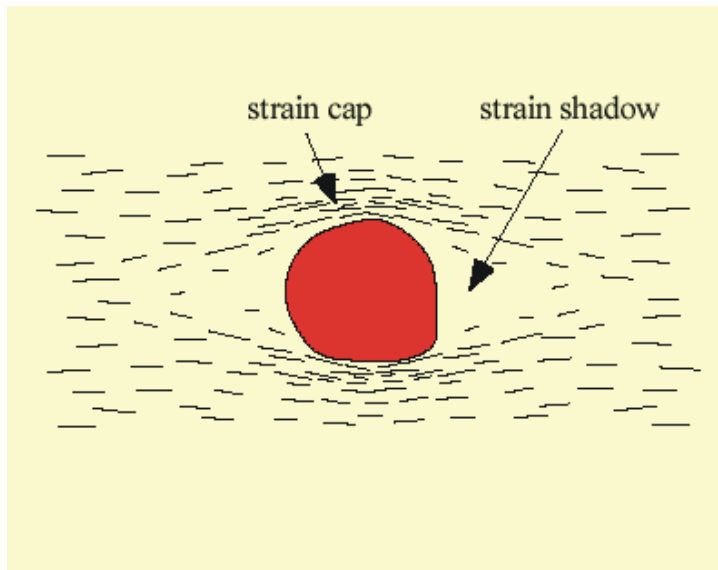
Εικ. 6.11. Η εξέλιξη της παραμόρφωσης όπως συμπεραίνεται από τη μελέτη του πολύπλοκου σχήματος των ινών που σχηματίζουν τους θυσάνους των παρυφών παραμόρφωσης (βλπ. κείμενο).

Συμπαγείς (και όχι ινώδεις) σκιές παραμόρφωσης (*strain shadows*) απαντώνται σε αρκετές περιπτώσεις και αντιπροσωπεύουν επιμηκυσμένα πεδία και από τις δύο πλευρές ενός αντικειμένου-πυρήνα. Ο ιστός τους είναι διαφορετικός από αυτόν της κύριας μάζας του πετρώματος και το όριο που τα διαχωρίζει είναι είτε σαφές και ευδιάκριτο, όπως στις ινώδεις σκιές, είτε, ως επί το πλείστον, προοδευτικό (Εικ. 6.12 & 6.14).

Οι σκιές παραμόρφωσης είναι συνήθως πλούσιες σε ευδιάλυτα ορυκτά, όπως ο χαλαζίας, τα ανθρακικά ορυκτά και ο χλωρίτης, σε αντίθεση με την κύρια φύλλωση που σχηματίζεται κυρίως από φυλλοπυριτικά ορυκτά. Αν μια τέτοια φύλλωση είναι παρούσα στην κύρια μάζα του πετρώματος, αυτή αναπτύσσεται υποτυπωδώς ή ελλείπει εντελώς από την περιοχή της σκιάς της παραμόρφωσης. Το σχήμα των συμπαγών σκιών παραμόρφωσης χρησιμοποιείται και στην περίπτωση αυτή για τον προσδιορισμό της φοράς διάτμησης.

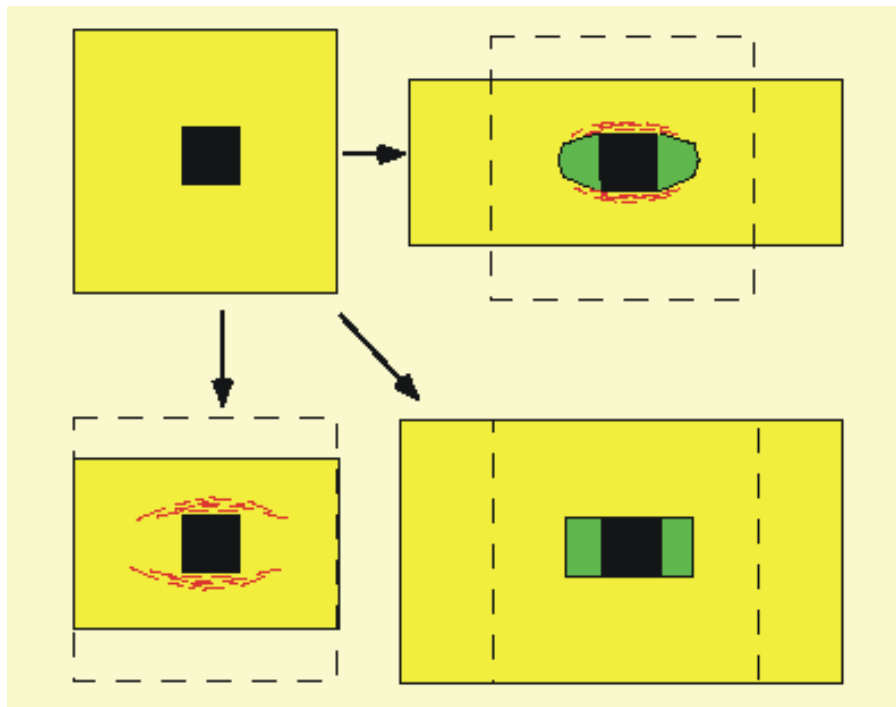
Στα πετρώματα που χαρακτηρίζονται από φύλλωση οι σκιές παραμόρφωσης και οι θύσανοι παρυφών παραμόρφωσης, συνήθως συνδέονται με αυτό που στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως *strain cap* (πηλίκιο? ή στέμμα? παραμόρφωσης) και το οποίο αντιπροσωπεύει (Εικ. 6.12) πεδία πλούσια σε μαρμαρυγίες ή δυσδιάλυτα ορυκτά όπου η κύρια φύλλωση αναπτύσσεται πολύ έντονα. Οι δομές αυτές αναπτύσσονται στις άλλες δύο πλευρές του αντικειμένου πυρήνα σε σχέση με αυτές της σκιάς της παραμόρφωσης.

Σημειώνεται ότι ο όρος *σκιά παραμόρφωσης* (*strain shadow*) υποδηλώνει ότι η καταπόνηση στην περιοχή της σκιάς είναι σχετικά μικρή, κάτι το οποίο δεν είναι απόλυτα σωστό. Στην πραγματικότητα οι σκιές και τα στέμματα παραμόρφωσης (*strain shadows & strain caps*) αποτελούν δομές όπου η κατανομή της παραμόρφωσης και η μεταβολή του όγκου γύρω από ένα αντικείμενο-πυρήνα είναι διαδικασίες σχετικά πολύπλοκες, η ακριβής φύση των οποίων είναι ακόμα άγνωστη.

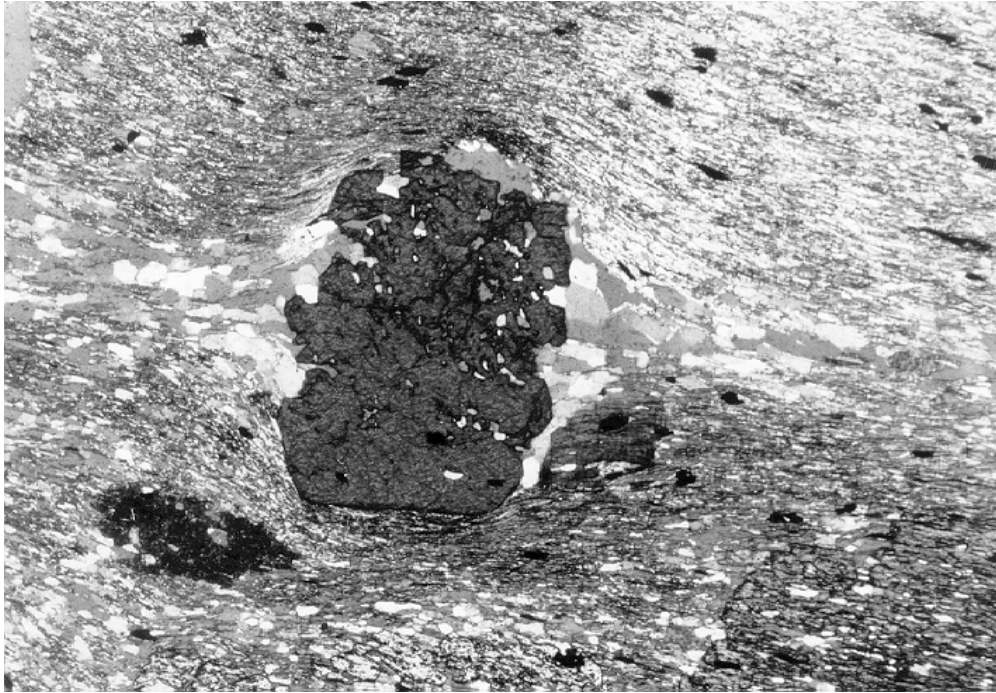


Εικ. 6.12. Η γεωμετρία των σκιών παραμόρφωσης (strain shadows) και των στεμμάτων παραμόρφωσης (strain caps) γύρω από ένα δύσκαμπτο αντικείμενο-πυρήνα (core object).

Οι συμπαγείς σκιές παραμόρφωσης μπορούν να δημιουργηθούν από την πλήρωση από μη ινώδη υλικά, από την ανακρυστάλλωση του ινώδους υλικού των παρυφών παραμόρφωσης ή από την ανακατανομή των φάσεων των ορυκτών σε αντίδραση στην μη-ομοιογενή παραμόρφωση γύρω από ένα αντικείμενο-πυρήνα. Στην Εικ. 6.13 παρουσιάζονται σχηματικά ορισμένα μοντέλα για την ανάπτυξη διαφορετικών τύπων σκιών παραμόρφωσης.



Εικ. 6.13. Σχηματική παρουσίαση της ανάπτυξης των τριών τύπων σκιών παραμόρφωσης, που εξαρτώνται από τη μεταβολή στην καταπόνηση και τον όγκο γύρω από το αντικείμενο-πυρήνα και σχηματικά δίνονται από την παραμόρφωση του τετραγώνου αναφοράς.



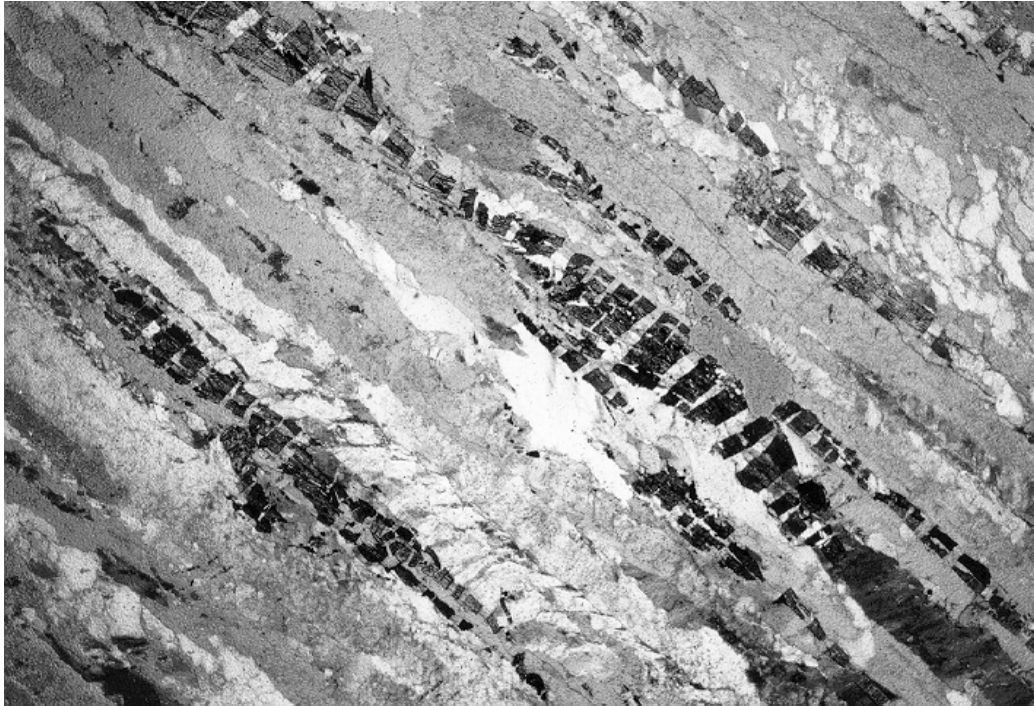
Εικ. 6.14. Μη ινώδεις (συμπαγείς) σκιές παραμόρφωσης, γύρω από ένα πορφυροβλάστη από γρανάτη σε μαρμαρυγιακό σχιστόλιθο. Η μετάβαση από το υλικό της σκιάς στο υλικό της κύριας φύλλωσης είναι προοδευτική. Στις αντίθετες πλευρές του κρυστάλλου παρατηρούνται τα στέμματα? (πηλίκια?) παραμόρφωσης (strain caps).

6.4 Μικρο-boudinage (Microboudinage)

Το *boudinage* (επιτυχής όρος στα ελληνικά δεν υφίσταται, πιθανώς το *δομές κόμβων* ή *κομβοποίηση* αποδίδουν κάπως τον όρο), που επηρεάζει επιμήκεις κρυστάλλους ορυκτών, σε κλίμακα λεπτής τομής, αναφέρεται συνήθως ως *microboudinage*. Οι δομές που αναπτύσσονται στις περιοχές εκλέπτυνσης ή απομάκρυνσης, ανάμεσα στα boudins, παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με αυτές στις φλέβες και στις σκιές παραμόρφωσης.

Το *microboudinage* μπορεί να βοηθήσει στην αποσαφήνιση των μεταμορφικών συνθηκών κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης, λαμβάνοντας υπόψη τα ορυκτολογικά αθροίσματα που αναπτύσσονται στις περιοχές εκλέπτυνσης ή απομάκρυνσης ανάμεσα στα boudins. Σε ορισμένες περιπτώσεις ορισμένα από αυτά τα ορυκτά παρουσιάζουν ζωνώδη δομή και βοηθούν να εντοπισθούν οι μεταβολές στις μεταμορφικές συνθήκες κατά την προοδευτική παραμόρφωση.

Το *microboudinage* μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και ως μέτρο της παραμόρφωσης. Αν το συνολικό μήκος του "μπουντιναρισμένου" κρυστάλλου διαιρεθεί με το άθροισμα των επιμέρους boudins παίρνουμε μια ελάχιστη τιμή για το ποσό της *έκτασης* (stretching) κατά μήκος του μεγάλου άξονα του κρυστάλλου. Ο άξονας αυτός δεν ταυτίζεται κατ' ανάγκη με τη διεύθυνση του μέγιστου άξονα εφελκυσμού. Είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιηθεί το μέγεθος των επιμέρους boudins για να γίνουν υπολογισμοί για τις *διαφορικές τάσεις* (differential stress).



Εικ. 6.15. *Microboudinage* σε κρυστάλλους τουρμαλίνη σε χαλαζίτες. Το φαινόμενο του *boudinage* έχει συμβεί τόσο εγκάρσια όσο και παράλληλα στους επιμήκεις κρυστάλλους τουρμαλίνη (δομή γνωστή με το όνομα *chocolate tablet boudinage*). Το υλικό πλήρωσης των ανοιγμάτων ανάμεσα στα *boudins* είναι χαλαζίας, ο οποίος έχει παραμορφωθεί ξανά όπως φανερώνει η κυματοειδής κατάσβεση που παρουσιάζει.

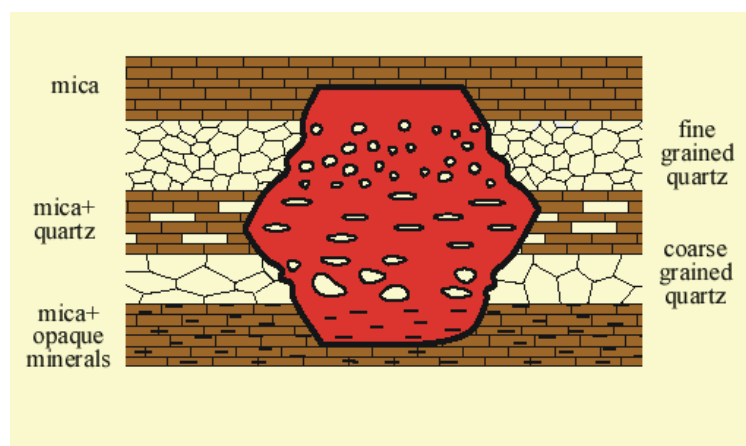
6.5 Πορφυροβλάστες (Porphyroblasts)

Ένα πέτρωμα που παραμορφώνεται και μεταμορφώνεται υφίσταται διαρκείς μεταβολές στην ορυκτολογική του σύσταση αλλά και στον τεκτονικό ιστό του. Σχετικά μεγάλου μεγέθους κρύσταλλοι που αναπτύσσονται σε μια μικροκρυσταλλική κύρια μάζα είναι γνωστοί με το όνομα *πορφυροβλάστες* (*porphyroblasts*).

Οι δομές αυτές αποτελούν πηγή πληροφοριών για τις συνθήκες παραμόρφωσης και μεταμόρφωσης. Συνήθως περικλείουν εγκλείσματα, το σχήμα των οποίων μιμείται τον ιστό και τη δομή του πετρώματος (Εικ. 6.16), και τα οποία επιτρέπουν τον σχετικό χρονικό προσδιορισμό της ανάπτυξης των διαφόρων ορυκτών και άρα και των συνθηκών μεταμόρφωσης και παραμόρφωσης.

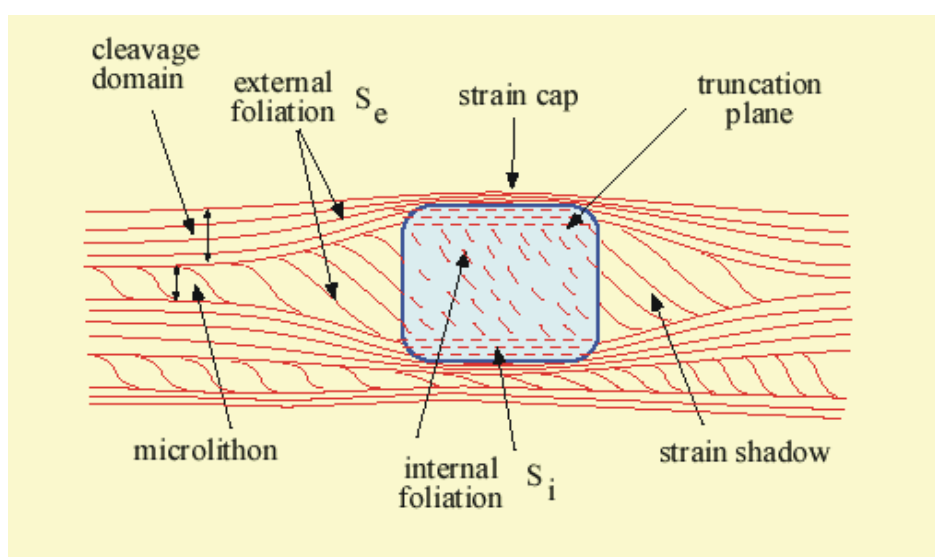
Στην Εικ. 6.17 παρουσιάζεται η συνήθως χρησιμοποιούμενη ορολογία για τους πορφυροβλάστες. Η εσωτερική δομή των προσανατολισμένων εγκλεισμάτων αντιπροσωπεύει την εσωτερική φύλλωση *Si* (από το *S internal* – εσωτερική φύλλωση *S*), οι εξωτερικές φυλλώσεις που περιβάλλουν τον πορφυροβλάστη *Se* (από το *S external* – εξωτερική φύλλωση *S*). Από τις εξωτερικές φυλλώσεις φυσικά η νεότερη θα αντιπροσωπεύει το πεδίο του σχισμού (*cleavage domain*) και η παλαιότερη το *μικρολιθώνα* (*microlithon*). Οι σκιές παραμόρφωσης (*strain shadows*) αναπτύσσονται εκατέρωθεν των πλευρών του πορφυροβλάστη που

είναι περίπου εγκάρσιες στην εξωτερική σχιστότητα S_e και τα στέμματα? παραμόρφωσης (*strain cap*) στις αντίθετες πλευρές όπου η S_e είναι πολύ πιο έντονη. Το επίπεδο "ακρωτηριασμού" (*truncation plane*) αντιπροσωπεύει την επιφάνεια εκείνη μέσα στον πορφυροβλάστη όπου ένα πρότυπο εγκλεισμάτων με συγκεκριμένο προσανατολισμό διακόπτεται και "ακρωτηριάζεται" από ένα άλλο με διαφορετικό προσανατολισμό.



Εικ. 6.16. Εγκλείσματα σε πορφυροβλάστη (Al-πυριτικός πορφυροβλάστης σε κύρια μάζα πλούσια σε μαρμαρυγίες), που μιμούνται τον προσανατολισμό και τη δομή του υπόλοιπου πετρώματος.

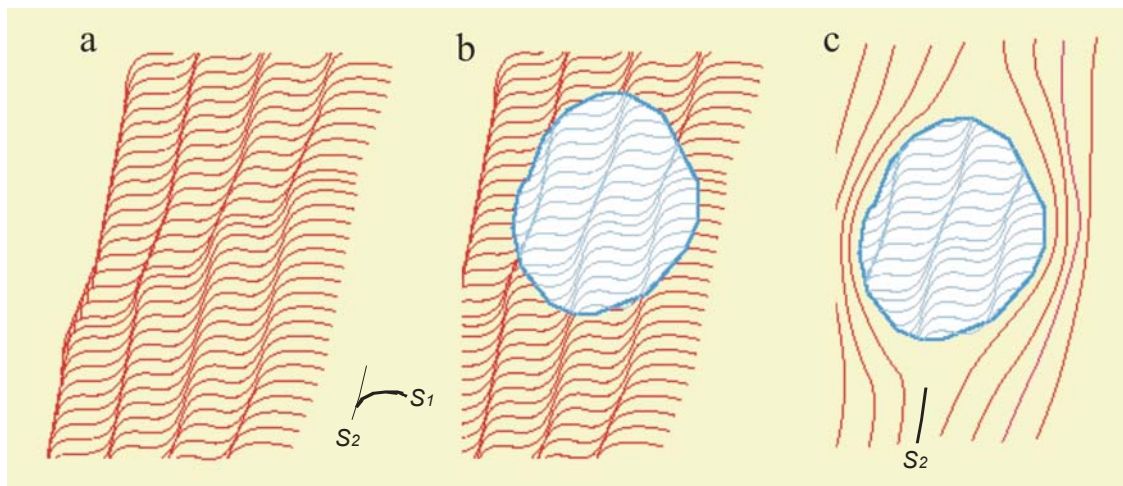
Οι πορφυροβλάστες δεν είναι συνήθεις σε όλους τους τύπους των πετρωμάτων και σε όλες τις συνθήκες μεταμόρφωσης. Οι πιο συνήθεις είναι οι Al – πυριτικοί πορφυροβλάστες, όπως ο γρανάτης, ο βιοτίτης, ο σταυρόλιθος, ο χλωριτοειδής, ο ανδαλουσίτης κλπ. και αναπτύσσονται σε μεταπηλίτες που έχουν μεταμορφωθεί σε συνθήκες της άνω-πρασινοσχιστολιθικής έως αμφιβολιτικής φάσης. Ο γρανάτης, τα πλαγιόκλαστα, το επίδοτο και η κεροστίλβη σχηματίζουν εντυπωσιακούς πορφυροβλάστες στα μετα-βασικά πετρώματα.



Εικ. 6.17. Η συνήθως χρησιμοποιούμενη ορολογία στους πορφυροβλάστες.

Εκτός από τα εγκλείσματα που συνήθως περικλείουν, οι πορφυροβλάστες καταγράφουν τη μεταμορφική εξέλιξη από τον πυρήνα το μέχρι το όριό τους. Συνήθως είτε αναπτύσσεται μια ζώνωση κατά τη σταδιακή ανάπτυξή τους, είτε εγκλείσματα από διάφορα ορυκτά φανερώνουν P – T συνθήκες διαφορετικές από αυτές της κύριας μάζας.

Τα εγκλείσματα στους πορφυροβλάστες είναι συνήθη σε χαμηλού έως μέσου βαθμού μεταμόρφωσης πετρώματα και αντιπροσωπεύουν ορυκτά του πετρώματος που δεν συμμετέχουν στις αντιδράσεις για τη δημιουργία του πορφυροβλάστη, δεν μπορούν να απομακρυνθούν και εγκλείονται από τον πορφυροβλάστη σαν *παθητικά εγκλείσματα* (*passive inclusions*). Αν το πέτρωμα παρουσιάζει μια στρωμάτωση λόγω διαφορών στη σύσταση (*compositional layering*) ή ένα προτιμητέο προσανατολισμό των ορυκτών, αυτός ο ιστός μπορεί να παραμείνει αναλλοίωτος όταν τα ορυκτά εγκλείονται στον πορφυροβλάστη και έτσι προκύπτει ένα πρότυπο εγκλεισμάτων που μιμείται τον αρχικό ιστό. Με αυτό τον τρόπο ίχνη από μια ευθύγραμμη φύλλωση, αλλά και πιο πολύπλοκες δομές, όπως πτυχές ή πτυχοσχισμός, μπορούν να περικλείονται σε ένα πορφυροβλάστη.



Εικ. 6.18. Συχνά στους πορφυροβλάστες εγκλείονται παλαιότερες δομές από την τεκτονική εξέλιξη του πετρώματος (βλπ. κείμενο).

Στις Εικ. 6.18 και 6.19 παρουσιάζεται ένα τέτοιο παράδειγμα. Στην Εικ. 6.18a ένας πτυχοσχισμός S_2 αναπτύσσεται και επικαλύπτει μια παλαιότερη φύλλωση S_1 . Στην Εικ. 6.18b ένας πορφυροβλάστης αναπτύσσεται και το πρότυπο των εγκλεισμάτων μιμείται τον ιστό του πετρώματος. Στην Εικ. 6.18c η παραμόρφωση συνεχίζεται, πιθανά συνοδεύεται από ανακρυστάλλωση και ανάπτυξη ορυκτών, με αποτέλεσμα να καταστραφεί ο πτυχοσχισμός στην κύρια μάζα του πετρώματος και να αναπτυχθεί μια περισσότερο ή λιγότερο συνεχής φύλλωση S_2 . Δεν έχει απομείνει καμία δομή, εκτός από το πρότυπο των εγκλεισμάτων στον πορφυροβλάστη, που να καταγράφει την τεκτονική εξέλιξη του πετρώματος. Η Εικ. 6.19 αντιπροσωπεύει δομές τέτοιου τύπου, όπως αναγνωρίζονται στο μικροσκόπιο.

Αδιαφανή ορυκτά και χαλαζίας είναι τα πλέον συνήθη εγκλείσματα σε πορφυροβλάστες, αλλά και ζirkόνιο, μονασίτης, απατίτης, ρουτίλιο, σφήνα και ορυκτά της οικογένειας των επιδότων είναι επίσης συχνά. Εγκλείσματα μαρμαρυγιών είναι σπάνια αλλά παρατηρούνται σε ορισμένους Al-πυριτικούς πορφυροβλάστες.

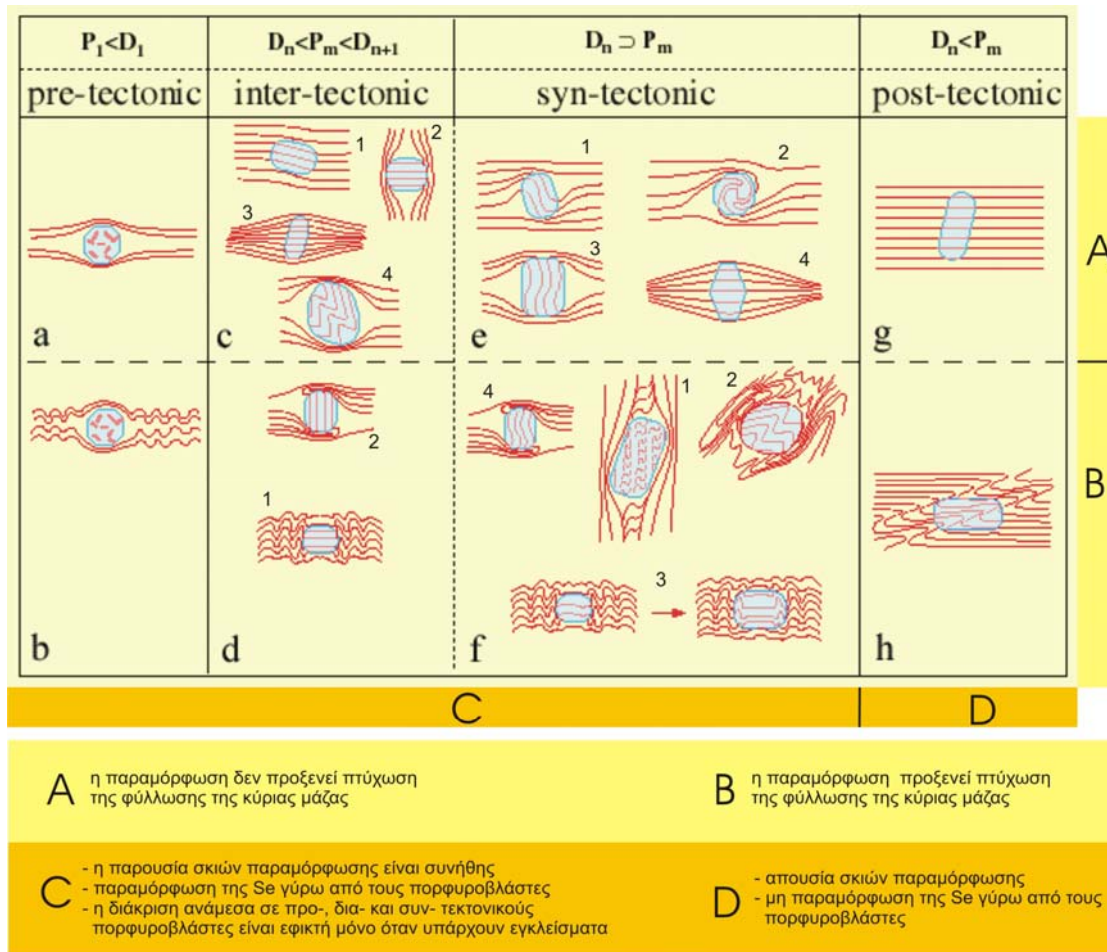


Εικ. 6.19. Πορφυροβλάστης σταυρολίθου σε μαρμαρυγιακό σχιστόλιθο που το πρότυπο των εγκλεισμάτων του έχει μιμηθεί ένα παλαιότερο πτυχοσχισμό (βλπ. κείμενο).

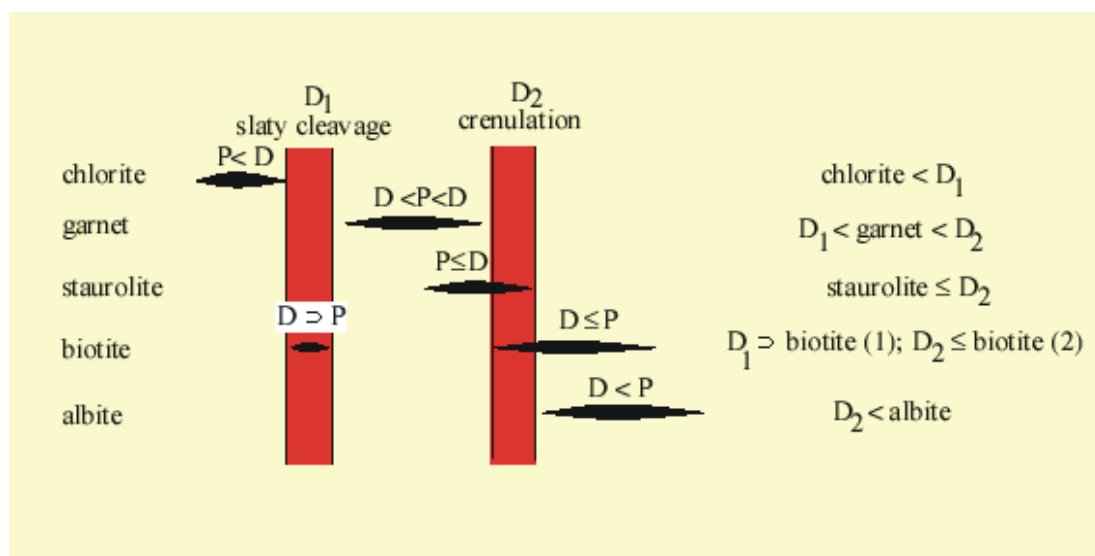
Μικροτεκτονικές έρευνες σε πορφυροβλάστες έχουν αποδείξει ότι τα εγκλείσματα περι-κλείονται στον πορφυροβλάστη με ένα παθητικό τρόπο και δεν μετακινούνται από την ανάπτυξή του. Επίσης οι εκτροπές της φύλλωσης (deflection of foliation) γύρω από τον πορφυροβλάστη είναι το αποτέλεσμα της παραμόρφωσης της κύριας μάζας γύρω από ένα δύσκαμπτο προϋπάρχον αντικείμενο και όχι, όπως παλαιότερα θεωρείτο, το αποτέλεσμα της μηχανικής μετακίνησης της φύλλωσης από την ανάπτυξη του πορφυροβλάστη. Σε σπάνιες μόνο περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί μετακίνηση γραφίτη και λευκού μαρμαρυγία από την ανάπτυξη πορφυροβλαστών.

Όπως προαναφέρθηκε οι πορφυροβλάστες που περικλείουν ένα πρότυπο εγκλεισμάτων δίνουν πολλές πληροφορίες για την παραμόρφωση και τα μεταμορφικά γεγονότα των παλαιότερων σταδίων εξέλιξης του πετρώματος, καθώς και για τη σχετική ηλικία ανάπτυξης των ορυκτών σε σχέση με την παραμόρφωση. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι όροι *προ-*, *συν-*, *δια-* και *μετα-τεκτονικά ορυκτά* (*pre-*, *syn-*, *inter-* και *post-tectonic*), που περιγράφουν τη χρονική σχέση ανάμεσα στην ανάπτυξη του πορφυροβλάστη και μιας ή δύο συγκεκριμένων φάσεων παραμόρφωσης, που, στην κύρια μάζα του πετρώματος που περιβάλλει τον πορφυροβλάστη, αντιπροσωπεύονται από μία φύλλωση ή πτύχωση (Εικ. 6.20 και 6.21).

Συνήθως χρησιμοποιούνται ειδικά σύμβολα για να δείξουν τη χρονική συσχέτιση ανάμεσα στην παραμόρφωση και τη μεταμόρφωση (βλπ. Εικ. 6.20 και 6.21), η ερμηνεία των οποίων δίνεται στην Εικ. 6.22.



Εικ. 6.20. Σχηματική αναπαράσταση προ-, δια-, συν- και μετα- τεκτονικών πορφυροβλαστών (βλπ. κείμενο). Επεξήγηση συμβόλων στον Πίνακα της Εικ. 6.22.



Εικ. 6.21. Παράδειγμα διαγράμματος σχετικής ηλικίας πορφυροβλαστών (βλπ. κείμενο). Επεξήγηση συμβόλων στον Πίνακα της Εικ. 6.22.

ΤΑ ΣΥΝΗΘΩΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΣΥΜΒΟΛΑ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟΥΣ ΠΟΡΦΥΡΟΒΛΑΣΤΕΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΥΡΙΑ ΜΑΖΑ ΠΟΥ ΤΟΥΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΕΙ	
Μετα-τεκτονική ανάπτυξη ορυκτού P σε σχέση με τη φάση παραμόρφωσης D_n	$D_n < P$
Προ-τεκτονική ανάπτυξη ορυκτού P σε σχέση με τη φάση παραμόρφωσης D_1	$P < D_1$
Συν-τεκτονική ανάπτυξη ορυκτού P σε σχέση με τη φάση παραμόρφωσης D_n	$D_n \supset P$
Συν- έως μετα-τεκτονική ανάπτυξη ορυκτού P σε σχέση με τη φάση παραμόρφωσης D_n	$D_n \leq P$
Δια-τεκτονική ανάπτυξη ορυκτού P ανάμεσα στις φάσεις παραμόρφωσης D_n και D_{n+1}	$D_n < P < D_{n+1}$
Ανάπτυξη του ορυκτού P μετα-τεκτονικά της D_n και προ- έως συν-τεκτονικά της D_{n+1}	$D_n < P \leq D_{n+1}$

Εικ. 6.22. Πίνακας με την ορολογία και τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται για τη χρονική συσχέτιση ανάμεσα στους πορφυροβλάστες και την κύρια μάζα που τους περιβάλλει.

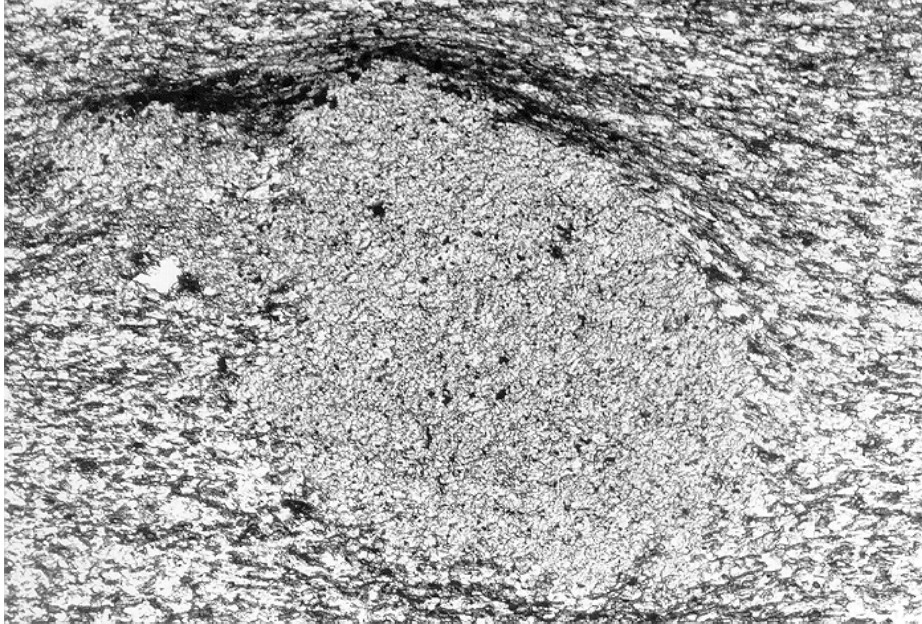
Στην Εικ. 6.20 το πάνω τμήμα του διαγράμματος (τμήμα Α) αναφέρεται στην παραμόρφωση που προκαλείται είτε σε μονή φύλλωση είτε σε μια παλαιότερη φύλλωση, χωρίς πτύχωση. Το κάτω τμήμα (τμήμα Β) αναφέρεται στην παραμόρφωση που οδηγεί σε μικροπτύχωση μιας παλαιότερης φύλλωσης. Οι προ-τεκτονικοί πορφυροβλάστες (Εικ. 6.20a&b) χαρακτηρίζονται από ισχυρή εκτροπή της φύλλωσης γύρω από τον πορφυροβλάστη καθώς και από τυχαία προσανατολισμένα εγκλείσματα.

Οι δια-τεκτονικοί πορφυροβλάστες (Εικ. 6.20c&d) αναπτύσσονται παθητικά πάνω από έναν ιστό, όταν έχει σταματήσει η παραμόρφωση και διατηρούν το προκύπτον πρότυπο των εγκλεισμάτων σε μια μεταγενέστερη παραμόρφωση. Ο προσανατολισμός των εγκλεισμάτων είναι συνήθως ευθύγραμμος, αλλά δεν αποκλείονται και πιο σύνθετες δομές. Δομές όπως των Εικ. 6.20c-2 και 6.20e-3, όπου η Se αποκλίνει σε αντίθετες κατευθύνσεις, είναι γνωστές με το όνομα *millipede structures* (βλπ. και Εικ. 6.26).

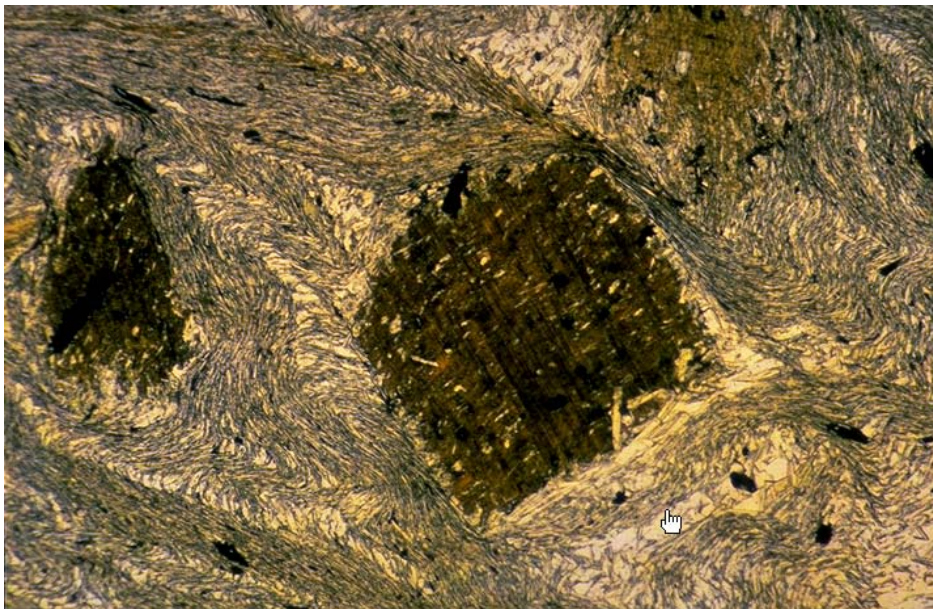
Οι συν-τεκτονικοί πορφυροβλάστες (Εικ. 6.20e&f) έχουν αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια μιας φάσης παραμόρφωσης. Τα εγκλείσματα παρουσιάζουν συνήθως ένα πρότυπο με καμπύλα σχήματα, που βρίσκεται σε συνέχεια με τον τεκτονικό ιστό έξω από τον πορφυροβλάστη και συνήθως δίνουν ενδείξεις ότι έχουν τροποποιηθεί κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής τους. Δομές όπως των Εικ. 6.20d-2 και 6.20f-4 είναι γνωστές με το όνομα *πτυχές εκτροπής?* (*deflection-fold structure*) (βλπ. και Εικ. 6.26). Η διάκριση των συν- και δια-τεκτονικών πορφυροβλαστών είναι συνήθως δύσκολη καθόσον και μεταβάσεις συμβαίνουν και οι διαφορές είναι δυσδιάκριτες (π.χ. οι δομές c-1 & e-1, c-3 & e-4, c-4 & f-1 της Εικ. 6.20).

Οι μετα-τεκτονικοί πορφυροβλάστες (Εικ. 6.20g&h) έχουν αναπτυχθεί μετά την παύση της παραμόρφωσης. Το πρότυπο των εγκλεισμάτων είναι πανομοιότυπο και σε συνέχεια με

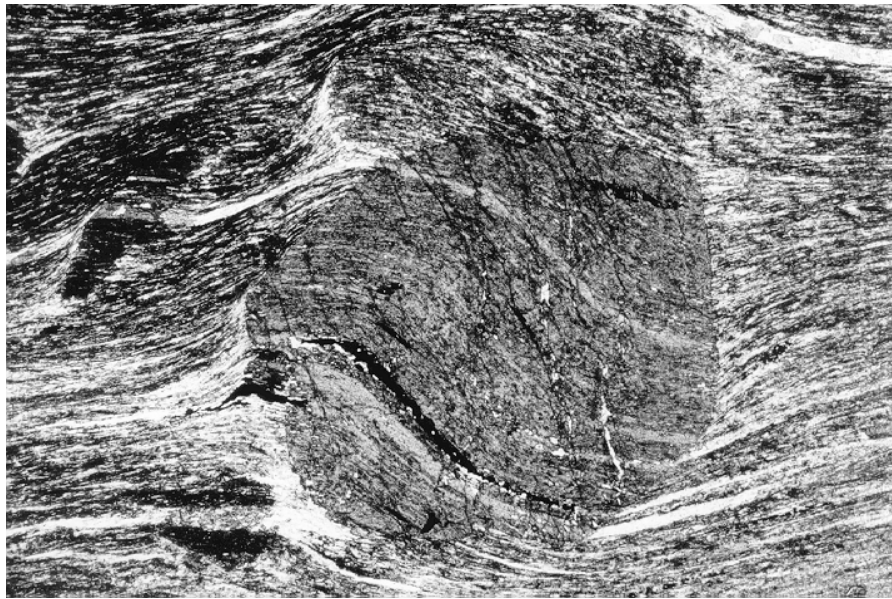
τον εξωτερικό ιστό. Στην περίπτωση αυτή δεν αναπτύσσονται σκιές και στέμματα? της παραμόρφωσης (strain shadows and strain caps), αλλά ούτε και παρατηρείται εκτροπή της φύλλωσης γύρω από τον πορφυροβλάστη.



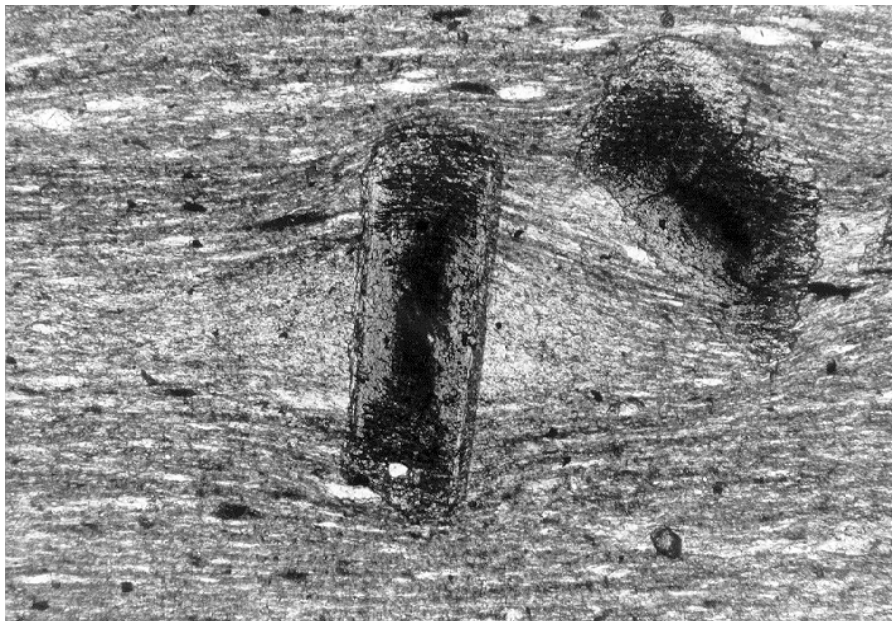
Εικ. 6.23. Προ-τεκτονικός πορφυροβλάστης κορδιερίτη σε κορδιεριτικό-μαρμαρυγιακό σχιστόλιθο. Τα εγκλείσματα έχουν τυχαίο προσανατολισμό και η παρατηρούμενη S_1 , που εκτρέπεται γύρω από τον πορφυροβλάστη δημιουργήθηκε από μεταγενέστερη παραμόρφωση.



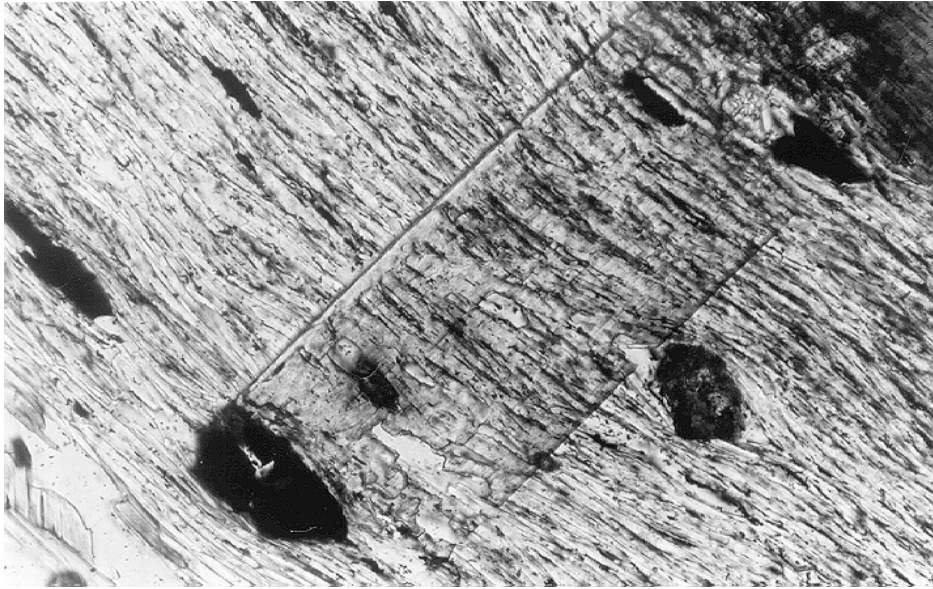
Εικ. 6.24. Δια-τεκτονικός πορφυροβλάστης βιοτίτη σε βιοτιτικό φυλλίτη. Η S_1 (= S_1) παρουσιάζεται ευθύγραμμη και ο πορφυροβλάστης περιβάλλεται από ένα πτυχοσχισμό S_2 . Αναπτύχθηκε μετά την D_1 (το πρότυπο της οποίας ακολούθησαν τα εγκλείσματά του) και πριν την D_2 .



Εικ. 6.25. Συν-τεκτονικός πορφυροβλάστης γρανάτη σε γρανατιτικό-κυανιτικό σχιστόλιθο, που φανερώνει δεξιόστροφη περιστροφή κατά την ανάπτυξή του. Η Si και η Se βρίσκονται σε συνέχεια και η Se εκτρέπεται γύρω από τον πορφυροβλάστη. Μικρή ανάπτυξη σκιάς παραμόρφωσης εντοπίζεται κάτω-αριστερά.



Εικ. 6.26. Συν-τεκτονικός κρύσταλλος χλωριτοειδή. Η γεωμετρία των εγκλεισμάτων δείχνει καμπύλη μορφή που είναι συνεχόμενη με την εξωτερική φύλλωση και φανερώνει την ταυτόχρονη ανάπτυξη του κρυστάλλου με την μία μόνο φάση παραμόρφωσης που αναγνωρίζεται. Εξάιρεση αποτελεί το κεντρικό τμήμα του κρυστάλλου, όπου η απουσία εγκλεισμάτων αλλά και η απουσία σχισμού στις διπλανές σκιές παραμόρφωσης, φανερώνουν ότι ο πυρήνας του είναι προ-τεκτονικός.



Εικ. 6.27. Μετα-τεκτονικός πορφυροβλάστης χλωρίτη. Η φύλλωση είναι συνεχόμενη εσωτερικά και εξωτερικά του πορφυροβλάστη, η γεωμετρία της δεν εκτρέπεται όταν περιβάλλει τον κρύσταλλο και δεν παρατηρούνται σκιές παραμόρφωσης.

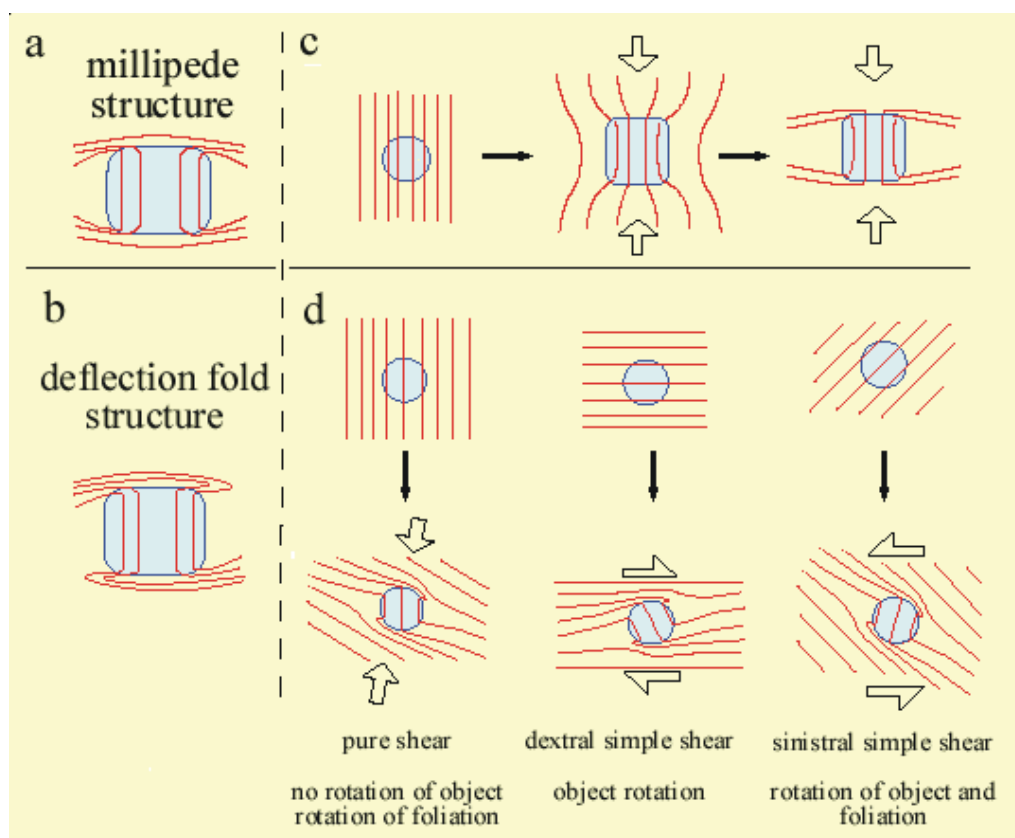
Στην Εικ. 6.21 δίνεται ένα παράδειγμα διαγράμματος σχετικής ηλικίας, όπως αυτό έχει προκύψει από την εξέταση λεπτής τομής σε μαρμαρυγιακό σχιστόλιθο. Ο χλωρίτης είναι προ-τεκτονικός της D_1 . Ο γρανάτης είναι δια-τεκτονικός, ανάμεσα στην D_1 και D_2 . Ο σταυρόλιθος είναι προ- έως συν-τεκτονικός της D_2 . Ο βιοτίτης έχει δύο φάσεις ανάπτυξης, μία συν-τεκτονική της D_1 και μία συν- έως μετα-τεκτονική της D_2 . Ο αλβίτης είναι μετα-τεκτονικός της D_2 .

Στην Εικ. 6.28 δίνονται ορισμένα στοιχεία για τις δομές *millipede* και *deflection-fold structure*, που είναι συχνές σε ορισμένους δια- και συν-τεκτονικούς πορφυροβλάστες. Και οι δύο περιπτώσεις είναι το αποτέλεσμα της απόκλισης της φύλλωσης S_e γύρω από ένα δύσκαμπτο πορφυροβλάστη. Στην πρώτη περίπτωση η απόκλιση γίνεται προς αντίθετες κατευθύνσεις και στη δεύτερη με ισοκλινή πτύχωση. Στην Εικ. 6.28c παρουσιάζεται η ανάπτυξη *millipede structure* από ομοαξονική επιπέδωση? (έκταση?) (*coaxial flattening*) και στην Εικ. 6.28d τρεις εναλλακτικοί τρόποι ανάπτυξης πτυχών εκτροπής (*deflection-fold structures*).

Σημειώνεται επίσης ότι στη βιβλιογραφία αναφέρονται πολλές περιπτώσεις "προβληματικών" δομών με πορφυροβλάστες, που αποκλίνουν από την εικόνα που δόθηκε μέχρι τώρα, όπως:

i) *Πορφυροβλάστες χωρίς εγκλείσματα*. Η απουσία εγκλεισμάτων στους πορφυροβλάστες κάνει δύσκολη έως αδύνατη τη χρονολόγηση της ανάπτυξής τους σε σχέση με την παραμόρφωση. Η σχετική ηλικία μπορεί μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις να προσδιορισθεί (και αυτό με μεγάλη επιφύλαξη) από την πυκνότητα της απόκλισης της S_e και από την παρουσία σκιών παραμόρφωσης (Εικ. 6.29). Μόνο η διάκριση των μετα-τεκτονικών πορφυροβλαστών είναι σχετικά εύκολη. Η διάκριση των υπολοίπων κατηγοριών είναι αδύνατη, αλ-

λά μπορούν να διακριθούν από τους μετα-τεκτονικούς από την παρουσία δομών εσωτερικής παραμόρφωσης, όπως η κυματοειδής κατάσβεση.

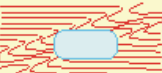


Εικ. 6.28. Δομές millipede και deflection-fold structure (πτυχές εκτροπής?), που είναι συχνές σε δια- και μετα-τεκτονικούς πορφυροβλάστες, και οι τρόποι δημιουργίας τους.

ii) Σχήμα και μέγεθος εγκλεισμάτων και κόκκων κύριας μάζας. Όταν ο πορφυροβλάστης περικλείει έναν ιστό ο οποίος δεν παραμορφώνεται στη συνέχεια, το σχήμα και το μέγεθος των εγκλεισμάτων διαφέρει ελάχιστα από αυτό των κόκκων της κύριας μάζας. Σε περίπτωση όμως που ακολουθήσει στατική ή δυναμική ανακρυστάλλωση οι κόκκοι της κύριας μάζας θα γίνουν μεγαλύτεροι ή μικρότεροι αντίστοιχα (Εικ. 6.30).

iii) Ψεύδο-εγκλείσματα. Ορισμένες δομές σε πορφυροβλάστες θυμίζουν πρότυπα παθητικών εγκλεισμάτων, έχουν όμως σχηματισθεί με διαφορετικό τρόπο. Π.χ. οι ινώδεις κρυσταλλοί ρουτιλίου σε βιοτίτη που συνήθως δεν έχουν σαφή προτιμητέο προσανατολισμό, ή εξαλλοιώσεις και απομίξεις (exsolution) κατά μήκος συγκεκριμένων κρυσταλλογραφικών αξόνων, αποτελούν δομές που δύσκολα διακρίνονται από τα εγκλείσματα. Στις περιπτώσεις αυτές η σύσταση και ο προσανατολισμός μόνο παράλληλα με συγκεκριμένους κρυσταλλογραφικούς άξονες αποτελούν ενδείξεις για τη διάκριση από τα παθητικά εγκλείσματα.

iv) Μιμητική ανάπτυξη. Σε ορισμένες περιπτώσεις πορφυροβλάστες από ένα ορυκτό μπορεί να αντικατασταθούν από ένα άλλο το οποίο μιμείται το πρότυπο των εγκλεισμάτων αλλά και τις αποκλίσεις της φύλλωσης γύρω από τον πορφυροβλάστη.

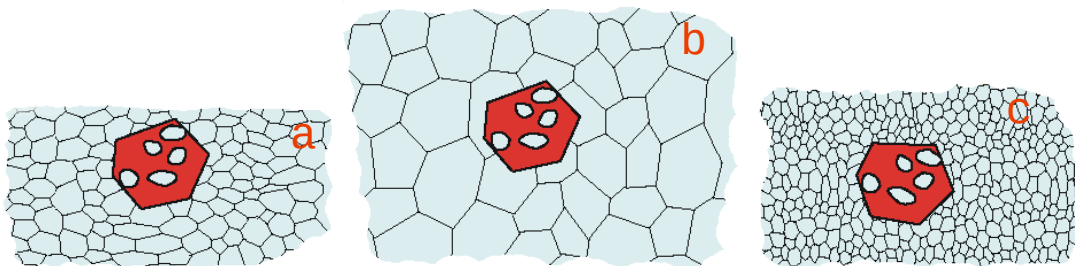
Κυματοειδής κατάσβεση στους πορφυροβλάστες πιθανή			Κυματοειδής κατάσβεση στους πορφυροβλάστες μη πιθανή	
$P_1 < D_1$	or	$D_n < P_m < D_{n+1}$	or	$D_n > P_m$
pre-tectonic or intertectonic			or	syn-tectonic
porphyroblasts			post-tectonic	
				
a				
mica-porphyroblasts				
b				d

Εικ. 6.29. Σχηματική αναπαράσταση ανάπτυξης πορφυροβλαστών που χαρακτηρίζονται από την έλλειψη εγκλεισμάτων.

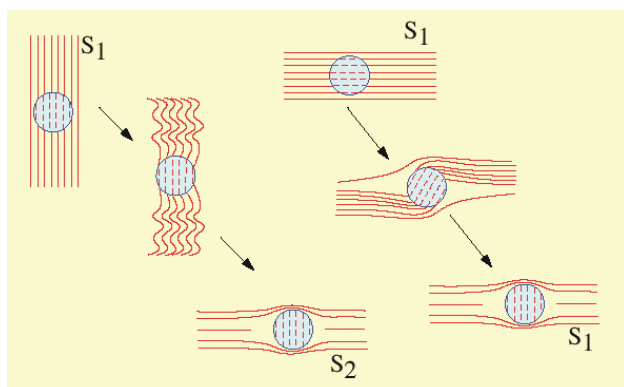
ν) Παραμορφωμένοι πορφυροβλάστες. Οι σχέσεις που παρουσιάστηκαν στην Εικ. 6.20 αναγνωρίζονται ακόμα και αν οι πορφυροβλάστες παρουσιάζουν ενδείξεις ενδοκρυσταλλικής παραμόρφωσης όπως κυματοειδής κατάσβεση, σχηματισμός υποκόκκων και μικρο-boudinage.

vi) Μη προσδιορίσιμη σχετική ηλικία εγκλεισμάτων και πορφυροβλάστη. Στις περισσότερες περιπτώσεις που αφορούν παθητικά εγκλείσματα είναι δυνατόν να προσδιορισθεί η σχετική ηλικία παραμόρφωσης και ανάπτυξης του πορφυροβλάστη, χρειάζεται όμως προσοχή στις περιπτώσεις εκείνες που είναι δύσκολο να προσδιορισθεί η σχετική ηλικία ανάπτυξης ανάμεσα στα εγκλείσματα και τον πορφυροβλάστη που τα φιλοξενεί.

vi) Μη συνεχείς Se και Si. Στις περιπτώσεις που οι Se και Si δεν είναι συνεχόμενες, πρέπει να υπάρχει παραμόρφωση μεταγενέστερη της ανάπτυξης του πορφυροβλάστη. Δεν πρέπει βέβαια να ταυτίζεται σε κάθε περίπτωση η Si με μια παλαιότερη παραμόρφωση, δεδομένου ότι μπορεί αυτή να αντιπροσωπεύει ένα παλαιότερο στάδιο στην προοδευτική ανάπτυξη της Se (Εικ. 6.31).

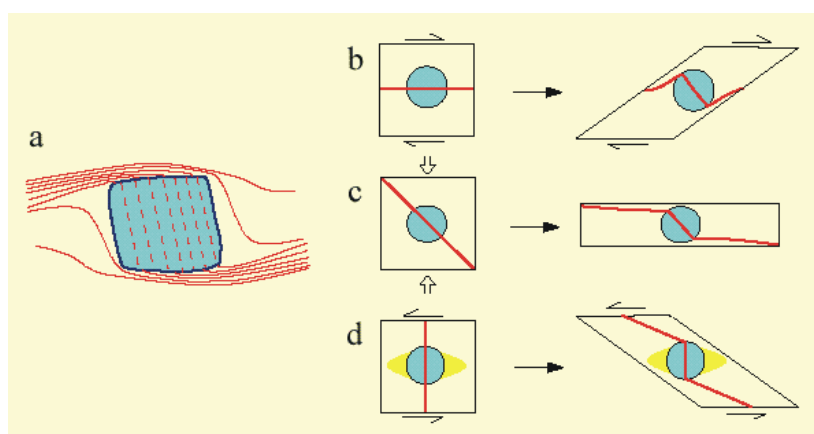


Εικ. 6.30. Διαφορές στο μέγεθος και το σχήμα των εγκλεισμάτων και των ορυκτών της κύριας μάζας μπορεί να προκύψουν σε περίπτωση στατικής (b) ή δυναμικής (c) ανακρυστάλλωσης.



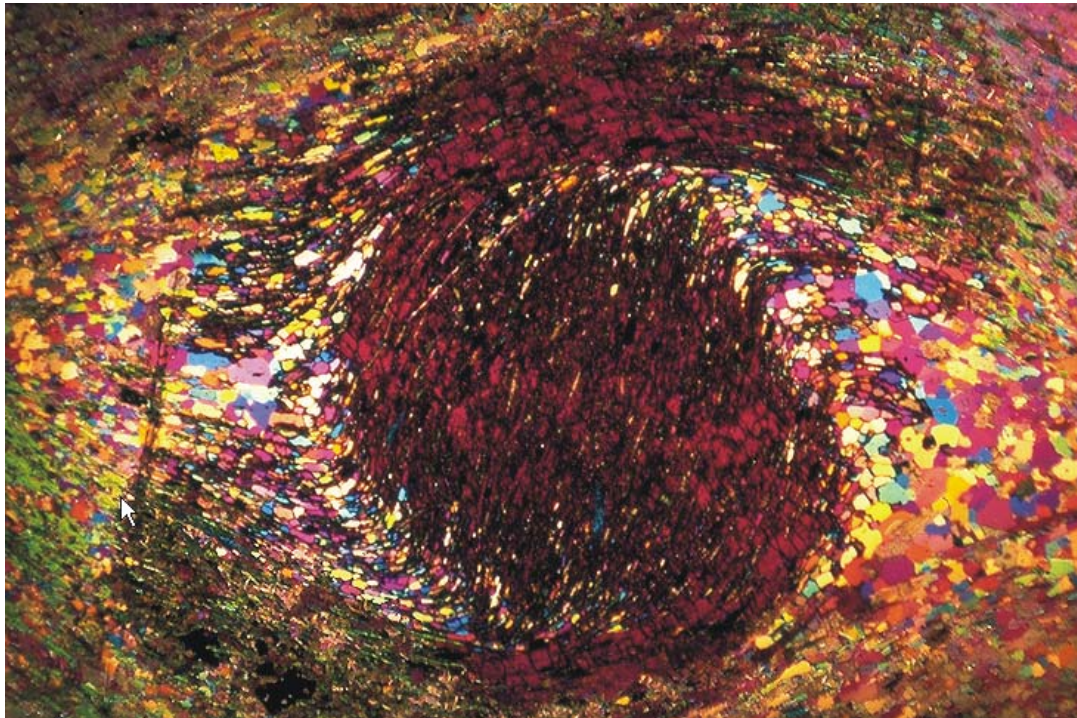
Εικ. 6.31. Όταν οι *Si* και *Se* δεν είναι συνεχόμενες μπορεί να αντιπροσωπεύουν είτε δύο φυλλώσεις (σχήμα αριστερά), είτε διαφορετικά στάδια εξέλιξης της ίδιας φύλλωσης (σχήμα δεξιά).

vi) **Περιστροφή πορφυροβλαστών.** Δύσκαμπτα αντικείμενα σε μια κύρια μάζα που παραμορφώνεται, κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις περιστρέφονται σύμφωνα με τον στιγμιαίο άξονα έκτασης (instantaneous stretching axis) της τεκτονικής ροής. Αυτό συμβαίνει σε επιμήκη αντικείμενα που είναι προσανατολισμένα σε πλάγια θέση με τον άξονα της βράχυνσης στην ομοαξονική προοδευτική παραμόρφωση και σε ομοδιάστατα ή ορισμένα επιμήκη αντικείμενα στην μη-ομοαξονική προοδευτική παραμόρφωση. Στα ομοδιάστατα αντικείμενα διακρίνονται δύο τύποι: αυτός με ευθύγραμμη *Si* (*oblique-Si porphyroblast* – *λοξής-Si πορφυροβλάστης*) και αυτός με καμπυλωμένη ή σπειροειδή *Si* (*spiral-Si porphyroblast* – *σπειροειδούς-Si πορφυροβλάστης*). Οι πορφυροβλάστες αυτοί είναι συνήθως διατεκτοικοί ή συν-τεκτονικοί. Οι λοξής-*Si* πορφυροβλάστες, με ευθύγραμμη *Si* και λοξή ως προς την *Se*, σύμφωνα με το σχήμα της Εικ. 6.32, μπορούν να σχηματισθούν από: α) δεξιόστροφη περιστροφή του πορφυροβλάστη σύμφωνα με μια λιγότερο περιστρεφόμενη φύλλωση σε πεδίο δεξιόστροφης μη-ομοαξονικής ροής (Εικ. 6.32b), β) περιστροφή της φύλλωσης γύρω από έναν ακίνητο πορφυροβλάστη σε πεδίο ομοαξονικής ροής (Εικ. 6.32c), γ) αριστερόστροφη περιστροφή της φύλλωσης σε σχέση με έναν ακίνητο πορφυροβλάστη σε πεδίο αριστερόστροφης μη-ομοαξονικής ροής (Εικ. 6.32d).



Εικ. 6.32. Δημιουργία *oblique-Si* πορφυροβλάστη σε διαφορετικά πεδία τεκτονικής ροής.

Οι σπειροειδούς-*Si* πορφυροβλάστες είναι σχετικά συνήθεις σε γρανάτες, σταυρόλιθο, αλβίτη και άλλα ορυκτά. Όμως εντυπωσιακές σπείρες της *Si*, με περιστροφή που φθάνει τις 180° , είναι γνωστές σε γρανάτες με το όνομα *δομές χιονόμπαλας* (*snowball structures*). Οι δομές αυτές είναι συνήθως συν-τεκτονικές και προέρχονται από την περιστροφή του πορφυροβλάστη σε σχέση με την *Se*.



Εικ. 6.33. *Oblique-Si* πορφυροβλάστης γρανάτη σε μαρμαρυγιακό σχιστόλιθο που δείχνει 90^0 αριστερόστροφη περιστροφή σε σχέση με την *Se*.



Εικ. 6.34. Συντεκτονικός *spiral-Si* πορφυροβλάστης γρανάτη σε μαρμαρυγιακό σχιστόλιθο.

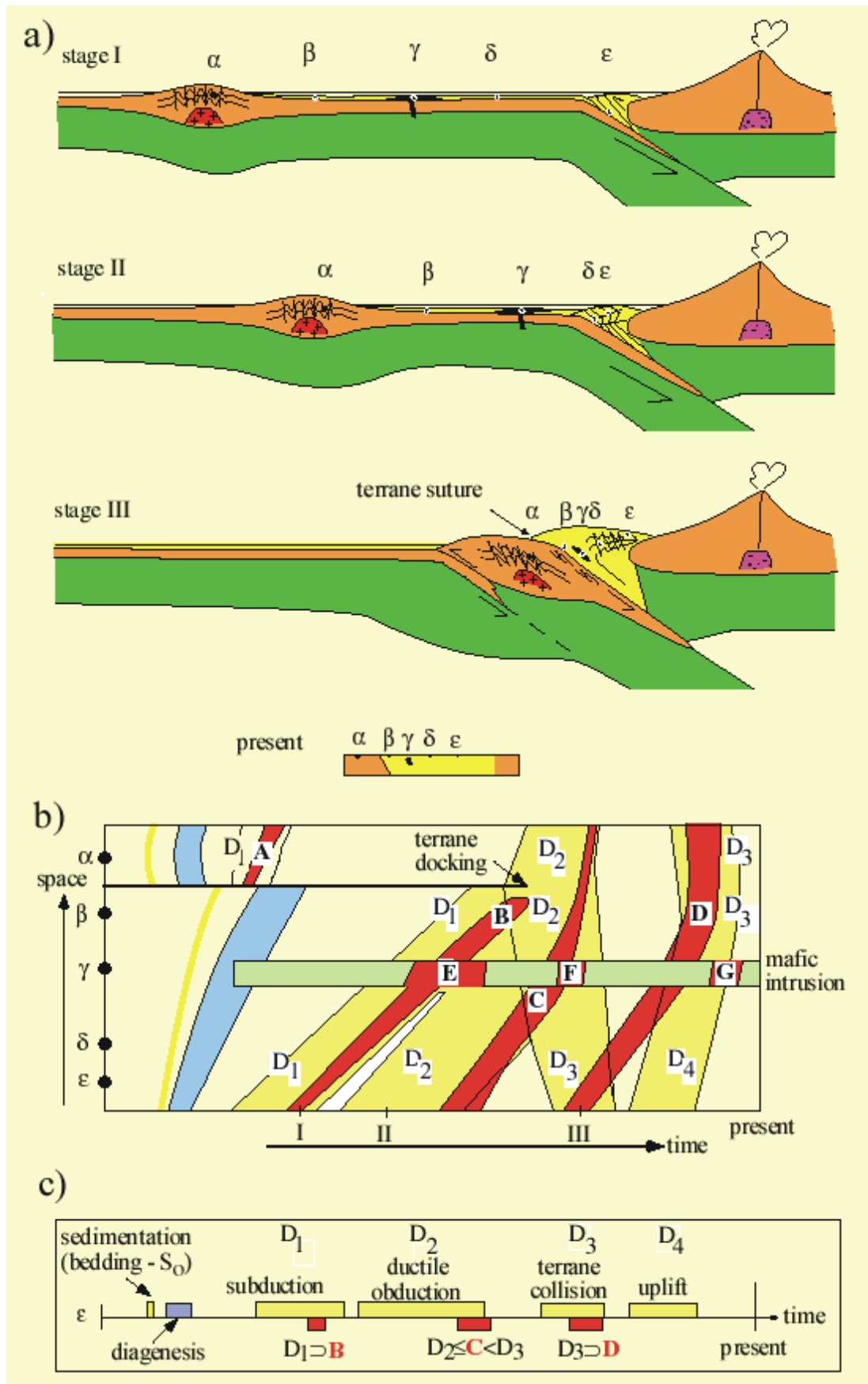
Επισημαίνεται ότι οι δομές αυτές είναι αρκετά ιδιόμορφες και υπάρχουν πολλές ενστάσεις από πολλούς ερευνητές για τον τρόπο δημιουργίας τους και έτσι η κάθε περίπτωση πρέπει να εξετάζεται χωριστά, ώστε να πλησιάζει κανείς, όσο το δυνατόν, στην αληθινή ερμηνεία, που δίνει με μεγαλύτερη προσέγγιση και την τεκτονομεταμορφική εξέλιξη του πετρώματος.

6.6 Αναπαράσταση της Τεκτονο-Μεταμορφικής Εξέλιξης

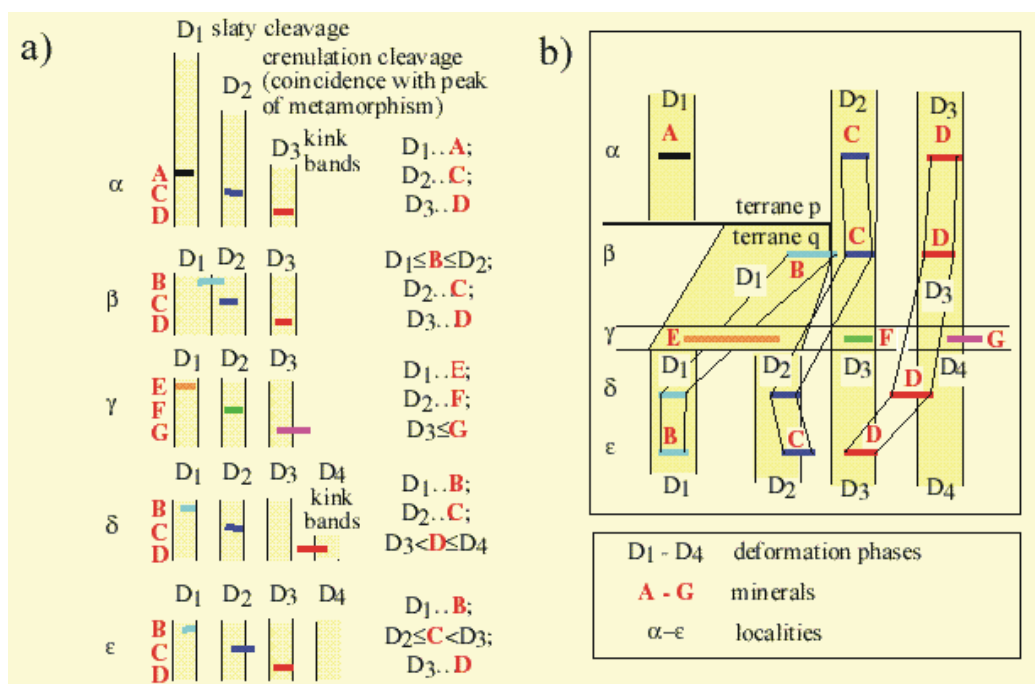
Η σχέση ανάμεσα στους πορφυροβλάστες και την κύρια μάζα μπορεί να βοηθήσει στη διαλεύκανση της τεκτονο-μεταμορφικής εξέλιξης μιας περιοχής. Η Εικ. 6.35 παρουσιάζει σχηματικά μια τέτοια εξέλιξη στο χώρο και το χρόνο και απεικονίζει τις διαφορετικές σχέσεις που αναμένονται ανάμεσα στην ανάπτυξη των ορυκτών και την παραμόρφωση. Οι ακόλουθες ενέργειες θα μπορούσαν να γίνουν σε μια περιοχή με "ιστορία" όπως αυτή της Εικ. 6.35.

1. Προσδιορισμός σε κάθε εμφάνιση ή τεκτονικό πεδίο (Εικ. 6.35α-ε) της ακολουθίας των παραμορφωτικών φάσεων που μπορούν να αναγνωρισθούν σε λεπτές τομές από τις σχέσεις επικάλυψης (βλπ. κεφάλαιο 4). Οι φάσεις πρέπει να καθορισθούν ορθά, όπως για παράδειγμα "η φάση που είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία σχιστότητας, ...για τη δημιουργία πτυχοσχισμού, ...για τη σχετική περιστροφή των πορφυροβλαστών, ...για τη δημιουργία λοξοζωνικών πτυχών (kink-bands) κλπ." Οι φάσεις μπορούν να κωδικοποιηθούν ως D_1 , D_2 , D_3 κλπ., αν τα στοιχεία υπαίθρου δείχνουν ότι δεν υπάρχει παλαιότερη παραμορφωτική φάση, και αν όχι ως D_n , D_{n+1} , D_{n+2} κλπ.
2. Προβολή των παραμορφωτικών φάσεων σε έναν οριζόντιο άξονα που θα περιλαμβάνει τη σχετική χρονική ακολουθία, αφήνοντας λίγο χώρο καινού ανάμεσα για πιθανή διατεκτονική ανάπτυξη ορυκτών, εκτός και αν υπάρχουν ενδείξεις για το αντίθετο (Εικ. 6.21 και 6.36a).
3. Προσδιορισμός της περιόδου ανάπτυξης για κάθε ορυκτό και προβολή του με οριζόντιες ράβδους (διακεκομμένες στην περίπτωση που υπάρχει αβεβαιότητα, Εικ. 6.21 και 6.36a). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικά σύμβολα που θα δείχνουν την περίοδο της κύριας ανάπτυξης του ορυκτού (Εικ. 6.21).
4. Οι όροι προ-, συν- και μετα-τεκτονικός, πρέπει να αποδίδονται ακριβώς και πάντα σε σχέση με κάποια συγκεκριμένη παραμορφωτική φάση. Π.χ. στις Εικ. 6.35c και 6.36, το ορυκτό C από την περιοχή ε αναπτύσσεται συν- έως μετα-τεκτονικά με την D_2 και προ-τεκτονικά για την D_3 .
5. Χρησιμοποίηση των δεδομένων υπαίθρου και των γεωμετρικών σχέσεων για συσχέτισμό των παραμορφωτικών φάσεων από διαφορετικές λεπτές τομές και περιοχές δειγματοληψίας (Εικ. 6.36b).

Εστιάζοντας την προσοχή μας στο σχήμα της Εικ. 6.35, στο (a) παρουσιάζονται τα τρία στάδια εξέλιξης ενός συμπλέγματος ζώνης καταβύθισης σε ένα ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο που καταλήγει σε σύγκρουση τεκτονο-στρωματογραφικών πεδίων (terrane collision). Πέντε περιοχές δειγματοληψίας (α-ε) φαίνονται στα σχήματα, που σταδιακά εμπλέκονται σε διαδοχικές παραμορφωτικές φάσεις και μεταμορφικά γεγονότα. Το γ αναπαριστά μια βασική διεύθυνση.



Εικ. 6.35. Σχηματική τεκτονο-μεταμορφική εξέλιξη μιας περιοχής (βλπ. κείμενο).



Εικ. 6.36. Διάγραμμα που απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο τα δεδομένα από τη χρονική συσχέτιση των ορυκτών με τις παραμορφωτικές φάσεις χρησιμοποιούνται για την τεκτονο-μεταμορφική αναπαράσταση. Το διάγραμμα αυτό βασίζεται στην υποθετική εξέλιξη που αναλυτικά δίνεται στην προηγούμενη εικόνα.

Στο (b) παρουσιάζονται τα διαγράμματα που δείχνουν τις σχέσεις ανάμεσα στην ανάπτυξη των πορφυροβλαστών (περιοχές με κόκκινο χρώμα, ορυκτά A-G) και την παραμόρφωση (περιοχές με κίτρινο χρώμα, φάσεις παραμόρφωσης D₁-D₄) στο χώρο και το χρόνο. Η ακολουθία των γεγονότων αρχίζει με ιζηματογένεση (κίτρινη γραμμή στα αριστερά) και συνεχίζεται με τη διαγενετική συμπίκνωση (περιοχές με θαλασσί χρώμα). Οι φάσεις παραμόρφωσης επιδρούν σε όλο το χώρο, με εξαίρεση κατά μήκος μεγάλων ρηξιγενών ζωνών, όπως τα όρια των τεκτονο-στρωματογραφικών πεδίων. Μπορεί να είναι διαχρονικές και ακόμα να ενώνονται στο χώρο (π.χ. D₁ και D₂).

Η D₁ για το α αντιπροσωπεύει μια αρχική παραμόρφωση που συνδέεται με τη γένεση αυτού του τεκτονο-στρωματογραφικού πεδίου. Η D₁ για τα β-ε αντανakλά την κίνηση της υποβύθισης και ως εκ τούτου είναι διαχρονική. Η D₂ για τα δ και ε αντιπροσωπεύει όλκιμη επώθηση (ductile obduction) ή οπισθο-επώθηση (backthrusting), ανάλογα με το σχήμα του ηπειρωτικού περιθωρίου. Η άφιξη του τεκτονο-στρωματογραφικού πεδίου προκαλεί εκ νέου παραμόρφωση που μεταδίδεται από την περιοχή της σύγκρουσης (collision) προς τα εξωτερικότερα τμήματα. Η φάση αυτή είναι η D₂ για τις θέσεις α-γ και η D₃ για τις δ και ε. Τέλος η D₃ για τις θέσεις α-γ και η D₄ για τις δ και ε αντανakλούν την κατάρρευση του ορογενούς και την συνδεόμενη με αυτό άνοδο.

Η μεταμορφική εξέλιξη παρουσιάζεται με ένα απλοποιημένο τρόπο, σύμφωνα με την ανάπτυξη συγκεκριμένων, χαρακτηριστικών για τις συνθήκες P/T, ορυκτών και όχι όλων των παραγενέσεων. Η ανάπτυξη αυτή μπορεί να είναι διαχρονική αλλά μπορεί να είναι και μη συνεχής στις μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες και τις λιθολογικές επαφές. Το A είναι ένα HT/LP

ορυκτό που σχετίζεται με τη δραστηριότητα του τόξου. Το B είναι ένα HP/LT ορυκτό που σχετίζεται με την υποβύθιση. Το C μπορεί να είναι ένα medium P/T ορυκτό και το D ένα ορυκτό ανάδρομης μεταμόρφωσης. Τα ορυκτά E, F και G φανερώνουν μια ίδια "ιστορία" για τη βασικού χαρακτήρα διείδυση, με ελαφρά διαφοροποίηση στις περιόδους ανάπτυξης των ορυκτών.

Στο (c) παρουσιάζεται η ακολουθία των γεγονότων για τη θέση ε, ως ένα παράδειγμα της ορολογίας που χρησιμοποιείται. Το διάγραμμα αυτό δείχνει επίσης πολύ καλά το πώς η τεκτονική ανάλυση και η ανάλυση των μεταμορφικών γεγονότων από συγκεκριμένα δείγματα, βοηθά να διαλευκάνουμε την τεκτονική εξέλιξη μιας περιοχής.

Στη συνέχεια εστιάζοντας την προσοχή μας στο σχήμα της Εικ. 6.36, στη στήλη a παρουσιάζεται η σχετική ηλικία ανάπτυξης των ορυκτών σε σχέση με τις φάσεις παραμόρφωσης για τις θέσεις α-ε, η οποία έχει προβληθεί σε ένα διάγραμμα όπου στον ένα άξονα είναι τα ορυκτά και στον άλλο ο χρόνος. Επισημαίνεται ότι αφήνεται χώρος ανάμεσα στις φάσεις για να καλυφθούν οι περιπτώσεις της δια-τεκτονικής ανάπτυξης. Μόνο για τη θέση β οι D₁ και D₂ είναι συνεχόμενες, όπως πιθανά φαίνεται από τα εγκλείσματα στο ορυκτό B. Κωδικοποίηση για τα ορυκτά A-G, σε σχέση με τις φάσεις παραμόρφωσης μπορεί να γίνει, όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα.

Αν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα υπαίθρου, τα σχήματα της στήλης a μπορούν να συνδυασθούν σε ένα διάγραμμα όπως αυτό της στήλης b στην ίδια εικόνα. Συγκρίνοντας το διάγραμμα αυτό με αυτό της Εικ. 6.35b, γίνεται φανερό ότι μόνο μια υποτυπώδης αναπαράσταση είναι δυνατή, εκτός και αν αναλυθούν πολύ περισσότερα δείγματα και προστεθούν στο διάγραμμα νέα δεδομένα από ηλικίες. Όπως και να έχει όμως, η βασική τεκτονο-μεταμορφική ιστορία της Εικ. 6.35b περιλαμβάνεται στο διάγραμμα της Εικ. 6.36b.