



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

9

"Ανατομία" των Ορογενετικών Ζωνών

9.1 Τεκτονική Ιστορία και Εξέλιξη

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκαν οι σύγχρονες κινήσεις των πλακών και η γεωλογική τους σημασία. Έχοντας λοιπόν υπόψη τα "ακτουαλιστικά" πρότυπα μπορεί να γίνει μια θεώρηση για την ιστορική καταγραφή των κινήσεων των πλακών μέσα στο γεωλογικό χρόνο. Με άλλα λόγια να "αποκρυπτογραφηθεί" η τεκτονική εξέλιξη των τεκτονικών μεγα-δομών, όπως μια τάφρος ή μια ορογενετική ζώνη, από τη στιγμή της δημιουργίας τους μέχρι τη σημερινή τους μορφή.

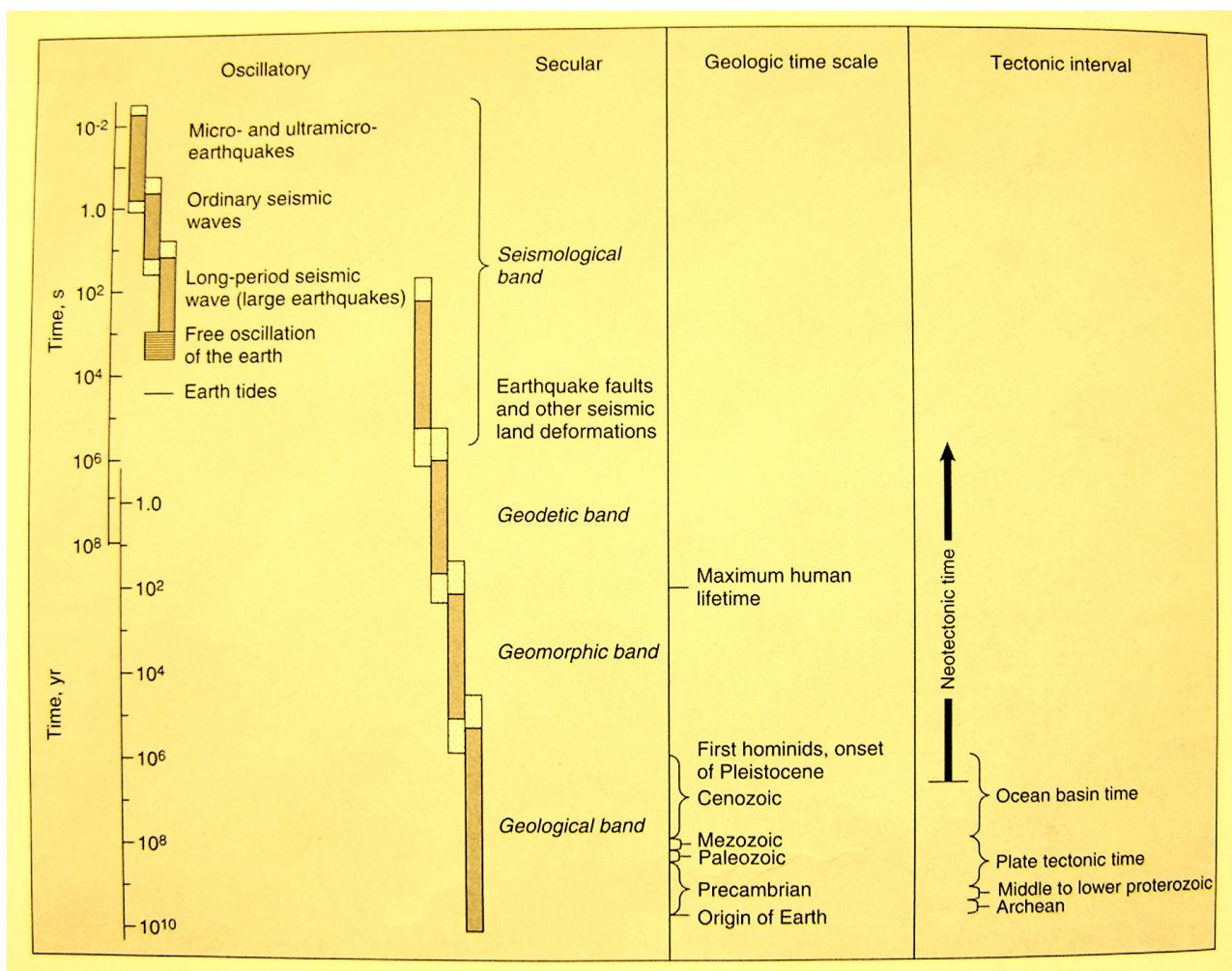
Μια άποψη αυτού που αποκαλούμε τεκτονική ιστορία και εξέλιξη, παρουσιάζεται σχηματικά στο διάγραμμα της Εικ. 9.1. Το διάγραμμα αυτό περιλαμβάνει δύο κατηγορίες φαινομένων. Τα "περιοδικά" και τα "συνεχή" (ελεύθερη μετάφραση των oscillatory και secular). Τα πρώτα αναφέρονται σε γεγονότα που έχουν περιοδικότητα, όπως οι σεισμοί και οι γήινες παλίρροιες, ενώ τα δεύτερα αφορούν βαθμιαίες μόνιμες μεταβολές που εκδηλώνονται ως αντίδραση στην τεκτονική δράση. Και οι δύο κατηγορίες των φαινομένων αυτών μπορούν να

διαχωρισθούν σε επιμέρους τομείς, όπως χαρακτηριστικά παρουσιάζεται στην Εικ. 9.1.

Ο τομέας της σεισμολογίας, για παράδειγμα, είναι πολύ σημαντικός, γιατί μελετώντας την κατανομή των σεισμών μέσα στο χρόνο διαπιστώθηκε ότι οι περισσότεροι από αυτούς εκδηλώνονται στα όρια των τεκτονικών πλακών. Με άλλα λόγια η σεισμολογία προσέφερε ένα από τα σημαντικότερα "κλειδιά" για την κατανόηση και εξέλιξη της θεωρίας των τεκτονικών πλακών.

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια σχετικά με τις γεωλογικές "συνέπειες" της κίνησης των πλακών, αναφερόμαστε σε δομές που σχηματίστηκαν τα προηγούμενα 200 εκ. έτη, δεδομένου ότι μόνο μέσα σε αυτό το διάστημα (πηγαίνοντας πίσω στο χρόνο) υφίστανται ωκεάνιες καταγραφές που είναι ακόμα διαθέσιμες.

Το μεγαλύτερο τμήμα, όμως, της ιστορίας και της εξέλιξης της γήινης σφαίρας λαμβάνει χώρα την περίοδο πριν από τη δημιουργία των σημερινών ωκεάνιων λεκανών. Με άλλα λόγια οι γεωλογικές καταγραφές που οδηγούν στην "αποκρυπτογράφηση" της τεκτονικής ιστορίας και εξέλιξης θα πρέπει να αναζητηθούν στα παλαιάς ηλικίας πετρώματα, δηλαδή σε αυτά που βρίσκονται σήμερα στις ηπει-



Εικόνα 9.1 Οι κατηγορίες των φαινομένων και οι χαρακτηριστικές περίοδοι που σχετίζονται με την τεκτονική ιστορία και εξέλιξη της Γης.

ρωτικές περιοχές, σε αυτά που σχηματίζουν τις ορογενετικές ζώνες της Γης.

Οι συνήθειες τεχνικές που εφαρμόζονται στη γεωλογική και τεκτονική ανάλυση έχουν μια ακρίβεια της τάξης του 1 εκ. ετών. Άρα η περιγραφή της τεκτονικής των πλακών, που εστιάζει σε δομές που έχουν δημιουργηθεί τα τελευταία 1 εκ. χρόνια ή λίγο παλαιότερα, είναι η περισσότερο ακριβής. Η περίοδος αυτή καλύπτει τη νεοτεκτονική περίοδο της δομής και εξέλιξης της Γης και δεν αναφέρεται στο βιβλίο αυτό, δεδομένου ότι διδάσκεται ως χωριστό μάθημα επιλογής και έτσι όποιος αναζητά στοιχεία μπορεί να τα βρει στις αντίστοιχες σημειώσεις του μαθήματος.

Σε ότι αφορά στα ορογενετικά συστήματα, που είναι νεότερα των 200 εκ. ετών, αρκετά στοιχεία για τις κινήσεις των πλακών, που σχετίζονται με τη δημιουργία τους, μπορούν να ληφθούν από τη μελέτη και ανάλυση των μαγνητικών ανωμαλιών των σημερινών ωκεάνιων λεκανών (βλπ. στα προηγούμενα κεφάλαια). Για τις παλαιότερες ορογενετικές ζώνες περιοριζόμαστε μόνο στα παλαιομαγνητικά

δεδομένα και τα πετροτεκτονικά στοιχεία που μας δίνει η μελέτη των πετρωμάτων τους.

Άρα λοιπόν, όταν αναφερόμαστε στη γεωτεκτονική ιστορία και εξέλιξη της Γης, είναι καλό να τη χωρίζουμε σε συγκεκριμένες περιόδους, που καθορίζονται τόσο από το που αντλούμε στοιχεία όσο και από το που υπάρχουν καταγραφές για την τεκτονική δραστηριότητα της κάθε περιόδου.

Νεοτεκτονική περίοδος (0–5 Ma): Η περίοδος μεταξύ της πρόσφατης τεκτονικής δραστηριότητας και αυτής που καταγράφεται με ακρίβεια από τις συμβατικές γεωλογικές μεθόδους. Εναλλακτικές μέθοδοι μελέτης κρίνονται απαραίτητες.

Περίοδος ωκεάνιων λεκανών (1–200 Ma): Η περίοδος για την οποία είναι ακόμα διαθέσιμα στοιχεία (σχετικά με τη διάνοιξη και δημιουργία ωκεάνιου φλοιού) από τις σημερινές θαλάσσιες λεκάνες και τους ωκενούς. Τα ορογενετικά γεγονότα στις ηπείρους μπορούν, κατά την περίοδο αυτή, να συσχετισθούν άμεσα με τις καταγραφές για τις ωκεάνιες διανοίξεις.

Περίοδος τεκτονικών πλακών (200–950 Ma): Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται, κατά κύριο λόγο, από την τεκτονική των λιθοσφαιρικών πλακών, που χρονολογείται πριν από τις καταγραφές στον παλαιότερο ωκεάνιο φλοιό στις σημερινές θαλάσσιες ή ωκεάνιες λεκάνες. Οι καταγραφές για την περίοδο αυτή εντοπίζονται στις ηπειρωτικές ορογενετικές ζώνες και καλύπτουν το διάστημα τέλη Προτεροζωϊκού – Φανεροζωϊκός αιώνας.

Περίοδος μέσου έως κατώτερου Προτεροζωϊκού (950–2500 ± 200 Ma): Ορισμένα τεκτονικά χαρακτηριστικά της περιόδου αυτής θυμίζουν δομές που απαντώνται στη σύγχρονη τεκτονική των λιθοσφαιρικών πλακών, κάποια άλλα όμως απουσιάζουν.

Αρχαϊκή περίοδος (2500–3800 ± 200 Ma): Οι τεκτονικές συνθήκες φαίνεται να είναι εντελώς διαφορετικές με αυτές που είναι σήμερα γνωστές.

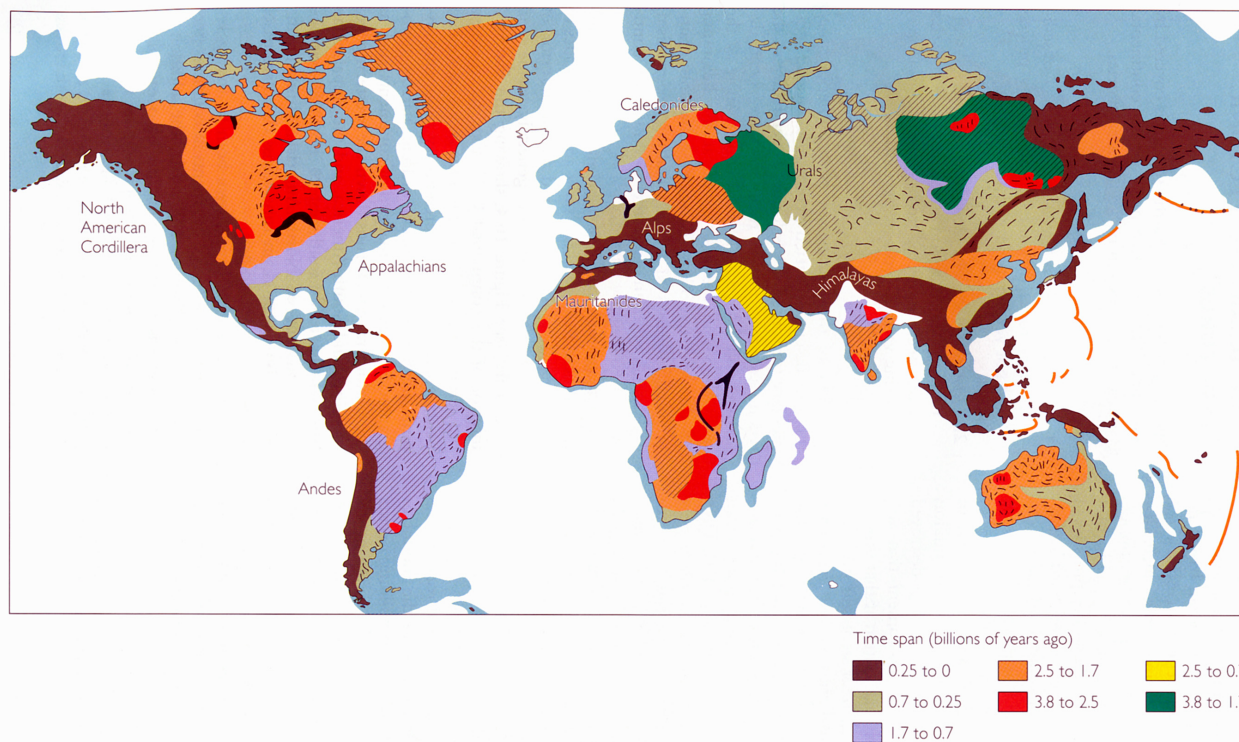
9.2 Ορογενετικές Ζώνες

Έχοντας ως υπόβαθρο τα όσα περιγράψαν στα προηγούμενα κεφάλαια μπορεί να ακολουθήσει μια περιγραφή των ορογενετικών ζωνών, δεδομένου ότι, όχι τυχαία, αυτές ταυτίζονται με τις μεγαλύτερες ορεινές αλυσίδες του πλανήτη. Όροι όπως ορο-

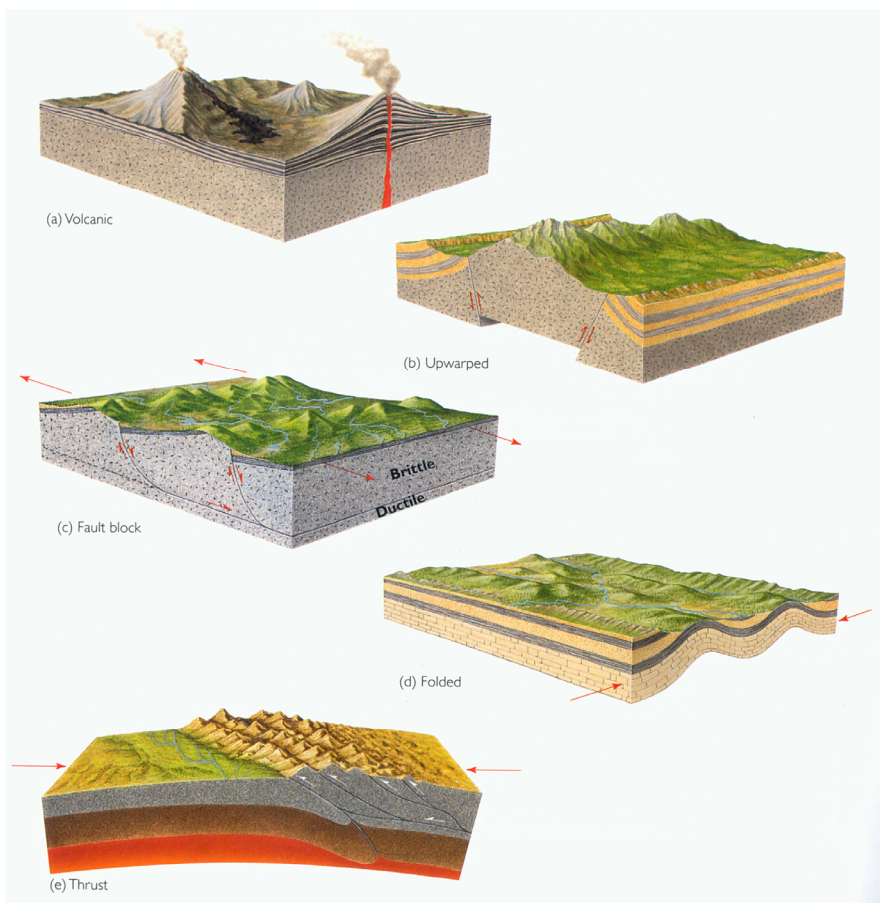
γενές (orogen), ορογενετική ζώνη (orogenic belt) και ορεινή αλυσίδα (mountain chain), χρησιμοποιούνται ως συνώνυμα στη διεθνή βιβλιογραφία και έχουν ελληνική ρίζα.

Η ορογένεση (orogeny ή orogenesis) αναφέρεται στη δημιουργία μικρότερης ή μεγαλύτερης κλίμακας οροσειρών, που σχετίζονται με διαδικασίες παραμόρφωσης (πτύχωσης, ρηγμάτωσης), μαγματισμού και μεταμόρφωσης και είναι στενά συνδεδεμένη με την εξέλιξη των ηπείρων. Η γεωλογική και τεκτονική δομή των ηπείρων δεν είναι τυχαία. Τα πετρώματα που σχετίζονται με τα παλαιότερα παραμορφωτικά επεισόδια σε πλανητική κλίμακα, βρίσκονται συνήθως στο εσωτερικό των ηπείρων, που τώρα είναι, από τεκτονική άποψη, σταθερό. Αντίθετα στα εξωτερικά τμήματα των ηπείρων απαντώνται οι πιο πρόσφατες ενεργές ορογενετικές ζώνες. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο χάρτη της Εικ. 9.2 όπου παρουσιάζονται τα πετρώματα του ηπειρωτικού φλοιού, ταξινομημένα ανάλογα με τη γεωλογική περίοδο που έχουν παραμορφωθεί.

Στην Εικ. 9.3 παρουσιάζονται σχηματικά όλοι οι τύποι των ορέων που απαντώνται στις ορογενετικές ζώνες και διαφέρουν μεταξύ τους, τόσο στον τρόπο δημιουργίας όσο και την προέλευση. Έτσι λοιπόν διακρίνονται όρη που έχουν σχηματισθεί: α) από ηφαιστειακή δραστηριότητα, β) από μεγάλης κλίμακας αναθλωμένα (ή ανορθωμένα, upwarped)



Εικόνα 9.2 Τα πετρώματα του ηπειρωτικού φλοιού ταξινομημένα ανάλογα με τη γεωλογική περίοδο που έχουν παραμορφωθεί. Τα παλαιότερα βρίσκονται στο εσωτερικό των ηπείρων και τα νεότερα στα περιθώρια. Με διαγώνιες γραμμές συμβολίζονται οι περιοχές όπου τα πετρώματα βρίσκονται κάτω από νεότερα ιζήματα, ηφαιστειακά πετρώματα ή παγετώνες. Με κόκκινο συμβολίζονται τα ηφαιστειακά τόξα, με μαύρο οι ηπειρωτικές τάφροι και με θαλασσί η προέκταση των ηπείρων στη θάλασσα.



Εικόνα 9.3 Οι τύποι των ορέων, που απαντώνται στις ορογενετικές ζώνες, ταξινομημένοι ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού και την προέλευσή τους.

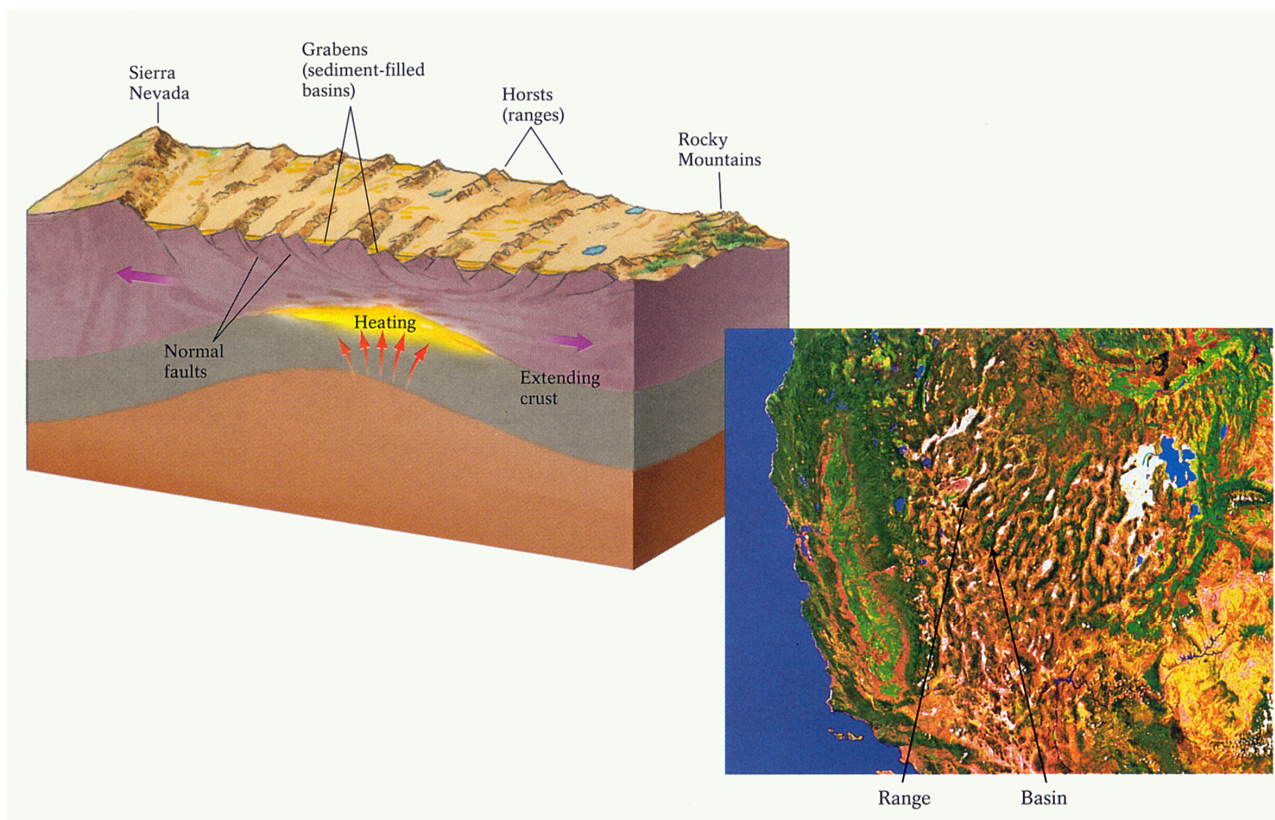
τμήματα του φλοιού, που σε ορισμένες περιπτώσεις σχετίζονται με ανάστροφα ρήγματα, γ) από μεγάλης κλίμακας περιστραμμένα ρηξιτεμάχη που οριοθετούνται από κανονικά ρήγματα, δ) από μεγάλης κλίμακας ανοικτές πτυχώσεις και ε) από μεγάλης κλίμακας επωθήσεις, πτυχές-επιπτεύσεις και ανάστροφα ρήγματα.

Σχετικά πρόσφατα έχει αναγνωρισθεί ότι η δομή και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των τύπων των ορέων και των ορογενετικών αλυσίδων μας αποκαλύπτουν τη δραστηριότητα των τεκτονικών πλακών μέσα στο χρόνο. Οι ορογενετικές ζώνες έχουν καταγράψει κατά τη διάρκεια της εξέλιξής τους σημαντικά γεωτεκτονικά γεγονότα όπως η υποβύθιση μιας πλάκας κάτω από μια άλλη, ή η σύγκρουση τεμαχών του γήινου φλοιού, όπως ήπειρος με ήπειρο, ήπειρος με νησιωτικό τόξο ή ήπειρος με ωκεανικό πλατώ. Επισημαίνεται, για μια ακόμα φορά, ότι οι ορογενετικές ζώνες αποτελούν τη μοναδική πηγή πληροφορίας για τη δραστηριότητα και εξέλιξη των τεκτονικών πλακών και ως εκ τούτου για το 95 % της γεωλογικής ιστορίας του πλανήτη, δεδομένου ότι το σύνολο του ωκεανικού φλοιού που είναι παλαιότερο από 200 Ma (αρχές Ιουρασσιακού), έχει υποβυθισθεί και άρα εξαφανισθεί.

Από τους τύπους των ορέων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, τις εντυπωσιακότερες ορογενετικές

αλυσίδες με τα μεγαλύτερα υψόμετρα (συνήθως πάνω από 3.000 μέτρα), δίνει ο τελευταίος τύπος (από μεγάλης κλίμακας επωθήσεις, πτυχές-επιπτεύσεις και ανάστροφα ρήγματα – fold and thrust mountains) που σχετίζεται με τις διαδικασίες της σύγκλισης και, κυρίως, της σύγκρουσης των πλακών, δηλαδή σε καθεστώς συμπίεσης και πάχυνσης του φλοιού. Ιμαλαΐα, Άλπεις, Κορδιλιέρα Β. Αμερικής, Άνδεις, Απαλάχια, Καλιδονίδες κλπ. αποτελούν τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα.

Τις τελευταίες δεκαετίες γίνεται αρκετή συζήτηση για τις οροσειρές που προέρχονται από μεγάλης κλίμακας περιστραμμένα ρηξιτεμάχη, τα οποία οριοθετούνται από κανονικά ρήγματα (fault-block mountains). Η πιο χαρακτηριστική περίπτωση είναι αυτή της επαρχίας Basin and Range των δυτικών Η.Π.Α. (με υψόμετρα που ξεπερνούν τα 2.000 μέτρα), από όπου άλλωστε ξεκίνησε και ο σχετικός προβληματισμός. Η ιδιομορφία των οροσειρών αυτών είναι ότι σχετίζονται με καθεστώς εφελκυσμού και λέπτυνσης του φλοιού, κάτι το οποίο εκ πρώτης όψης φαίνεται παράδοξο. Ο μηχανισμός μέσα από τον οποίο συμβαίνει αυτό δεν έχει ακόμα διευκρινισθεί και έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για κάθε περίπτωση (π.χ. για την επαρχία Basin and Range η ύπαρξη μιας νέας θερμής κοιλίδας στο ΝΔ τμήμα της λιθοσφαιρικής πλάκας της Β. Αμερικής, Εικ. 9.4).



Εικόνα 9.4 Το τεκτονικό μοντέλο που προτείνεται για την προέλευση του ορογενετικού συστήματος της επαρχίας Basin and Range των δυτικών Η.Π.Α. Αν και είναι γνωστό ότι αυτό έχει σχηματισθεί σε καθεστώς εφελκυσμού (κανονικά ρήγματα) και εκλέπτυνσης του φλοιού, το αίτιο που το προκάλεσε δεν έχει ακόμα διευκρινισθεί.

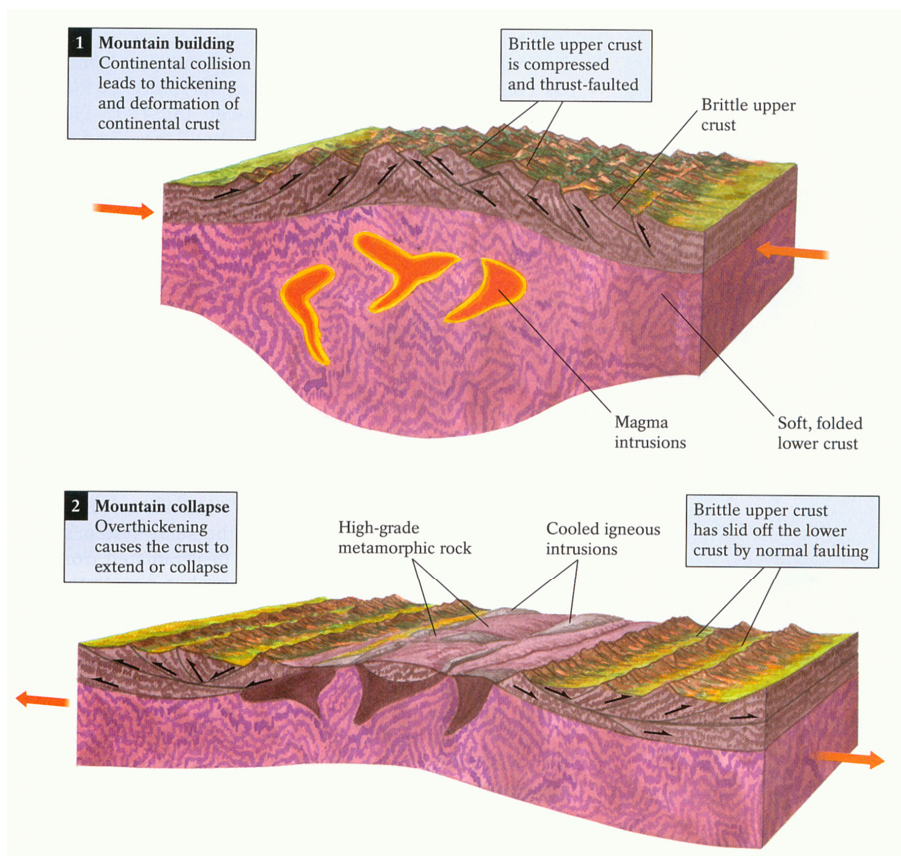
Η σημασία του εφελκυσμού φαίνεται ότι σε ορισμένες περιπτώσεις είναι σημαντική στη δημιουργία και εξέλιξη των ορογενετικών ζωνών, τόσο στο στάδιο της σύγκλισης, όπως άλλωστε περιγράφηκε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο, όσο και στο στάδιο της σύγκρουσης. Οι οροσειρές στις ζώνες σύγκρουσης μπορεί να γίνουν πολύ υψηλές και ο φλοιός εξαιρετικά παχύς, ώστε να δημιουργηθεί μια ισοστατική ανισορροπία. Στο σημείο αυτό ξεκινάει μια διαδικασία γνωστή ως κατάρρευση του ορογενούς (mountain collapse ή mountain unbuilding) που οδηγεί, συνήθως με ταχύ ρυθμό, σε εκλέπτυνση του φλοιού μέσα από κανονικά ρήγματα και καθεστώς εφελκυσμού (Εικ. 9.5).

Η δημιουργία οροσειρών σε καθεστώς εφελκυσμού οδηγεί σε τεκτονικές mega-δομές γνωστές με το όνομα συμπλέγματα μεταμορφικού πυρήνα (metamorphic core complexes), που περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Μια άλλη κατηγορία οροσειρών, για τις οποίες υπάρχει σημαντικός προβληματισμός για την προέλευση και τον τρόπο δημιουργίας τους, είναι τα αποκαλούμενα upwarped mountains. Συνιστούν αναθλωμένα ή ανορθωμένα τμήματα του φλοιού που χαρακτηρίζονται από ανοδική κίνηση χωρίς άλλη σημαντική παραμόρφωση. Συνήθως βρίσκο-

νται στο εσωτερικό των πλακών, μακριά από τα ενεργά περιθώρια και για το λόγο αυτό το ζήτημα της προέλευσης αλλά και των δυνάμεων που οδηγούν στη δημιουργία τους είναι ακόμα αδιευκρίνιστο. Για ορισμένους ερευνητές οφείλονται σε κατακόρυφες δυνάμεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό των πλακών σε αντίθεση με τις οριζόντιες δυνάμεις που αναπτύσσονται στα περιθώρια. Για παράδειγμα, η αναθώωση αυτή σε ορισμένες περιπτώσεις φαίνεται να αντανakλά την άνοδο υλικού μικρής πυκνότητας. Η ανοδική αυτή κίνηση προκαλείται είτε από τοπικού χαρακτήρα αύξηση της θερμοκρασίας (και άρα μείωση της πυκνότητας) στο εσωτερικό της Γης, είτε από την άνοδο του χαμηλότερης πυκνότητας μανδουακού υλικού, καθώς τα βαρύτερα μέλη βυθίζονται προς τον πυρήνα.

Σε πολλές περιοχές οι οροσειρές αυτού του τύπου αποτελούνται από παλαιά, προκάμβρια ηλικίας πετρώματα, που αποκαλύφθηκαν από τη διάβρωση των νεότερων ιζημάτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης αποτελούν τα όρη Adirondacks (με υψόμετρα της τάξης των 1.000 μέτρων), στη βόρεια Νέα Υόρκη. Η αναθώωση ξεκίνησε πριν από περίπου 65 Ma, μετά από μια μακρά περίοδο εκατοντάδων εκατομμυρίων ετών σταθερότητας. Η τοπικού χαρακτήρα σεισμική



Εικόνα 9.5 Η δημιουργία ενός ορογενούς σε καθεστώς συμπίεσης και πάχυνσης του φλοιού (1) και η κατάρρευσή του, λόγω ισοστατικής ανισορροπίας, σε καθεστώς εφελκυσμού και εκλέπτυνσης του φλοιού (2).

δραστηριότητα φανερώνει ότι η ανοδική διαδικασία συνεχίζεται ακόμα και σήμερα, παρότι η περιοχή βρίσκεται εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά από τα σημερινά ενεργά περιθώρια των πλακών.

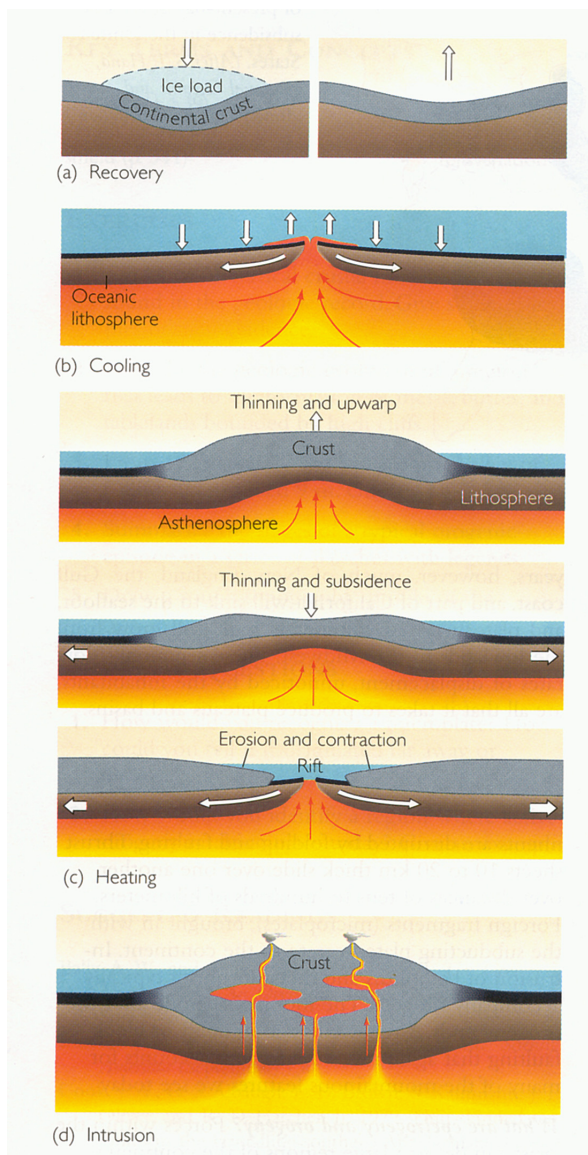
Συχνά, όταν οι κατακόρυφες αυτές κινήσεις επηρεάζουν πολύ μεγάλα τμήματα του φλοιού και εκδηλώνονται με πολύ βραδύτερο ρυθμό, τόσο ανοδικά όσο και καθοδικά, χρησιμοποιείται και ο όρος ηπειρογένεση (epeirogeny), σε αντίθεση με το ορογένεση. Και στην περίπτωση αυτή έχουν δοθεί, όπως και για τα ανωτέρω περιγράφηκε, διάφορες ερμηνείες και έχουν προταθεί διάφοροι μηχανισμοί που οδηγούν σε αυτές τις κινήσεις, όπως (Εικ. 9.6): α) ισοστατική ανόρθωση από απομάκρυνση παγετώνων, β) αναθόλωση από άνοδο θερμού υλικού σε μεσο-ωκεάνια ράχη και ψύξη και καταβύθιση της υπόλοιπης ωκεάνιας πλάκας, γ) αναθόλωση και εκλέπτυνση ηπειρωτικού φλοιού λόγω αύξησης της θερμότητας και δ) αναθόλωση από πάχυνση του φλοιού λόγω διεισδύσεων και προσθήκης μαγματικού υλικού.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα ακολουθήσει η περιγραφή της δομής των πιο εντυπωσιακών ορογενετικών ζωνών που σχετίζονται με το φαινόμενο της σύγκρουσης και αντιπροσωπεύουν τις σημαντικότερες οροσειρές που υπάρχουν σήμερα στον πλανήτη.

9.3 Τεκτονική Δομή των Ορογενετικών Ζωνών

Όπως αναφέρθηκε, στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται και συζητώνται τα τεκτονικά χαρακτηριστικά και η δομή των επιμέρους τμημάτων των ορογενετικών ζωνών, ενώ σε επόμενα κεφάλαια περιγράφονται εν συντομία οι μεγαλύτερες ορογενετικές αλυσίδες του κόσμου, όπως η Κορδιλιέρα της Βόρειας Αμερικής, οι Άνδεις, η ορογενετική αλυσίδα των Άλπεων-Ιμαλαΐων και το ορογενετικό σύστημα Απαλαχίων-Καλιδονίδων.

Στην Εικ. 9.7 παρουσιάζονται απλοποιημένοι γεωτεκτονικοί χάρτες του τμήματος Άλπεις-Ιρανίδες της ορογενετικής αλυσίδας Άλπεων-Ιμαλαΐων, της Κορδιλιέρας της Βόρειας Αμερικής και του ορογενετικού συστήματος Απαλαχίων-Καλιδονίδων, σε μια "ανακατασκευή" πριν τον αποχωρισμό Ευρώπης και Βόρειας Αμερικής. Από τα τρία αυτά ορογενή μόνο το τελευταίο είναι ανενεργό. Σχηματίστηκε από τη σύγκρουση της Αφρικής και της Ευρώπης με τη Βόρεια Αμερική κατά το τέλος του Παλαιοζωικού και διαχωρίστηκε σε δύο τμήματα με τη διάνοιξη του Ατλαντικού Ωκεανού κατά το Μεσοζωικό-Καινοζωικό. Η Κορδιλιέρα της Βόρειας Αμερικής και η ορογενετική αλυσίδα των Άλπεων-Ιμαλαΐων περιλαμβάνουν περιθώρια πλακών που είναι ακόμα ενεργά. Οι λιθο-



Εικόνα 9.6 Διάφοροι μηχανισμοί που έχουν προταθεί για τις κατακόρυφες, ορογενετικές ή ηπειρογενετικές, κινήσεις τμημάτων του φλοιού.

σφαιρικές πλάκες Βόρειας Αμερικής, Ειρηνικού Ωκεανού και Juan de Fuca είναι αυτές που ενεπλάκησαν στο ορογενές της Κορδιλιέρας της Βόρειας Αμερικής, ενώ στο ορογενές Άλπεων-Ιμαλαΐων ενεπλάκησαν η Ευρασιατική λιθοσφαιρική πλάκα, η Αφρικανική, η Αραβική και η λιθοσφαιρική πλάκα Αυστραλίας-Ινδίας. Μικρότερες πλάκες συμμετέχουν επίσης σε καθένα από τα ορογενή αυτά.

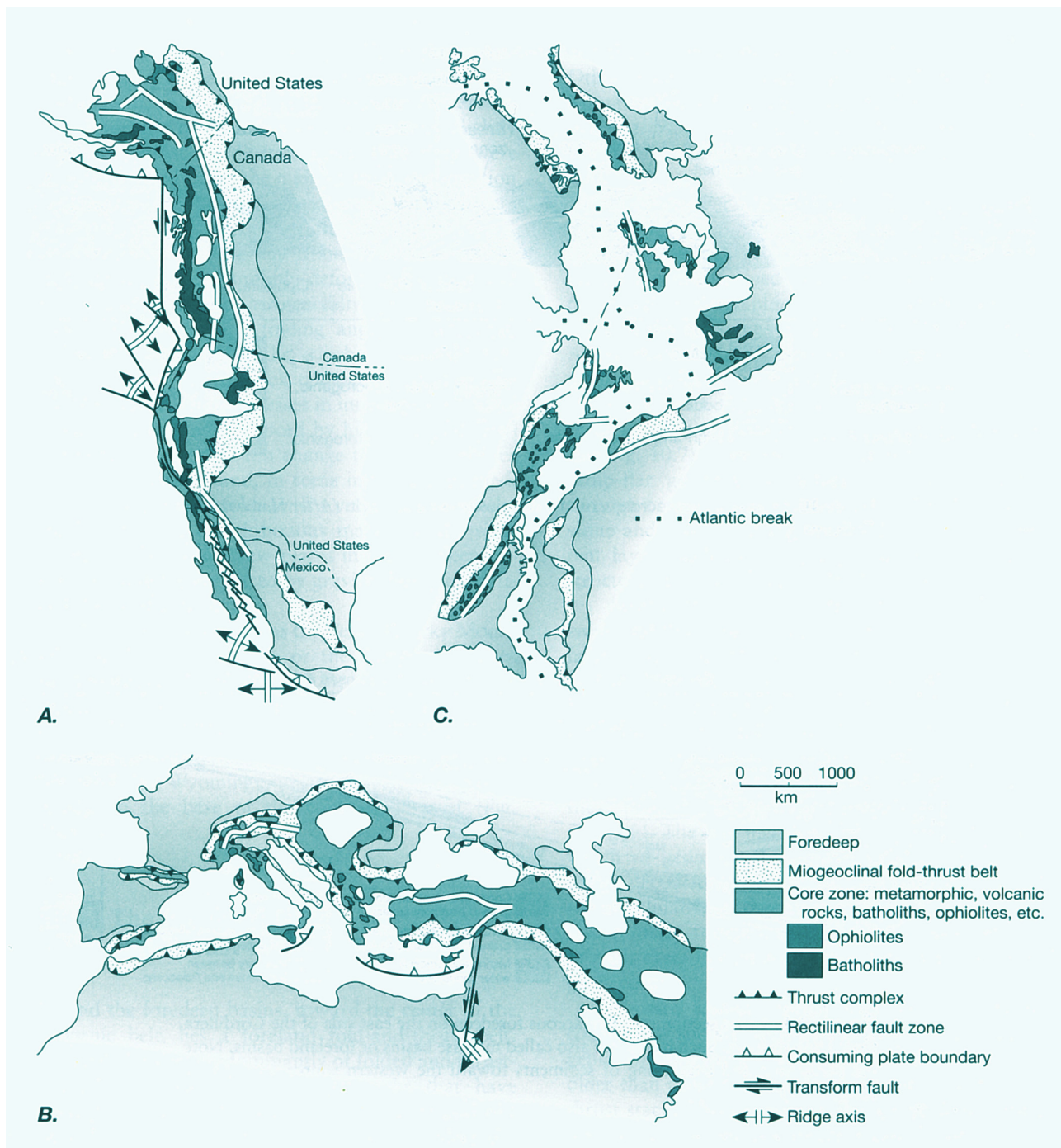
Από τη γεωμετρία και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των τεκτονικών ζωνών και των δομών που σχετίζονται με αυτές στα τρία αυτά ορογενή (Εικ. 9.7), γίνεται φανερό ότι δεν υπάρχει ένα μοναδικό μοντέλο που να μπορεί να περιγράψει την "ανατομία" όλων των ορογενετικών αλυσίδων. Παρόλα αυτά, το σύνολο σχεδόν των ορογενών παρουσιάζουν έναν αριθμό κοινών χαρακτηριστικών όπως: i) μία διπλή τεκτονική συμμετρία, ii) μια προχώρα

(foreland) ή απαραμόρφωτη πλάκα σε κάθε πλευρά, iii) μια εξωτερική θαλάσσια λεκάνη (εμπροσθο-λεκάνη, foredeep), iv) ζώνες με διαδοχικές πτυχές-επωθήσεις (fold-and-thrust belts), v) οφιολιθικές ραφές (ophiolitic suture zones), vi) μία ή περισσότερες ζώνες από φυλλίτες (slate belts) και vii) έναν εσωτερικό κρυσταλλικό πυρήνα που αποτελείται από μεταμορφωμένα ιζηματογενή και ηφαιστειακά πετρώματα, βασικά και υπερβασικά συμπλέγματα και γρανιτικούς πλουτωνίτες.

Γεωλογικές και γεωτεκτονικές τομές σε διαφορετικά ορογενή αλλά και σε διαφορετικά τμήματα του ίδιου ορογενούς, διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Για παράδειγμα ορογενή όπως αυτό της Κορδιλιέρας της Βόρειας Αμερικής χαρακτηρίζονται από έναν απαραμόρφωτο ωκεανό στη μία πλευρά και μια ήπειρο στην άλλη. Αντίθετα ορογενή όπως αυτό των Άλπεων χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη μιας ηπειρωτικής πλατφόρμας ή προχώρας σε κάθε πλευρά. Αυτή η αντίθεση έχει οδηγήσει στο διαχωρισμό των ορογενετικών ζωνών σε δύο κύριους τύπους: 1) τύπος Κορδιλιέρας ή περι-Ειρηνικός και 2) τύπος Άλπεων-Ιμαλαΐων, ανάλογα με το αν η προκύπτουσα ορογενετική ζώνη οριοθετείται από έναν ωκεανό και μια ήπειρο ή δύο ηπείρους. Οι δύο αυτοί τύποι ορογενών, παρά τις σημαντικότερες διαφορές τους, παρουσιάζουν και αρκετές ομοιότητες στη γεω-τεκτονική δομή τους, τόσες ώστε να γίνεται δυνατή η περιγραφή τους μέσα από μια συνθετική τομή, όπως χαρακτηριστικά παρουσιάζεται στην Εικ. 9.8.

Στα ορογενή του πρώτου τύπου, Κορδιλιέρας ή περι-Ειρηνικού, μπορεί να γίνει μια πιο λεπτομερής διάκριση των οροσειρών, όπου αντιστοιχούν: α) οι οροσειρές τύπου Άνδεων με βύθιση ωκεανικού φλοιού κάτω από ηπειρωτικό, β) οι παραλιακές οροσειρές της Καλιφόρνιας και της Αλάσκας, που στην ουσία οφείλονται σε βύθιση όπως και αυτές των Άνδεων, μόνο που είναι πιο σύνθετες από αυτές και γ) τα νησιωτικά τόξα του Δυτικού Ειρηνικού που αναπτύσσονται ανάμεσα σε μια περιθωριακή λεκάνη και μια ωκεανική τάφρο.

Συχνά στη βιβλιογραφία γίνεται μια ακόμα διάκριση για τις οροσειρές που δημιουργούνται από ρήγματα μετασχηματισμού (Μέση Ανατολή, Πυρηναία, Άγιος Ανδρέας). Δεδομένου όμως ότι το φαινόμενο της οριζόντιας ολίσθησης δεν συμμετέχει αποκλειστικά στη δημιουργία του ορογενούς, κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του οποίου λαμβάνουν χώρα και άλλα σημαντικά γεωτεκτονικά φαινόμενα, όπως βύθιση ή σύγκρουση, για πολλούς ερευνητές δεν είναι απαραίτητη η διάκρισή τους, αφού κάλλιστα μπορούν να ενταχθούν σε ένα από τους δύο βασικούς τύπους ορογενών. Άλλωστε η σύγκρουση, η βύθιση και η οριζόντια ολίσθηση είναι φαινόμενα που δεν αποκλείει το ένα το άλλο



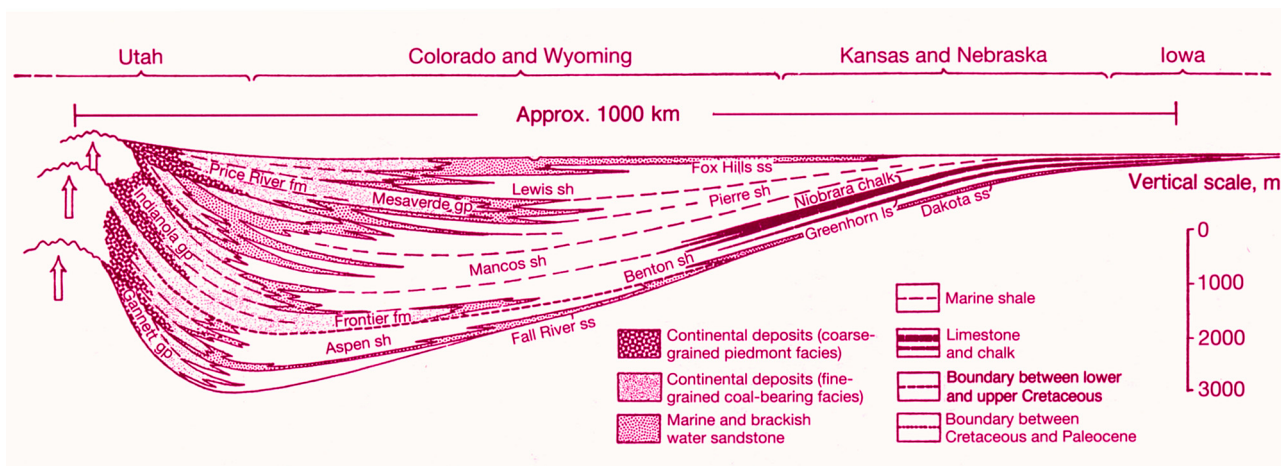
Εικόνα 9.7 Τρεις χαρακτηριστικές ορογενετικές ζώνες (**A.** κορδιλιέρα Βόρειας Αμερικής, **B.** το τμήμα Άλπεις–Ιρανίδες της ορογενετικής αλυσίδας Άλπεων–Ιμαλαΐων, **C.** Απαλάχια–Καλιδονίδες) σε ίδια κλίμακα όπου παρουσιάζονται τα κύρια τεκτονικά χαρακτηριστικά για σύγκριση με το μοντέλο της επόμενης εικόνας.

και συμμετέχουν, περισσότερο ή λιγότερο, στη δημιουργία των ορογενετικών ζωνών και των δύο βασικών τύπων.

Η Εξωτερική, Θαλάσσια ή Ηπειρωτική, Εμπροσθο-λεκάνη

Ανάμεσα στην κύρια ορογενετική ζώνη και την απαραμόρφωτη ηπειρωτική πλατφόρμα (Εικ. 9.8),

παρεμβάλλεται μια μεγάλου πάχους ακολουθία από κλαστικά ιζήματα, τα οποία προέρχονται από μια ανυψωμένη περιοχή των γειτονικών οροσειρών. Τα ιζήματα αυτά έχουν αποθεθεί σε μια θαλάσσια ή ηπειρωτική λεκάνη (εμπροσθο-λεκάνη, foredeep ή foreland basin, επειδή βρίσκεται στην προ-χώρα), που στην ορολογία της αλπικής γεωλογίας ονομάζεται μολασσική λεκάνη. Τα ιζήματα φθάνουν ένα πάχος που υπερβαίνει τα 8 με 10 km πλησίον του



Εικόνα 9.9 Χαρακτηριστική γεωλογική τομή της κρητιδικής ηλικίας εμπροσθο-λεκάνης (ή μολασσικής λεκάνης) του ανατολικού τμήματος της αμερικανικής κορδιλιέρας. Το πάχος των ιζημάτων αυξάνει κατά πολύ προς τον πυρήνα και το μέτωπο της ορεινής αλυσίδας.

μετώπου της ορεινής αλυσίδας και το μέγεθος του κλαστικού υλικού ελαττώνεται βαθμιαία με την απομάκρυνση από το μέτωπο αυτό, με αποτέλεσμα τα κροκαλοπαγή να δίνουν τη θέση τους σε ψαμμίτες και αργιλικούς σχίστες και αυτοί με τη σειρά τους σε θαλάσσια ανθρακικά ιζήματα κρηπίδας.

Οι λεκάνες αυτές διαφέρουν κατά περίπτωση στην εξέλιξή τους, ανάλογα με το ρυθμό βύθισης και πλήρωσης με ιζήματα, με αποτέλεσμα να απαντώνται είτε αποκλειστικά ρηχές φάσεις (π.χ. η Δεβόνιας ηλικίας λεκάνη των Β. Απαλαχίων) είτε το ξεκίνημα της λεκάνης να γίνεται με βαθιές φάσεις και το κλείσιμο με ρηχές (π.χ. η Κρητιδικής ηλικίας λεκάνη που αναπτύσσεται κατά μήκος της ανατολικής πλευράς της Κορδιλιέρας των Δυτικών Η.Π.Α., Εικ. 9.9). Σε ορισμένες τέτοιες λεκάνες δεν υπάρχει στην ουσία οροφή στην ιζηματογενή κλαστική ακολουθία (unroofing sequence), αφού συνεχίζεται ακόμα και σήμερα η σταδιακή άνοδος του ορογενούς και η αποκάλυψη βαθύτερων οριζόντων που τροφοδοτούν με κλαστικό υλικό τη λεκάνη.

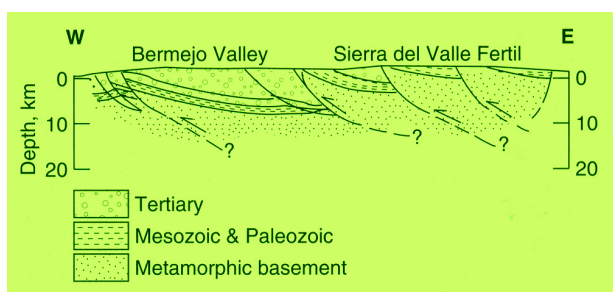
Συνήθως τα ιζήματα στις λεκάνες αυτές είναι

ελαφρά παραμορφωμένα φανερώνοντας είτε ότι η απόθεσή τους πραγματοποιήθηκε μετά το πέρας της κύριας φάσης παραμόρφωσης στο εσωτερικό της ορογενετικής ζώνης, είτε ότι αποτέθηκαν αρκετά μακριά και έτσι δεν επηρεάστηκαν από την παραμόρφωση. Τα ιζήματα που βρίσκονται κοντά στο ορεινό μέτωπο είναι συνήθως πτυχωμένα με ανοικτές πτυχές μεγάλης ακτίνας καμπυλότητας (> 1 km). Η πτύχωση γίνεται πιο έντονη πλησιάζοντας το μέτωπο της ορογενετικής ζώνης και σε σπάνιες περιπτώσεις οι πτυχές γίνονται ισοκλινείς και ανεστραμμένες με ασυμμετρία και φορά κατάκλισης (vergence) προς τη σταθερή πλατφόρμα. Σε ορισμένες επίσης περιπτώσεις περιορισμένης έκτασης ολισθήσεις τύπου βαρύτητας ή ολισθήσεις των επιφανειακών στρωμάτων δίνουν μια πιο σύνθετη εικόνα στις ακολουθίες αυτές.

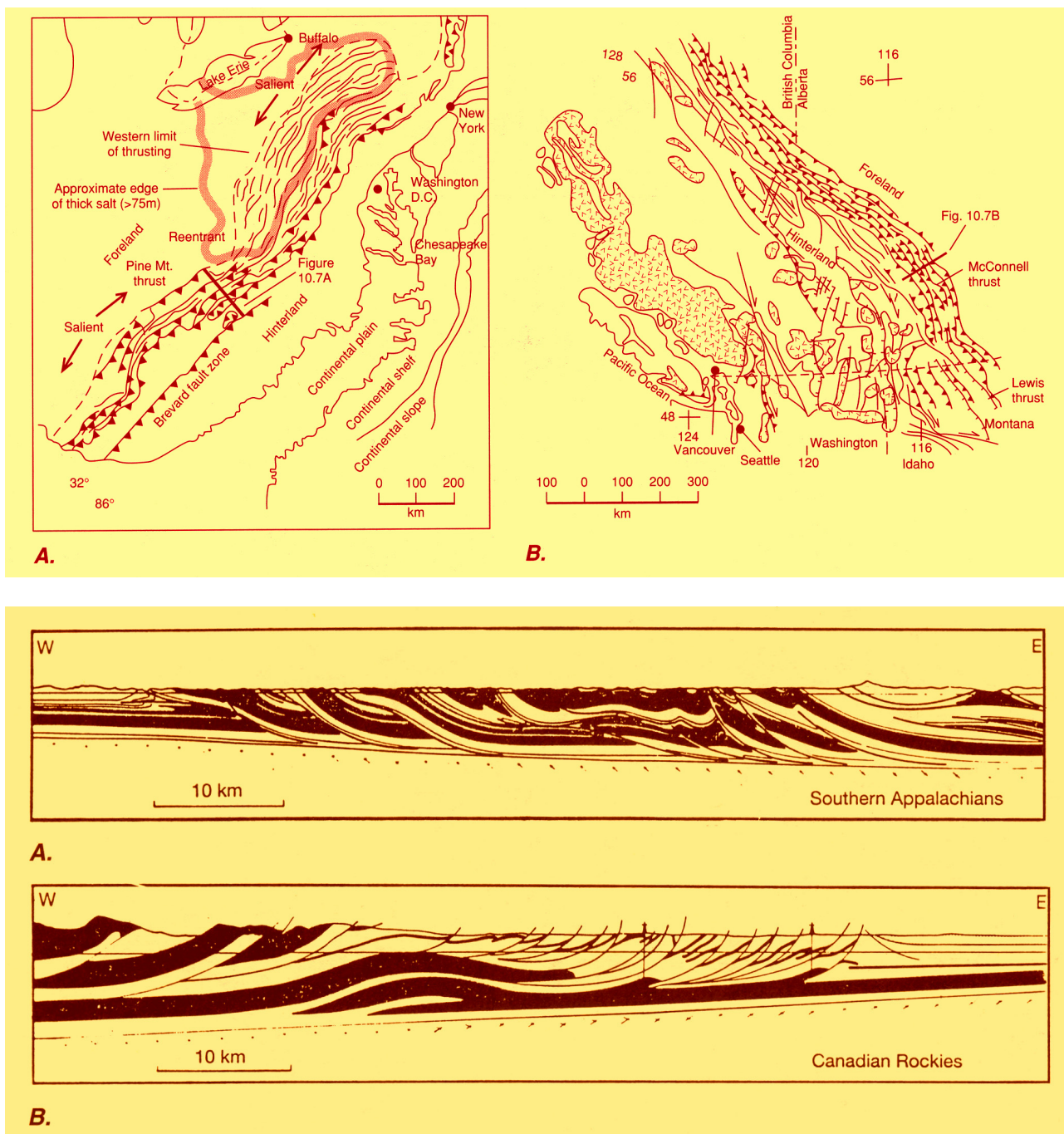
Σε ορισμένες περιοχές (π.χ. Κεντρικά Βραχώδη Όρη στις Η.Π.Α. και Pampean Ranges στις νότιες Άνδεις), μικρής ή μέσης κλίσης επωθήσεις, φέρνουν το υπόβαθρο πάνω στα ιζήματα των λεκανών αυτών. Γεωφυσικές διασκοπήσεις αποδεικνύουν ότι πρόκειται για μεγάλης κλίμακας δομές που φθάνουν μέχρι τη βάση του ηπειρωτικού φλοιού (Εικ. 9.10).

Η ζώνη Πτυχών-Επωθήσεων της Προχώρας

Πίσω από την εμπροσθο-λεκάνη (foredeep), προς το κέντρο της ορογενετικής ζώνης, αναπτύσσεται η ζώνη πτυχών και επωθήσεων της προχώρας (foreland fold-and-thrust belt). Η ζώνη αυτή (Εικ. 9.8), αποτελείται κυρίως από πτυχωμένα και λεπιωμένα ιζηματογενή πετρώματα του μειο-γεωσυγκλίνου που έχουν ωθηθεί μακριά και έξω από τον ορογενετικό πυρήνα, πάνω στη σταθερή προχώρα. Συ-



Εικόνα 9.10 Μικρής ή μέσης κλίσης επωθήσεις, στην περιοχή Pampean Ranges στις νότιες Άνδεις, φέρνουν το μεταμορφωμένο υπόβαθρο πάνω στα ιζήματα της εμπροσθο-λεκάνης.



Εικόνα 9.11 Χαρακτηριστικές δομές της ζώνης πτυχών-επωθήσεων, σε τεκτονικό χάρτη και τομή, από τα ορογενή των Απαλαχίων (Α) και της Αμερικάνικης Κορδιλιέρας (Β).

νήθως το μέτωπο της ζώνης αυτής των πτυχών και επωθήσεων βρίσκεται επωθημένο πάνω στα ιζήματα της εμπροσθο-λεκάνης, ορισμένα από τα οποία συμμετέχουν στο σύστημα των επωθήσεων. Το πάχος των ιζημάτων του μειο-γεωσυγκλίνου συνήθως αυξάνει προς τον πυρήνα της ορογενετικής ζώνης.

Στην Εικ. 9.11 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές δομές της ζώνης πτυχών-επωθήσεων από τα ορογενή των Απαλαχίων, της Αμερικάνικης Κορδιλιέρας και των Ιμαλαίων. Άλλα παραδείγματα από

την ορογενετική αλυσίδα του Ιούρα βόρεια των Άλπεων και από τις ζώνες πτυχών-επωθήσεων των Παπούα, της δυτικής Ταϊβάν και της οροσειράς του Ζάγκρος, έχουν παρουσιασθεί σε προηγούμενες εικόνες.

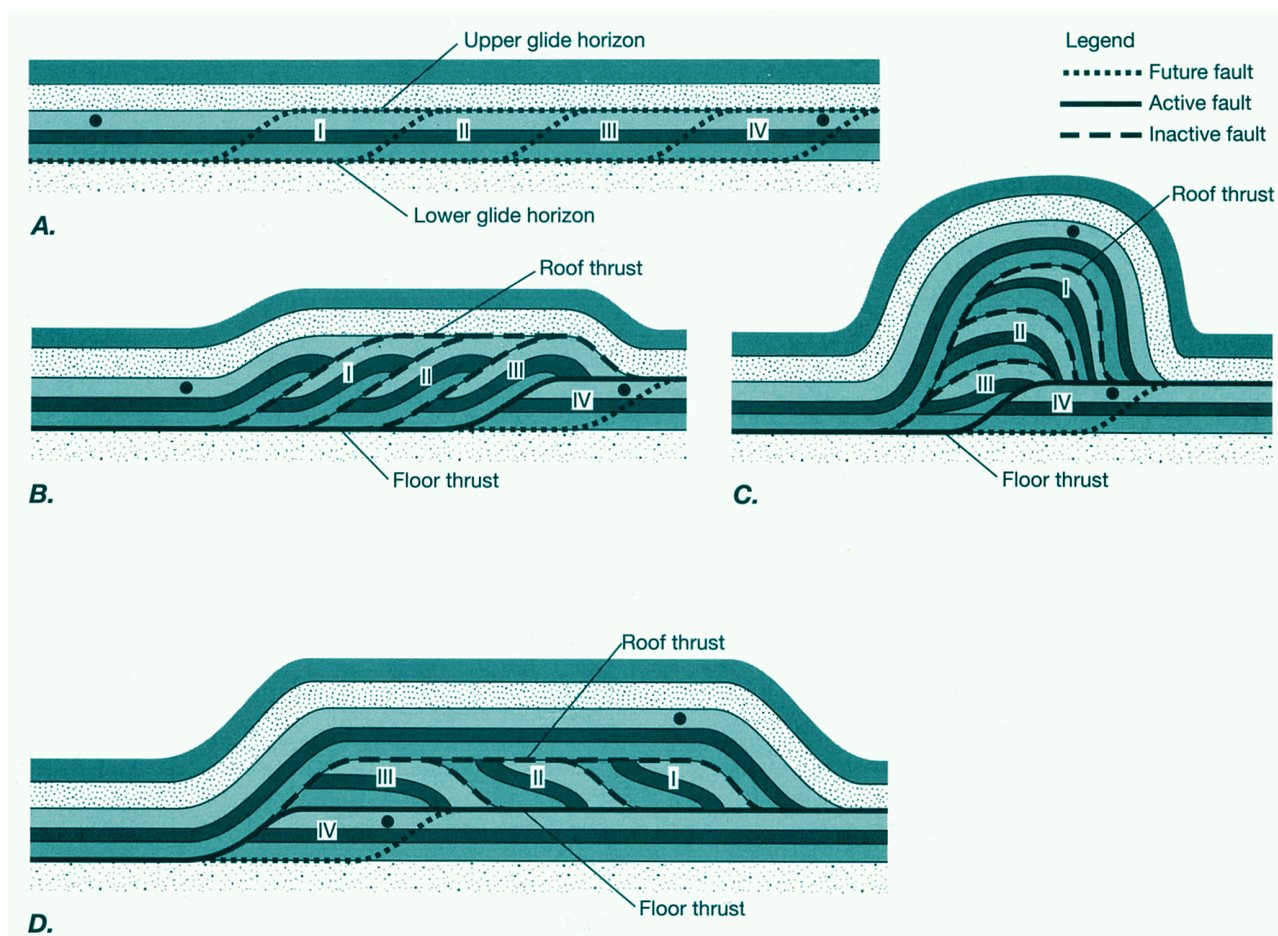
Ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό της τεκτονικής δομής των ζωνών αυτών είναι η ύπαρξη μιας μεγάλης επιφάνειας ολίσθησης βάσης (sole fault) που διαχωρίζει τα έντονα πτυχωμένα και λεπιωμένα πετρώματα από το απαραμόρφωτο υπόβαθρο. Η επιφάνεια αυτή εκτείνεται διαμέσου του συνόλου

της στρωματογραφικής ακολουθίας προς την προχώρα και δίνει στο σύνολο των έντονα παραμορφωμένων πετρωμάτων τη μορφή σφήνας (wedge-shape geometry). Οι επωθήσεις και οι λεπιώσεις που αναπτύσσονται πάνω από τη θεμελιώδη αυτή επιφάνεια παρυσιάζουν μια χαρακτηριστική γεωμετρία τύπου ramp-flat ενώ συχνές είναι και οι δομές duplex (Εικ. 9.12).

Ο ανάστροφος κινηματικός χαρακτήρας των επιφανειών αυτών οδηγεί σε βράχυνση και πάχυνση της σφήνας με αποτέλεσμα να δημιουργούνται

ράλληλα με τα ανεστραμμένα σκέλη των πτυχών. Όλες οι πτυχές αυτές είναι συνήθως ασύμμετρες με φορά κατάκλισης από τον ορογενετικό πυρήνα προς την προχώρα.

Στις περισσότερες ζώνες πτυχών και επωθήσεων η σχετική ηλικία των δομών φανερώνει ότι οι δομές που βρίσκονται πιο κοντά στον ορογενετικό πυρήνα αλλά και αυτές που βρίσκονται στα ανώτερα λήπη της παραμορφωμένης ακολουθίας είναι παλαιότερες από αυτές που βρίσκονται πιο κοντά στην προχώρα αλλά και στα βαθύτερα λήπη της



Εικόνα 9.12 Η χαρακτηριστική γεωμετρία των δομών duplex, που είναι συχνές στη ζώνη πτυχών-επωθήσεων και προέρχονται από τον προοδευτικό τεμαχισμό του άνω τεμάχους (footwall), από τις διαδοχικές λεπιώσεις και επωθήσεις. **A.** απαραμόρφωτη ακολουθία, **B.** δομή duplex με κλίση προς την ενδοχώρα, **C.** αντιθετική στοιβα καλυμμάτων και **D.** δομή duplex με κλίση προς την προχώρα. Οι επωθήσεις σημειώνονται με τις παχιές μαύρες γραμμές, οι γραμμές με τις στιγμές υποδεικνύουν τις μελλοντικές επωθήσεις, οι συνεχείς γραμμές δείχνουν τα ενεργά τμήματα των επωθήσεων, οι διακεκομμένες γραμμές τα ανενεργά τμήματα όπου η μετακίνηση έχει ήδη ολοκληρωθεί και οι μεγάλες μαύρες τελείες υποδεικνύουν τα ίδια σημεία σε κάθε διάγραμμα.

πτυχές τύπου ramp-fault. Για τον ίδιο λόγο πτυχές δημιουργούνται και πάνω από επίπεδες επιφάνειες ολίσθησης και αποκόλλησης. Ταυτόχρονα πολλές πτυχές, όταν η πτύχωση γίνει πολύ έντονη και δεν μπορεί να υποστεί άλλη βράχυνση, εξελίσσονται σε επωθήσεις και ανάστροφα ρήγματα, συνήθως πα-

ακολουθίας. Η διαπίστωση αυτή στη βιβλιογραφία είναι γνωστή με το όνομα προϊούσα παραμόρφωση (prograding deformation). Η παρουσία νεότερης ηλικίας λεπών και επωθήσεων στο τμήμα των παλαιών είναι γνωστή με το όνομα επωθήσεις εκτός-ακολουθίας (out-of-sequence thrusts).

Τα περισσότερα πετρώματα της ζώνης πτυχών-επωθήσεων είναι μη μεταμορφωμένα, με αποτέλεσμα τα απολιθώματα να είναι συχνά και η στρωματογραφία καλά γνωστή με καλούς συσχετισμούς ανάμεσα στα ρηξιτεμάχη των επωθήσεων και των λεπών. Σε ορισμένες περιοχές μπορεί να εμφανίζονται και πετρώματα χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης. Συνήθως εμφανίζουν ένα slaty cleavage που συνήθως τέμνεται από μια δεύτερη φύλλωση κατά διαστήματα (spaced foliation).

Προς τα εσωτερικά τμήματα της ζώνης πτυχών-επωθήσεων, δηλαδή πλησιέστερα προς τον ορογενετικό πυρήνα, στις επωθήσεις εμπλέκονται και κρυσταλλικά πετρώματα του υποβάθρου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως στις δυτικές Άλπεις, τα κρυσταλλικά αυτά πετρώματα αποτελούν πραγματικά το υπόβαθρο πάνω στο οποίο έχουν αποθεθεί τα ιζήματα του μειο-γεωσυσγκλίνου. Σε άλλες όμως περιπτώσεις δεν υφίσταται αυτή η σαφής σχέση λόγω του έντονου τεκτονισμού, όπου κρυσταλλικά πετρώματα και ιζήματα βρίσκονται σε τεκτονική σχέση. Άσχετα με την προέλευσή τους τα πετρώματα αυτά είναι έντονα παραμορφωμένα με μυλονιτικές ζώνες και πτυχές που πολλές φορές σχετίζονται με αντίστοιχες δομές (ρήγματα και πτυχές) του ιζηματογενούς καλύμματος.

Μια ακόμα χαρακτηριστική αλλαγή που συμβαίνει προς το εσωτερικό τμήμα του ορογενούς είναι αυτή της φάσης των ιζημάτων, όπου τα ρηχής φάσης ιζήματα του μειο-γεωσυσγκλίνου δίνουν τη θέση τους στα βαθειά ιζήματα του ευγεωσυσγκλίνου. Σε πολλές περιοχές η ζώνη αυτή ονομάζεται ζώνη φυλλιτών (slate belt, Εικ. 9.8), δεδομένου ότι χαρακτηρίζεται από μια μονότονη ακολουθία από σχίστες και φυλλίτες, συνήθως χωρίς απολιθώματα, γεγονός που δυσκολεύει τους στρωματογραφικούς προσδιορισμούς και τις συσχετίσεις.

Ο βαθμός μεταμόρφωσης της ζώνης αυτής είναι υψηλότερος και φθάνει μέχρι την κατώτερη πρασινοσχιστολιθική φάση. Παρατηρούνται διάφορες φάσεις πτυχώσεων, οι πτυχές είναι πολύ πιο κλειστές, ισοκλινείς ή και ανεστραμμένες, ενώ συχνά δημιουργούνται και μεγάλης κλίμακας πτυχές-καλύμματα (huge fold nappes). Χαρακτηριστική είναι επίσης η παρουσία μιας συνεχούς φύλλωσης (continuous foliation) που επικαλύπτεται από μια φύλλωση κατά διαστήματα (spaced foliation).

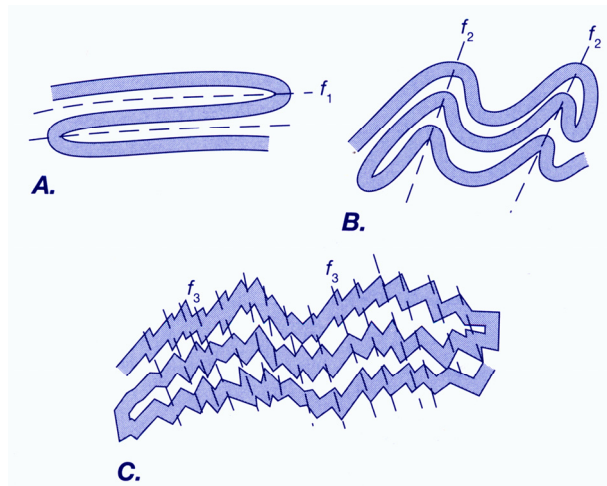
Σε πολλές ορογενετικές ζώνες παρατηρούνται οφιολιθικά καλύμματα που πολλές φορές καταλαμβάνουν εκτάσεις αρκετών εκατοντάδων τετραγωνικών χιλιομέτρων. Πολλά από αυτά τα καλύμματα έχουν μια σχετικά εσωτερική θέση, αφού είναι επωθημένα στη ζώνη των φυλλιτών ή στα εσωτερικότερα τμήματα της ζώνης πτυχών-επωθήσεων (π.χ. το τμήμα Άλπεις-Ιρανίδες του αλπικού συ-

στήματος). Σε ορισμένες περιπτώσεις τα οφιολιθικά καλύμματα απαντώνται και πολύ εξωτερικότερα, στο μπροστινό τμήμα της ζώνης πτυχών-επωθήσεων, επωθημένα σε πετρώματα της ηπειρωτικής πλατφόρμας.

Η Ζώνη του Κρυσταλλικού Πυρήνα

Ο κρυσταλλικός πυρήνας των ορογενετικών ζωνών (Εικ. 9.8), περιλαμβάνει μεταμορφωμένα και πλουτώνια πετρώματα που χαρακτηρίζονται από έντονη όλκιμη παραμόρφωση και τεκτονική ροή. Οι τεκτονικές δομές περιλαμβάνουν μεγάλης κλίμακας επωθήσεις, πτυχές-καλύμματα και άλλες σύνθετες παραμορφωτικές δομές. Τμήματα του κρυσταλλικού πυρήνα βρίσκονται συχνά επωθημένα πάνω στη ζώνη πτυχών-επωθήσεων, σχηματίζοντας μεγάλης έκτασης καλύμματα της τάξης των 100.000 – 250.000 km².

Η παρουσία πολλαπλών πτυχογόνων παραμορφωτικών φάσεων στα πετρώματα του κρυσταλλικού πυρήνα οδηγεί στη δημιουργία σύνθετων επικαλυπτόμενων δομών. Συνήθως αναγνωρίζεται μια ή περισσότερες γενεές από ισοκλινείς κατακεκλιμένες πτυχές (Εικ. 9.13), που επαναπτυχώνονται από μια γενεά ορθών πιο ανοικτών πτυχών, που με τη σειρά τους επαναπτυχώνονται από μια τελευταία γενεά λοξο-ζωνικών πτυχών (kink folds) ή οξύληκτων γωνιώδων πτυχών (chevron folds).



Εικόνα 9.13 Επικαλυπτόμενες διαδοχικές επαναπτυχώσεις που χαρακτηρίζουν τα κρυσταλλικά πετρώματα του πυρήνα των ορογενετικών ζωνών. **A.** Ισοκλινείς κατακεκλιμένες πτυχές, **B.** Ορθές κλειστές πτυχές. **C.** Λοξο-ζωνικές πτυχές (kink folds) ή οξύληκτες γωνιώδεις πτυχές (chevron folds).

Η γεωμετρία των δομών στη μικρή κλίμακα παρατήρησης είναι αντίστοιχη με αυτή στη μεγάλη κλίμακα και ως εκ τούτου η μελέτη μιας περιορισμένης κλίμακας εμφάνισης μπορεί να μας δώσει

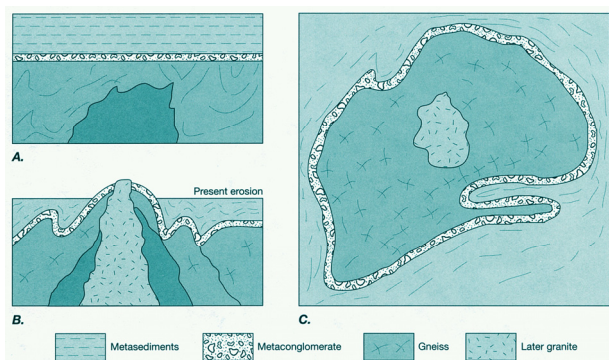
αρκετά στοιχεία για την παραμόρφωση ολόκληρης της περιοχής.

Τα πλουτώνια πετρώματα που δεν έχουν κάποιο είδος στρωμάτωσης, χαρακτηρίζονται συνήθως από φύλλωση και στις περιπτώσεις που η παραμόρφωση εντοπίζεται σε μεγάλης κλίμακας μυλονιτικές ζώνες, με υψηλό ποσοστό όλκιμης διάτμησης και καταπόνησης (strain), δίνουν δομές που χαρακτηρίζουν πολύ έντονη παραμόρφωση.

Σημειώνεται ότι τα πετρώματα του κρυσταλλικού πυρήνα έχουν συχνά πολύ διαφορετική προέλευση, γεγονός το οποίο αναλύεται στη συνέχεια.

Ιζηματογενή Πετρώματα και το Υπόβαθρό τους

Σε πολλές περιπτώσεις, όπως σε ορισμένα κρυσταλλικά καλύμματα των Άλπεων, τα κρυσταλλικά πετρώματα αντιπροσωπεύουν ιζήματα βαθιάς θάλασσας που συνοδεύονται από το εκλεπτυσμένο ηπειρωτικό κρυσταλλικό υπόβαθρο. Τα πετρώματα αυτά εμφανίζονται τώρα ως αμφιβολίτες και γενέσιοι. Στις περιπτώσεις αυτές τα πετρώματα του υποβάθρου αποτελούν τον πυρήνα των καλυμμάτων που περιβάλλεται από τα μετα-ιζηματογενή πετρώματα.

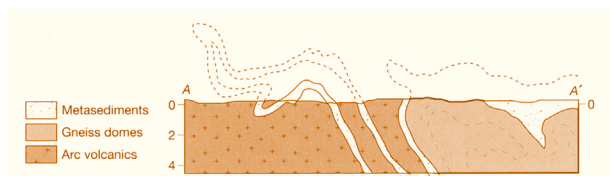


Εικόνα 9.14 Γενεσιακοί δόμοι με γρανιτικό πυρήνα που περιβάλλονται από μετα-ιζήματα. **A.** Ασύμφορη απόθεση ιζημάτων σε μετα-ιζήματα και διεισδύσεις. **B.** Παραμόρφωση όλης της ακολουθίας και διείσδυση νέου γρανιτικού σώματος. **C.** Χάρτης του γενεσιακού δόμου μετά την αποκάλυψή του από τη διάβρωση.

Στους βαθύτερους τεκτονικούς ορόφους μιας ορογενετικής ζώνης οι θερμοκρασίες μεταμόρφωσης μπορεί να φθάσουν ή να υπερβούν αυτές της ανάπτυξης και να δημιουργηθούν ανατηκτικοί γρανίτες. Τα πολύ όλκιμα αυτά πετρώματα είναι βαρυντικά ασταθή και ανέρχονται διαπειρικά σχηματίζοντας μεγάλους γενεσιακούς δόμους που στον πυρήνα μπορεί να περιέχουν τη γρανιτική διείσδυση (mantled gneiss) ενώ εξωτερικά περιβάλλονται από τα μετα-ιζηματογενή πετρώματα (metasedimentary envelope, Εικ. 9.14).

Ηφαιστειακά και Πυριγενή Πετρώματα και Συνοδά Ιζήματα

Στις ορογενετικές ζώνες είναι πολύ συχνό το φαινόμενο να υπάρχουν πολύ μεγάλες εκτάσεις που καταλαμβάνονται από πολύ υψηλής μεταμόρφωσης πετρώματα, συμπαγείς ή ταινιωτοί αμφιβολίτες ή γρανουλίτες, στα οποία δεν είναι δυνατόν να εξακριβωθεί η αρχική στρωματογραφική σχέση ή σχέση διείσδυσης που μπορεί να είχαν μεταξύ τους.



Εικόνα 9.15 Μια τυπική πολυπτυχωμένη ζώνη κρυσταλλικού πυρήνα από τα Β. Απαλάχια, όπου η μεταηφαιστειακή ακολουθία που συμμετέχει στη δομή πιθανά αντιπροσωπεύει ένα σύμπλεγμα νησιωτικού τόξου που λειτουργούσε στις αρχές του Παλαιοζωϊκού.

Τυπικές εμφανίσεις τέτοιων πετρωμάτων στα Απαλάχια (Εικ. 9.15) περιλαμβάνουν μεταιζήματα, μεταηφαιστειακά πετρώματα και έναν αριθμό γενεσιακών δόμων. Χαρακτηρίζονται από πολύπλοκες τεκτονικές δομές με αρκετές παραμορφωτικές φάσεις, όπως ακριβώς αναφέρθηκε για τα πετρώματα του μειο-γεωσυγκλίνου στα ανωτέρω.

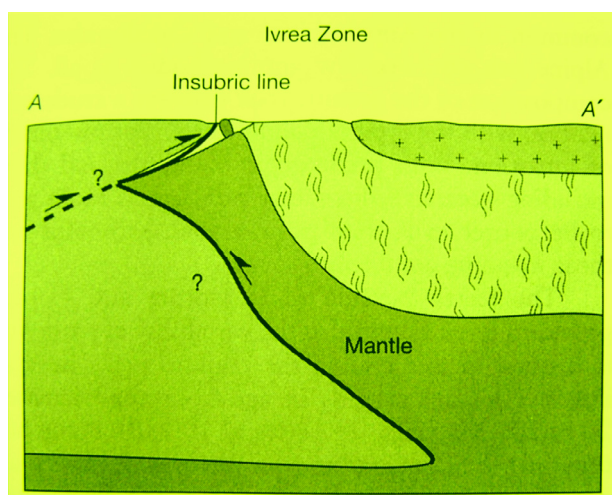
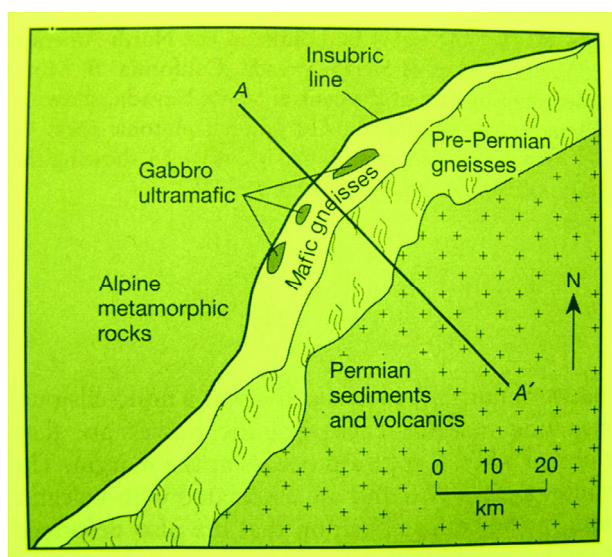
Τέτοιου τύπου ακολουθίες ερμηνεύονταν γενικά ως ευ-γεωσυγκλινικές ακολουθίες. Τώρα όμως έχει γίνει πλέον κατανοητό ότι αποτελούν ηπειρωτικά ιζήματα, ιζήματα κλιτύων με ηφαιστειακά πετρώματα και ηφαιστειο-ιζηματογενείς ακολουθίες, που σχετίζονται με ηπειρωτικά ηφαιστειακά τόξα, ωκεανικά τόξα και ακολουθίες μεσο-ωκεάνειας ράχης, και εξωθήθηκαν στη θέση αυτή κατά τη διαδικασία της σύγκρουσης.

Μεταμορφωμένες Οφιολιθικές Ακολουθίες

Οι οφιολιθικές ζώνες είναι ένα χαρακτηριστικό πολλών κρυσταλλικών πυρήνων και σε πολλές περιπτώσεις είναι έντονα μεταμορφωμένες και παραμορφωμένες με διαδοχικές ισοκλινείς μεγα-πτυχές. Στην υψηλού βαθμού μεταμόρφωση και έντονη παραμόρφωση οι pillow lavas μετατρέπονται σε πρασινοσχιστόλιθους και αμφιβολίτες, οι βασικές φλέβες και οι πλουτωνίτες σε συμπαγείς ή ταινιωτούς αμφιβολίτες και οι περιδοτίτες στη χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση σε σερπεντινίτες και στην υψηλού πάλι σε περιδοτίτες. Ο αρχικός μανδυακός ιστός επικαλύπτεται ή εξαφανίζεται ολοσχερώς από τη μεταγενέστερη παραμόρφωση.

Κατώτερος Ηπειρωτικός Φλοιός και Μανδύας

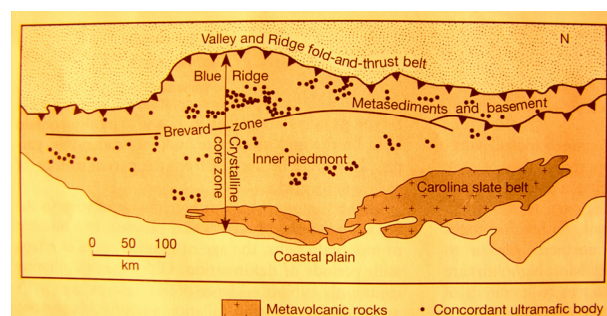
Σε ορισμένες περιοχές των ορογενετικών ζωνών που σχετίζονται με το φαινόμενο της σύγκρουσης και η ανοδική κίνηση του ορογενούς έχει φθάσει σε ακραίες τιμές, παρατηρούνται υψηλής μεταμόρφωσης χαλαζιοαστριούχοι γνεύσιοι να υπέρκεινται περιδοτιτών. Η Ivrea Zone στις Άλπεις αποτελεί ένα καλό τέτοιο παράδειγμα (Εικ. 9.16). Πιθανά αντιπροσωπεύουν το όριο μεταξύ του κατώτερου ηπειρωτικού φλοιού και του υποκείμενου μανδύα (δηλαδή τη MOHO). Όπως και οι οφιολιθικές ακολουθίες, παρουσιάζουν ένα παλαιό μεταμορφικό και παραμορφωτικό ιστό που επικαλύπτεται από ένα νεότερο.



Εικόνα 9.16 Αποκάλυψη του κατώτερου ηπειρωτικού φλοιού και μανδύα στην Ivrea Zone στις Άλπεις. Η τομή βασίζεται σε γεωλογικά και γεωφυσικά δεδομένα και δείχνει την επώθηση του μανδύα στο ηπειρωτικό χείλος, καθώς και την αντίθετης κατεύθυνσης επώθηση (backthrust).

Μεγάλες Εμφανίσεις Γνευσίων με Πλήθος Υπερβασικών Σωμάτων

Ορισμένοι κρυσταλλικοί πυρήνες χαρακτηρίζονται από την παρουσία αμφιβολιτικής ή γρανουλιτικής φάσης γνευσίων και σχιστολίθων, που περιέχουν πλήθος υπερβασικών (αμεταμόρφωτων) σωμάτων, της τάξης του 1 km, που αποτελούνται από περιδοτίτες, πυροξενίτες, δουνίτες ή τα σερπεντινιωμένα αντίστοιχά τους. Τα Νότια Απαλάχια αποτελούν ένα τυπικό τέτοιο παράδειγμα (Εικ. 9.17), αλλά αντίστοιχα παραδείγματα υπάρχουν και από τις Άλπεις ή τις Καλιδονίδες. Τα σώματα αυτά, αλλά και η εσωτερική τους δομή, είναι προσανατολισμένα παράλληλα με τον κύριο τεκτονικό ιστό.

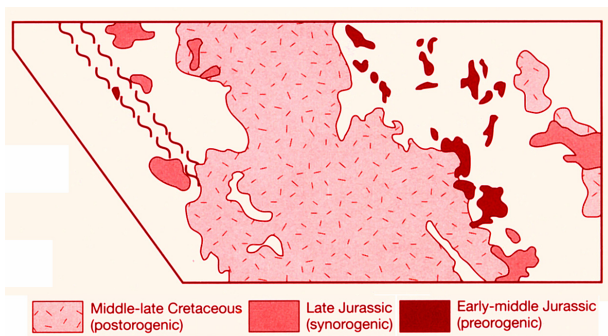


Εικόνα 9.17 Υπερβασικά σώματα στον κρυσταλλικό πυρήνα των Νοτίων Απαλαχίων.

Η ερμηνεία των δομών αυτών αποτελεί ένα από τα μεγάλα προβλήματα των ορογενετικών ζωνών. Είναι άγνωστος τόσο ο μηχανισμός που ενσωμάτωσε τα υπερβασικά στα μεταμορφωμένα πετρώματα, όσο και ο πρωτόλιθος των μεταμορφωμένων. Έχουν δοθεί διάφορες πιθανές ερμηνείες, όπως: α) αντιπροσωπεύουν αποκαλύψεις του κατώτερου φλοιού στον οποίο ενσωματώθηκε (άγνωστο πως) μανδυακό υλικό, β) αντιπροσωπεύουν υπολείμματα οφιολιθικών ή μανδυακών ζωνών υποβύθισης, που αποκόπηκαν από την ισχυρή παραμόρφωση και μεταμόρφωση και δημιούργησαν τα γνευσιακά πετρώματα και γ) αντιπροσωπεύουν βασικά και υπερ-βασικά ηφαιστειακά πετρώματα που διείσδυσαν σε ιζήματα ηπειρωτικού περιθωρίου κατά το στάδιο της ταφρογένεσης (rifting).

Γρανιτικοί Βαθόλιθοι

Οι γρανιτικοί βαθόλιθοι (γρανίτες-διορίτες), καταλαμβάνουν συχνά πολύ μεγάλες εκτάσεις στις ορογενετικές ζώνες και συχνά χαρακτηρίζουν τον κρυσταλλικό πυρήνα. Αντιπροσωπεύουν πολλά σώματα της τάξης των 10άδων ή 100άδων km², όπως π.χ. στην Αμερικάνικη Κορδιλιέρα που εκτείνονται από την Αλάσκα μέχρι το Μεξικό. Παρουσιάζουν



Εικόνα 9.18 Προ-, συν- και μετα-ορογενετικοί γρανίτες στην Κορδιλιέρα της Β. Αμερικής (Σιέρρα Νεβάδα, Καλιφόρνια), σύμφωνα με τα ραδιοχρονολογικά δεδομένα και την παραμόρφωσή τους.

σημαντικές διαφορές τόσο στον τύπο του πετρώματος, όσο και στο βαθμό παραμόρφωσης και το βάθος τοποθέτησης.

Απαντώνται τόσο Ι-τύπου γρανίτες, που προέρχονται από μερική τήξη ένυδρου μανδουακού υλικού ή κρυσταλλικών πυριγενών πετρωμάτων, όσο και S-τύπου γρανίτες, από μερική τήξη ιζηματογενών πετρωμάτων. Ο τύπος του πετρώματος που κυριαρχεί διαφέρει σημαντικά στις διάφορες ορογενετικές ζώνες και εξαρτάται άμεσα από τα υπόλοιπα πετρώματα της ορογενετικής ζώνης. Π.χ. χαλαζιακοί διορίτες και γρανοδιορίτες κυριαρχούν στο δυτικό τμήμα της Κορδιλιέρας της Β. Αμερικής και τις Άνδεις, οι γρανίτες είναι πιο συχνόι στα Απαλάχια και τις Καλιδονίδες, ενώ οι Άλπεις στο σύνολό τους περιλαμβάνουν μόνο λίγα γρανιτικά σώματα.

Η τοποθέτηση των γρανιτικών σωμάτων, σε σχέση με τις παραμορφωτικές φάσεις του ορογενούς, ποικίλει επίσης κατά περίπτωση. Ανάλογα με

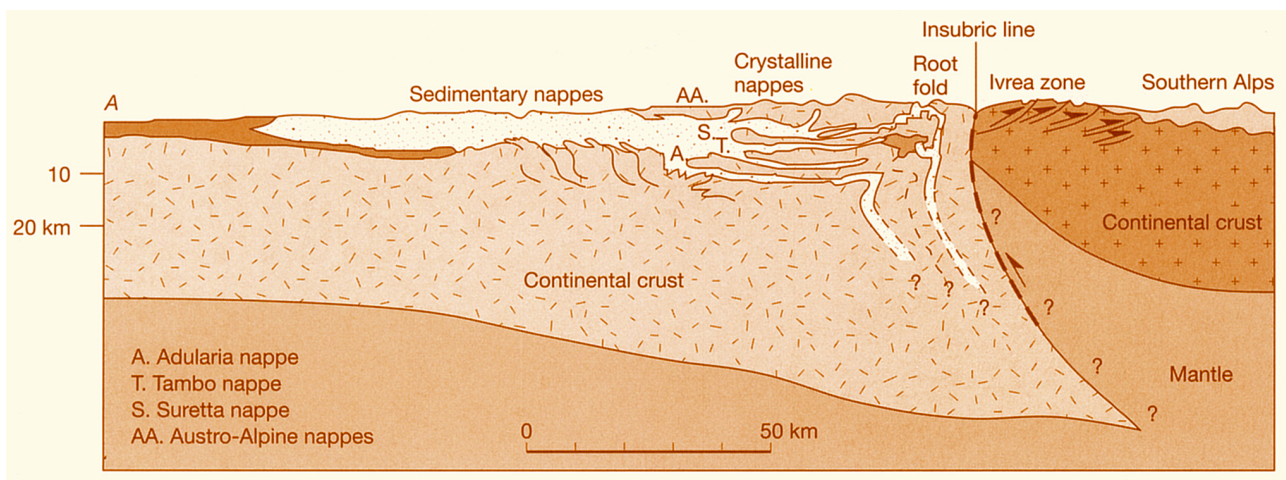
το αν παρουσιάζουν παραμόρφωση, τον τύπο της παραμόρφωσης και την ανάπτυξη τεκτονικού ιστού (φυλλώσεις, πτυχές κλπ.), διακρίνονται σε προ-συν- και μετα-ορογενετικούς γρανίτες (Εικ. 9.18).

Οι τύποι αυτοί των γρανιτών βρίσκονται σε άμεση συσχέτιση με το στάδιο της τεκτονικής των πλακών κατά το οποίο δημιουργούνται. Έτσι οι προ-ορογενετικοί Ι-τύπου γρανίτες είναι το αποτέλεσμα τυπική μαγματικής δραστηριότητας από ένα αναλίσκόμενο περιθώριο πριν τη σύγκρουση. Η παραμόρφωσή τους λαμβάνει χώρα κατά τη σύγκρουση. Οι συν- και μετα-ορογενετικοί S-τύπου γρανίτες είναι συνήθως το αποτέλεσμα της μερικής τήξης του κατώτερου ηπειρωτικού φλοιού που έχει παχυνθεί και δημιουργήσει ρίζα από τη σύγκρουση. Οι μετα-ορογενετικοί αλκαλικοί γρανίτες σχηματίζονται μετά από όλες τις ορογενετικές φάσεις και πιθανά αντανakλούν τα αρχικά στάδια της επακολουθούσας ηπειρωτικής ταφροποίησης.

Οι Δομές Μεγάλου Βάθους του Κρυσταλλικού Πυρήνα

Ο κρυσταλλικός πυρήνας των ορογενετικών ζωνών υπέρκειται σε γενικές γραμμές των ριζών του ορογενούς, όπου ο φλοιός παρουσιάζει το μέγιστο πάχος του. Ως εκ τούτου λοιπόν, οι μεγάλου βάθους δομές του κρυσταλλικού πυρήνα θα σχετίζονται με τις ρίζες του ορογενούς. Τα ερωτήματα που τίθενται είναι: Ποιος είναι ο τύπος των τεκτονικών δομών σε αυτά τα βάθη; Πόσο βαθιά εκτείνονται οι μεγα-δομές που παρατηρούνται σήμερα στην επιφάνεια;

Για τα περισσότερα ορογενετικά συστήματα οι μεγάλης κλίμακας πτυχές είναι συνήθως κατακεκλιμένες και οι επωθήσεις και επιπτώσεις πολύ



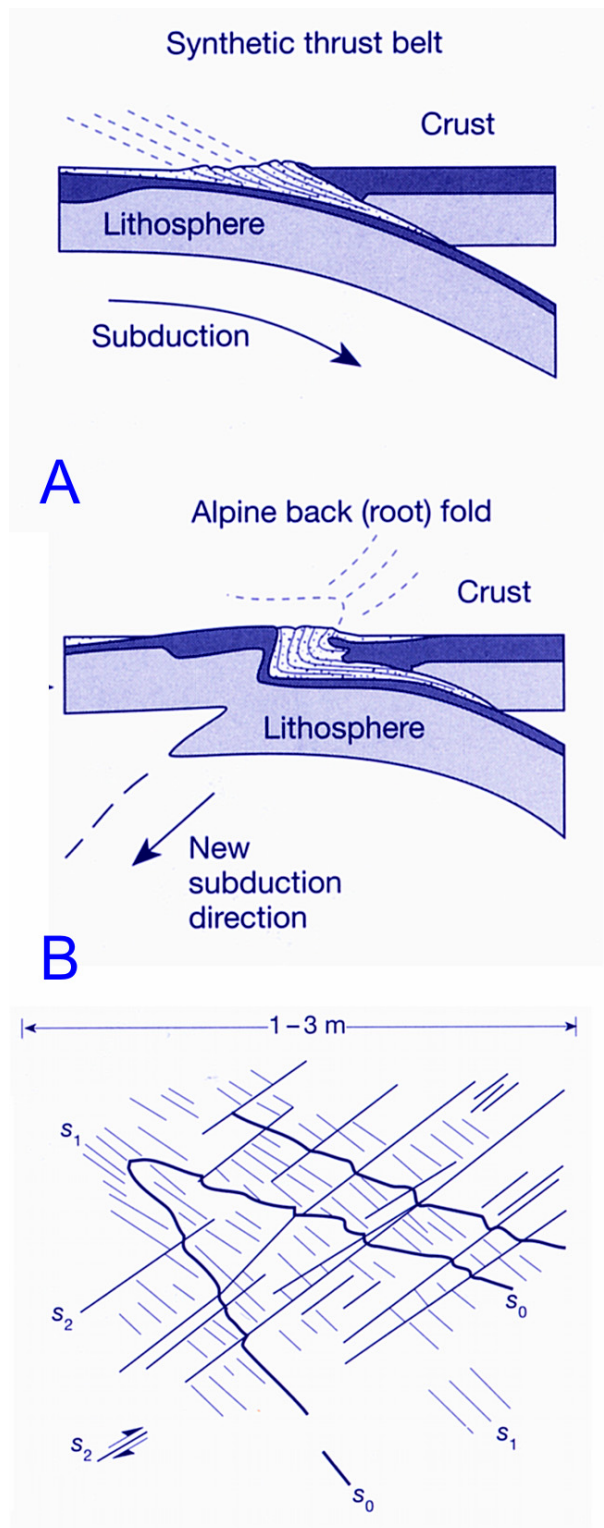
Εικόνα 9.19 Χαρακτηριστική τομή στις Ελβετικές Άλπεις που παρουσιάζει χαρακτηριστικές μεγάλου βάθους και μεγάλης κλίσης και κλίμακας δομές και back-folds που παραμορφώνουν τυπικά υποοριζόντια κατακεκλιμένα πτυχές-καλύμματα.

μικρής κλίσης (Εικ. 9.19). Κατά θέσεις, όμως, οι mega-δομές αυτές παρουσιάζουν πιο μεγάλες κλίσεις. Οι mega-πτυχές είναι ορθές, κατακόρυφες ή ελαφρά κεκλιμένες, οι επωθήσεις είναι σχεδόν κατακόρυφες, γραμμώσεις με μεγάλη βύθιση παρατηρούνται συχνά και κατά θέσεις η όλκιμη καταπόνηση (ductile strain), γίνεται πολύ υψηλή. Συχνά οι περιοχές με τις δομές αυτές ταυτίζονται και αντιστοιχούν σε ζώνες mega-διάτμησης (Εικ. 9.19). Οι συνθήκες αυτές, όπως περιγράφησαν, έχουν ως αποτέλεσμα οι τεκτονικές δομές και οι τεκτονικές ενότητες να μην είναι συνεχείς, εγκάρσια στη γενική τεκτονική διεύθυνση της περιοχής.

Σχετικά πρόσφατες έρευνες στην περιοχή των Ελβετικών Άλπεων, στην ευρύτερη περιοχή της μεγάλης κλίμακας και κλίσης τεκτονικής ζώνης Insubric Line (Εικ. 9.19, βλπ. και Εικ. 9.16), που παρουσιάζει όλα τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν ανωτέρω, έχουν δείξει ότι στην πραγματικότητα αντιπροσωπεύει το σκέλος μιας μεγάλης κλίμακας δευτέρης γενιάς mega-πτυχής που παραμορφώνει τυπικές υποοριζόντιες επωθήσεις και καλύμματα. Επειδή οι mega-πτυχές αυτού του τύπου παρουσιάζουν αντίθετη ασυμμετρία (φορά κατάκλισης, vergence), αναφέρονται συνήθως και ως back-folds. Η ανακριβής παλαιότερη άποψη θεωρούσε ότι οι περιοχές με τις χαρακτηριστικές αυτές μεγάλης κλίσης mega-δομές, αντιπροσώπευαν τις ρίζες των καλυμμάτων που, λόγω ακραίας οριζόντιας βράχυνσης, διέφυγαν πλευρικά.

Χαρακτηριστικές back-fold mega-δομές μπορεί να αναπτύσσονται ως το αποτέλεσμα της σύγκρουσης και της επακόλουθης αλλαγής της φοράς βύθισης της ζώνης υποβύθισης, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικ. 9.20 Α). Οι μεγάλης κλίμακας αυτές μεταβολές στην γεωμετρία της παραμόρφωσης αντανakλώνται τις περισσότερες φορές και στις μικρής κλίμακας δομές. Στην Εικ. 9.20 Β φαίνεται χαρακτηριστικά η υπέρθεση των S_2 δομών, που σχετίζονται με το back-folding και παρουσιάζουν ασυμμετρία και φορά κατάκλισης προς τα δεξιά, επί των S_1 παλαιότερων δομών που παρουσιάζουν αντίθετη ασυμμετρία και φορά κατάκλισης προς τα αριστερά. Εναλλακτικά, μεγάλης κλίμακας back-folds και αντίστοιχες μικροδομές μπορεί να είναι το αποτέλεσμα της διαφορικής ισοστατικής ανύψωσης της ζώνης του πυρήνα σε σχέση με τις πλευρές του ορογενούς, λόγω μιας συνεχόμενης οριζόντιας βράχυνσης.

Τα βάθη μέχρι τα οποία φθάνουν οι δομές αυτές φαίνεται να διαφέρουν από ορογενές σε ορογενές, όπως έχουν δείξει οι σεισμικές διασκοπήσεις. Στις Άλπεις οι δομές back-fold εκτείνονται σε βαθείς τεκτονικούς ορόφους. Αντίθετα στα Απαλάχια η ζώνη του κρυσταλλικού πυρήνα είναι αλλόχθονη και επικάθεται τεκτονικά σε μια ακολουθία με επί-



Εικόνα 9.20 Συσχετισμός ανάμεσα στη γεωμετρία της ζώνης υποβύθισης, τις τυπικές ζώνες υποοριζόντιων καλυμμάτων και τις μεγάλης κλίσης δομές τύπου back-fold. **A.** Πιθανό μοντέλο για τη δημιουργία back-fold, με τη δημιουργία των τυπικών επωθήσεων κατά τη σύγκρουση και την επακόλουθη δημιουργία back-fold με την αναστροφή της πολικότητας της ζώνης υποβύθισης. **B.** Μικροδομές από τη ρίζα του ορογενούς με δύο παραμορφωτικά επεισόδια S_1 και S_2 , που αντανakλούν τα τυπικά καλύμματα και το back-folding αντίστοιχα.

πεδους ανακλαστήρες, που μπορεί να αντιπροσωπεύουν ελαφρά παραμορφωμένα ιζήματα, αντίστοιχα με αυτά της επαρχίας Valley and Ridge. Το αποτέλεσμα αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ολόκληρη η ορογενετική αλυσίδα πρέπει να είναι αλλόχθονη και να μετακινήθηκε εκατοντάδες km πάνω από ένα αυτόχθονο ηπειρωτικό υπόβαθρο. Στην περίπτωση αυτή ερωτήματα για τον χαρακτήρα των κινήσεων και των δυνάμεων που προκάλεσαν αυτές τις τεκτονικές μετακινήσεις, παραμένουν ακόμα ανερμήνευτα.

Μεγάλης Γωνίας Ρηξιγενείς Ζώνες

Μεγάλης γωνίας (κλίσης) ρηξιγενείς ζώνες, που διασχίζουν και τέμνουν όλες τις άλλες δομές, παρατηρούνται σε κάθε ορογενετικό σύστημα. Το μήκος είναι μεγάλο και κυμαίνεται μεταξύ 10άδων ή 100άδων km. Το πλάτος τους, επίσης, διαφέρει κατά περίπτωση και κυμαίνεται από λίγες 100άδες μέτρα έως και 10 km, αν και συνήθως είναι σχετικά στενές και εντοπίζονται από μια χαρακτηριστική και καλά αναπτυγμένη μυλονιτική ζώνη. Αναπτύσσονται, σε γενικές γραμμές, σχετικά παράλληλα με τη γενική διεύθυνση του ορογενούς και αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλης κλίμακας τεκτονικό όριο κατά μήκος της ορογενετικής ζώνης.

Όταν οι ζώνες αυτές διαχωρίζουν τεμάχια με ίδια γεωλογική ιστορία, τότε μπορούν να υπολογισθούν οι μετατοπίσεις. Από κινηματική άποψη στην ίδια περιοχή μπορεί να εντοπίζονται ζώνες με κίνηση τόσο κατά κλίση όσο και οριζόντια.

Όταν χωρίζουν ρηξιτεμάχια είτε με διαφορετική μεταμορφική ιστορία (ηλικία και βαθμός μεταμόρφωσης), είτε με διαφορετική παλαιογεωγραφική ή γεωλογική ιστορία, δεν μπορούν να υπολογισθούν μετατοπίσεις. Συνήθως τέτοιες ζώνες αντιπροσωπεύουν ραφές (sutures).

Τα πετρώματα σε αυτού του τύπου τις ζώνες διάτμησης παρουσιάζονται ισχυρά ανακρυσταλλωμένα, με μυλονιτικό χαρακτήρα και σε γενικές γραμμές με ένα βαθμό μεταμόρφωσης συνήθως μικρότερο, αλλά κατά περιοχές και μεγαλύτερο, από τα γειτονικά πετρώματα. Στις περισσότερες θέσεις μια ποικιλία λιθολογικών τύπων εμφανίζεται με τη μορφή μυλονιτικών φακών. Ορυκτολογικές γραμμώσεις και πτυχές εντοπίζονται συχνά, με γεωμετρία οριζόντια ή κεκλιμένη, ανάλογα με την κινηματική της ζώνης.

Ο χρόνος δημιουργίας των ζωνών αυτών ποικίλει και η γεωλογική ιστορία τους είναι σύνθετη. Ορισμένες αποτελούν νέας ηλικίας ρηξιγενείς ζώνες και τέμνουν όλες τις προηγούμενες δομές. Άλλες ακολουθούν τη γενική κατεύθυνση των δομών των γειτονικών πετρωμάτων και είναι δύσκολο να συσχετισθούν χρονικά. Πλησίον των ζωνών αυτών

τα αξονικά επίπεδα των πτυχών αποκλίνουν από τη γενική επικρατούσα διεύθυνση και τείνουν να γίνουν παράλληλα με τις ζώνες αυτές.

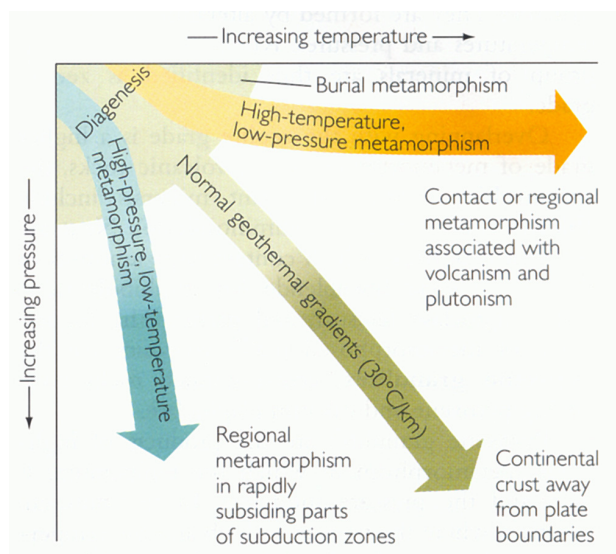
Η λεπτομερής μελέτη ορισμένων από τις ζώνες αυτές δείχνει τις περισσότερες φορές μια πολύπλοκη εξέλιξη με διαφορετικής φοράς και μεγέθους κινήσεις κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Αναφέρονται τρία χαρακτηριστικά παραδείγματα. α) Η Brevard zone στα νότια Απαλάχια, είναι μια ζώνη με μήκος της τάξης των 500 km. Παρουσιάζει μια κινηματική κατά κλίση στην αρχή της εξέλιξής της και στη συνέχεια μετατρέπεται σε δεξιόστροφη ζώνη οριζόντιας ολίσθησης. β) Η τεκτονική ζώνη Insubric line στις Άλπεις χωρίζει την Ivrea zone από την Peninic zone. Και η ζώνη αυτή ξεκινάει την ιστορία της ως κατά κλίση ρήγμα και στη συνέχεια εξελίσσεται σε μια δεξιόστροφη ζώνη οριζόντιας ολίσθησης. γ) Το σύστημα ρηγμάτων Mother Lode στη Σιέρρα Νεβάδα στην Καλιφόρνια, στα αρχικά στάδια λειτουργεί με τη μορφή των επωθήσεων και κίνηση από τα δυτικά προς τα ανατολικά, στη συνέχεια πτυχώνεται και επαναδραστηριοποιείται κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου back-folding με κινηματική από τα ανατολικά προς τα δυτικά για να επαναδραστηριοποιηθεί και πάλι ως δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης ή κανονικό ρήγμα. Τόσο η ρηξιγενής ζώνη Insubric line, όσο και η Mother Lode, αντιπροσωπεύουν υπολείμματα ραφών των ορογενετικών συστημάτων στα οποία ανήκουν.

9.4 Μεταμόρφωση και Τεκτονική στις Ορογενετικές Ζώνες

Τα πετρώματα που καταλαμβάνουν τα κεντρικά τμήματα των ορογενετικών ζωνών είναι μεταμορφωμένα. Η κατανομή των μεταμορφικών ζωνών στα ορογενετικά συστήματα δεν είναι τυχαία αλλά παρουσιάζει μια συμμετρία έτσι ώστε τα υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης πετρώματα να βρίσκονται στον πυρήνα και τα αμεταμόρφωτα να καταλαμβάνουν τις εξωτερικότερες θέσεις στις πλευρές του ορογενούς.

Οι ορυκτολογικές παραγενέσεις που αναπτύσσονται στις μεταμορφικές ζώνες αντανακλούν τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (βάθους) τη στιγμή της μεταμόρφωσης. Με βάση λοιπόν τις ορυκτολογικές παραγενέσεις διακρίνονται οι διάφοροι τύποι μεταμόρφωσης (Εικ. 9.21), που λαμβάνουν χώρα κάτω από συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλών πιέσεων (HT/LP, Buchan type), κανονικών πιέσεων και θερμοκρασιών (NP/NT, Barrovian type) και υψηλών πιέσεων χαμηλών θερμοκρασιών (HP/LT, Blue-Schist type).

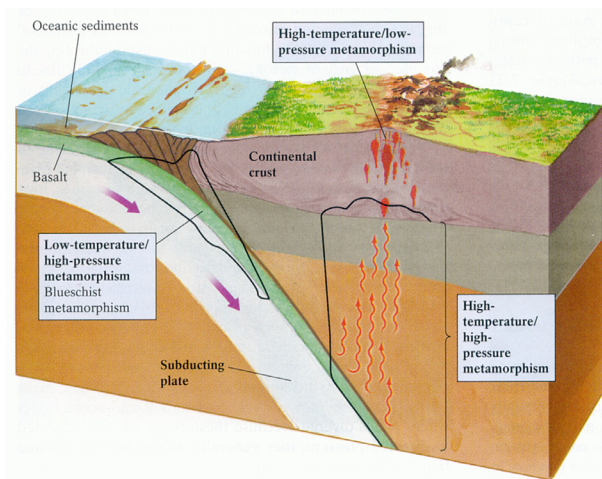
Τα διαγράμματα θερμοκρασίας / βάθους που περιγράφουν αυτούς τους τύπους μεταμόρφωσης, αντιπροσωπεύουν στην ουσία το αποτέλεσμα διαφορετικών τεκτονικών συνθηκών.



Εικόνα 9.21 Οι τύποι της μεταμόρφωσης στις ορογενετικές ζώνες. Κυανοσχιστολιθικού τύπου HP/LT μεταμόρφωση που συνδέεται με τις ζώνες υποβύθισης, μέσων πιέσεων και θερμοκρασιών (NP/NT Barrovian type) μεταμόρφωση που συνδέεται με τις ζώνες σύγκρουσης και HT/LP (Buchan type) μεταμόρφωση σε περιβάλλον διεισδύσεων και ηφαιστειακών τόξων.

Η υψηλών θερμοκρασιών χαμηλών πιέσεων μεταμόρφωση (HT/LP) υποδηλώνει ότι οι θερμοκρασίες έχουν φθάσει τιμές μεγαλύτερες από τη γεωθερμική βαθμίδα. Οι συνθήκες αυτές επιτυγχάνονται στην άλω επαφής γύρω από ρηχές διεισδύσεις πυριγενών πετρωμάτων σε περιβάλλον ηφαιστειακού τόξου. Η μεταμόρφωση αυτού του τύπου μπορεί να είναι είτε προ-ορογενετική, που στη συνέχεια βέβαια επικαλύπτεται από την επακόλουθη NP/NT Barrovian type μεταμόρφωση, είτε μετα-ορογενετική, που επικαλύπτει όλα τα παλαιότερα μεταμορφικά γεγονότα.

Η κυανοσχιστολιθική HP/LT μεταμόρφωση υποδηλώνει ότι οι θερμοκρασίες ήταν σημαντικά μικρότερες από αυτές της τυπικής γεωθερμικής βαθμίδας. Αυτή η περίπτωση συμβαίνει στις ζώνες σύγκλισης όπου τα πετρώματα μεταφέρονται γρήγορα από την επιφάνεια σε μεγάλα βάθη και δεν προλαβαίνουν να προσαρμοσθούν στις νέες θερμοκρασιακές συνθήκες. Η μεταμόρφωση αυτού του τύπου συμβαίνει στα αρχικά στάδια της ορογένεσης και είναι σχετικά σπάνια στα περισσότερα ορογενετικά συστήματα. Όπου υπάρχει συνήθως επικαλύπτεται από μια νεότερη NP/NT, Barrovian type μεταμόρφωση. Όταν η HT/LP, Buchan type

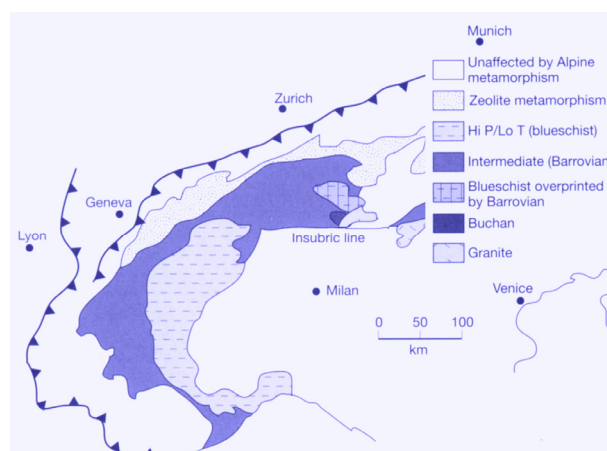


Εικόνα 9.22 Μεταμορφικές ζώνες κατά ζεύγη (paired metamorphic belt), όπου κυανοσχιστολιθικού τύπου HP/LT μεταμόρφωση και Buchan type HT/LP μεταμόρφωση συμβαίνουν ταυτόχρονα.

μεταμόρφωση είναι παρούσα μαζί με την HP/LT, κυανοσχιστολιθικού τύπου μεταμόρφωση, μπορεί να συνιστούν αυτό που στη βιβλιογραφία είναι γνωστό ως μεταμορφικές ζώνες κατά ζεύγη (paired metamorphic belt, Εικ. 9.22).

Η Barrovian type NP/NT μεταμόρφωση καταδεικνύει μια κανονική γεωθερμική βαθμίδα, είναι η πιο διαδεδομένη στις ορογενετικές ζώνες και για το λόγο αυτό αναφέρεται ως η κλασική περίπτωση μεταμόρφωσης εκτενούς περιοχής (regional metamorphism).

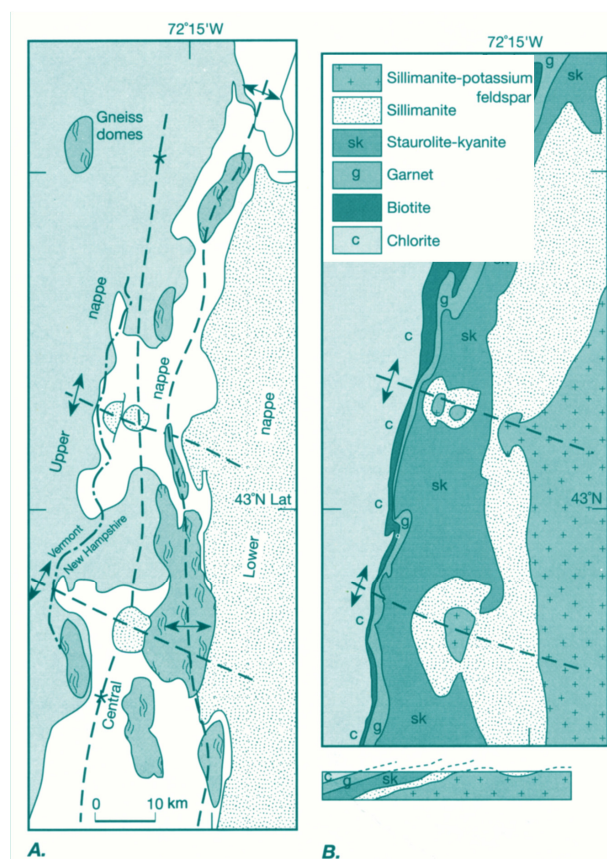
Οι Άλπεις αποτελούν ένα καλό παράδειγμα όπου φαίνεται η σχέση ανάμεσα στους διάφορους τύπους μεταμόρφωσης (Εικ. 9.23). Η κυανοσχιστολιθικού τύπου μεταμόρφωση, ηλικίας 70-85 Ma, επικαλύπτεται κατά περιοχές από την ηλικίας 15-25 Ma Barrovian type μεταμόρφωση. Σε άλλες περιοχές μόνο η Barrovian type μεταμόρφωση υπάρχει



Εικόνα 9.23 Οι διάφοροι τύποι μεταμόρφωσης σε ένα τυπικό ορογενετικό σύστημα.

στα πετρώματα και οι ενδείξεις για όλα τα προηγούμενα μεταμορφικά γεγονότα έχουν ολοκληρωτικά εξαφανισθεί.

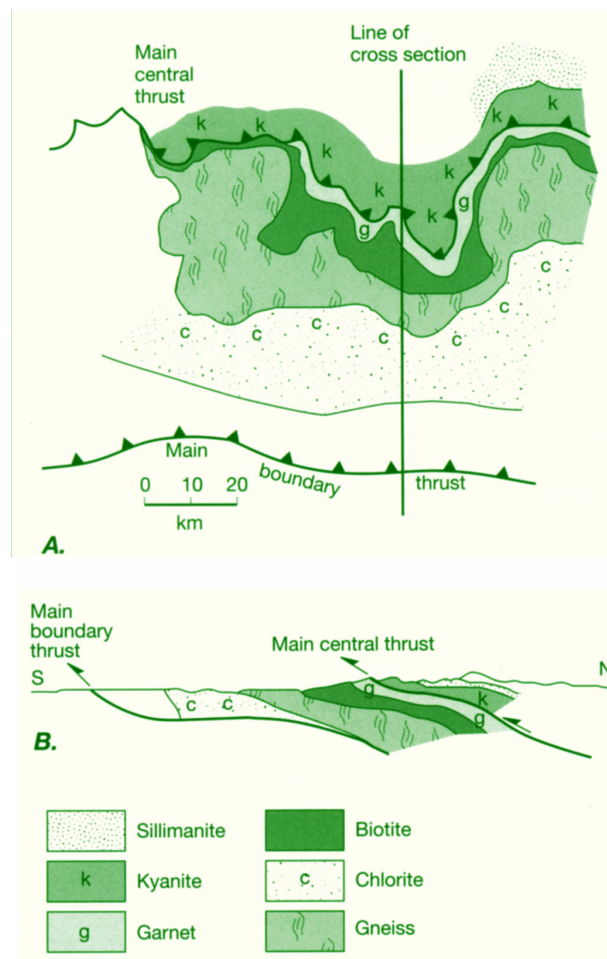
Σε περιοχές όπου εντοπίζονται καλές εμφανίσεις μεταμορφωμένων πετρωμάτων, μελετώντας τις συνθήκες μεταμόρφωσής τους, μπορεί να αναπαρασταθεί στις τρεις διαστάσεις το γενικό σχήμα των ισόθερμων καμπυλών. Στην περίπτωση που η παραμόρφωση είναι σχετικά μικρή, οι ισόθερμες συνιστούν ελαφρά καμπυλωμένες επιφάνειες που τέμνουν την επιφάνεια της γης με μικρές γωνίες. Στα σχήματα της Εικ. 9.24 παρουσιάζεται ένας τεκτονικός χάρτης από την περιοχή των Β. Απαλαχίων (Α), καθώς και οι ζώνες της Barrovian τύπου μεταμόρφωσης (Β) από την ίδια περιοχή. Στον χάρτη της Εικ. 9.24Α παρουσιάζονται τα διαδοχικά καλύμματα που σχηματίζουν μια υποοριζόντια στοίβα η οποία στη συνέχεια παραμορφώνεται δίνοντας ανοικτές αντικλινικές και συγκλινικές δομές με διεύθυνση τόσο Β-Ν όσο και Α-Δ περίπου, που δημιουργούν τύπου 1 και τύπου 2 πρότυπα υπέρθεσης (type 1 & type 2 interference patterns).



Εικόνα 9.24 Η σχέση ανάμεσα στην τεκτονική δομή και τη μεταμόρφωση στο ορογενές των Απαλαχίων.

Ο βαθμός μεταμόρφωσης σε γενικές γραμμές ελαττώνεται από τα κατώτερα καλύμματα προς τα ανώτερα (Εικ. 9.24Β), ακολουθώντας δηλαδή τη

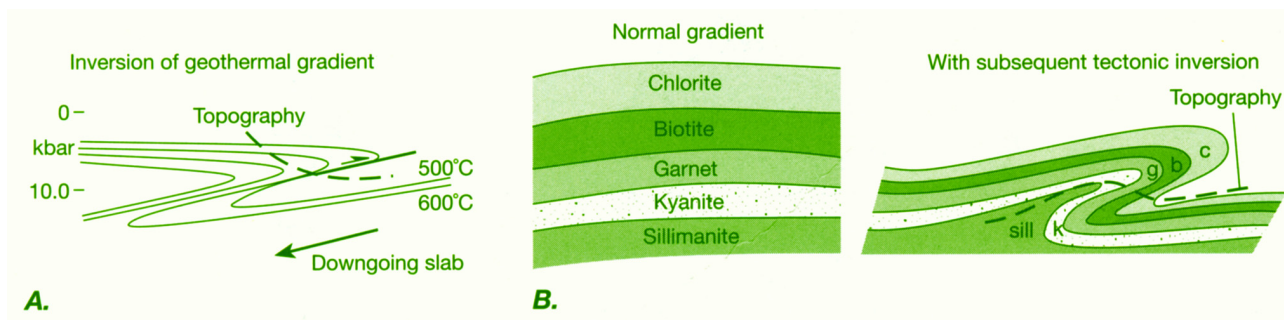
γεωμετρία των καλυμμάτων, ενώ ταυτόχρονα οι ισόθερμες καμπύλες παρουσιάζονται και ελαφρά πτυχωμένες με ίδιους άξονες όπως προηγουμένως και δίνοντας τα ίδια πρότυπα επικάλυψης. Άρα λοιπόν στην περίπτωση αυτή είναι φανερό ότι η καλυμματική τεκτονική έλαβε χώρα πριν ή κατά τη διάρκεια της κορύφωσης της μεταμόρφωσης και στη συνέχεια καλύμματα και ισόθερμες καμπύλες πτυχώθηκαν ελαφρά.



Εικόνα 9.25 Ανεστραμμένες μεταμορφικές ζώνες στο ορογενές των Ιμαλαΐων.

Σε άλλες περιοχές οι μεταμορφικές ζώνες παρουσιάζονται αρκετά μετατοπισμένες από την παραμόρφωση και σε ορισμένες περιπτώσεις ανεστραμμένες, όπως στο παράδειγμα της Εικ. 9.25 από τα κεντρικά Ιμαλάια. Στην περίπτωση αυτή ο βαθμός μεταμόρφωσης αυξάνει από τα κατώτερα προς τα ανώτερα τεκτονικά καλύμματα, καθώς παρατηρείται μια προοδευτική μετάβαση από τη ζώνη του χλωρίτη στη ζώνη του σιλλιμανίτη.

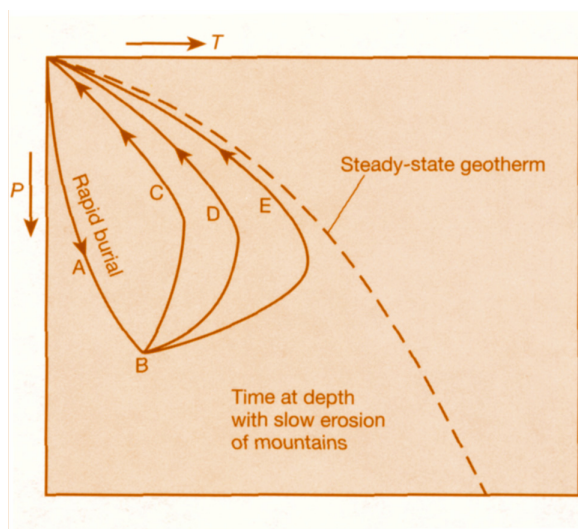
Τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να οφείλονται είτε σε πρωτογενή αναστροφή των γεωθερμικών καμπυλών, όπως για παράδειγμα αυτή που δημιουργείται σε μια ζώνη υποβύθισης στο κάτω τμήμα της



Εικόνα 9.26 Πιθανή προέλευση των ανεστραμμένων μεταμορφικών ζωνών. **A.** Συντεκτονική (κατά τη διάρκεια των επωθήσεων), αναστροφή των ισοθερμών, όπου φαίνεται η κατανομή των θερμοκρασιών κατά τη μεταμόρφωση. **B.** Ανάπτυξη μιας κατακεκλιμένης πτυχής-καλύμματος σε μια μεταμορφωμένη ακολουθία πετρωμάτων, μετά τη μεταμόρφωση.

κατερχόμενης ψυχρής πλάκας (Εικ. 9.26A), είτε σε τεκτονική, δευτερογενή, αναστροφή των ισοθερμών καμπυλών, μετά τη μεταμόρφωση, όπως συμβαίνει στο ανεστραμμένο σκέλος μιας κατακεκλιμένης πτυχής (Εικ. 9.26B).

Η ερμηνεία των μεταμορφικών ζωνών σε σχέση με την τεκτονική των πλακών είναι σύνθετη και πολύπλοκη, δεδομένου ότι ο ρυθμός και η ταχύτητα καταβύθισης και ανόδου των πετρωμάτων είναι ομοειδής με τον ρυθμό και την ταχύτητα με την οποία αυτά θερμαίνονται ή ψύχονται. Ο ρυθμός διάβρωσης πρέπει να είναι σημαντικά μικρότερος από το ρυθμό πάχυνσης λόγω σύγκρουσης για να εξηγήσει τον πολύ παχύ φλοιό σε ορογενή όπως ο Ζάγκρος και τα Ιμαλάια. Ως εκ τούτου λοιπόν σε αυτές τις περιπτώσεις η ταφή ενός συνόλου πετρωμάτων πρέπει να γίνεται γρήγορα και στη συνέχεια η εκταφή με πιο αργό ρυθμό. Οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας εξαρτώνται από τη ροή της θερμότητας στο πέτρωμα και το ρυθμό της ανόδου και της αποκάλυψης του στην επιφάνεια.



Εικόνα 9.27 Πιθανές PTt διαδρομές (paths) για πετρώματα που υφίστανται μεταμόρφωση (βλπ. κείμενο για λεπτομέρειες).

Στην Εικ. 9.27 παρουσιάζονται οι ιστορίες ταφής και ανόδου μιας ακολουθίας πετρωμάτων, με τη μορφή των καμπυλών πίεσης και θερμοκρασίας, κατά μήκος των οποίων, όμως, η παράμετρος του χρόνου δεν μεταβάλλεται γραμμικά. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται με το όνομα **PTt (Pressure, Temperature, time) paths (διαδρομές Πίεσης, Θερμοκρασίας, χρόνου)**. Ένα πέτρωμα ξεκινάει από τη επιφάνεια για να ακολουθήσει η γρήγορη ταφή του, κατά μήκος της διαδρομής A, μέχρι το μέγιστο βάθος στο σημείο B. Αν το πέτρωμα ανέλθει πάλι στην επιφάνεια με ταχύ ρυθμό, θα ακολουθήσει μια διαδρομή όπως η C. Αν ανέλθει με βραδύτερο ρυθμό μια διαδρομή όπως η D και με ακόμα βραδύτερο όπως η E. Στην περίπτωση της διαδρομής E παρέρχεται αρκετός χρόνος μέχρι την τελική άνοδο και ως εκ τούτου το πέτρωμα προλαβαίνει να φθάσει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος (γεωθερμική βαθμίδα).

Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη θερμοκρασία δεν επιτυγχάνεται κατά τη μέγιστη πίεση. Ως εκ τούτου, λοιπόν, η μέγιστη θερμοκρασία μεταμόρφωσης πρέπει να συμβαίνει μετά την επίτευξη του μέγιστου βάθους ταφής. Με δεδομένο ότι οι ορυκτολογικές παραγενέσεις των μεταμορφωμένων πετρωμάτων αντιπροσωπεύουν συνήθως αυτές που δημιουργούνται κατά τις μέγιστες θερμοκρασίες, τα μεταμορφικά γεγονότα που καταγράφονται στα πετρώματα πρέπει χρονικά να συμβαίνουν μετά τη σύγκρουση. Τέτοιοι υπολογισμοί και μοντέλα που έχουν εφαρμοστεί για την περίπτωση των Άλπεων υποστηρίζουν ότι το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην ολοκλήρωση της σύγκρουσης και την επίτευξη της μέγιστης θερμοκρασίας είναι της τάξης των 10 Ma ή και περισσότερο.

Οι ορυκτολογικές παραγενέσεις που θα διατηρηθούν σε ένα πέτρωμα είναι συνάρτηση του PTt path και του ρυθμού των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στις συνθήκες αυτές. Στο σχήμα

της Εικ. 9.27, η διαδρομή A-B-C μπορεί να οδηγήσει σε επιφανειακή εκταφή πετρωμάτων με κυανοσχιστολιθική HP/LT μεταμόρφωση, η διαδρομή A-B-D σε HP/LT κυανοσχιστόλιθους που επικαλύπτονται από μια επακόλουθη Barrovian type NP/NT μεταμόρφωση και η διαδρομή A-B-E σε Barrovian type NP/NT μεταμόρφωση.

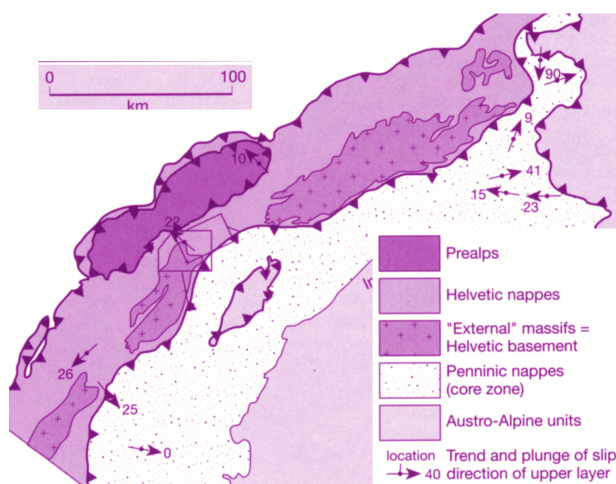
9.5 Μικροδομές – Παραμόρφωση & Ερμηνεία των Ορογενετικών Πυρήνων

Οι μελέτες για την προέλευση των ορογενετικών πυρήνων και τη σχέση τους με τα τεκτονικά γεγονότα που λαμβάνουν χώρα στο πλαίσιο της τεκτονικής των πλακών, θέτουν πολλά και σημαντικά ερωτήματα: Ποια είναι η διεύθυνση της τεκτονικής μεταφοράς κατά τη διάρκεια των παραμορφωτικών φάσεων; Πως εκδηλώνεται η κατανομή της παραμόρφωσης (καταπόνησης, strain) διαμέσου των πετρωμάτων; Ποιο, μεγάλης κλίμακας, πρότυπο τεκτονικής ροής δημιουργεί τις δομές που παρατηρούνται και ερμηνεύει την κατανομή της παραμόρφωσης (καταπόνησης, strain); Πως μπορούν τα τεκτονικά χαρακτηριστικά να ερμηνευθούν από την άποψη των τεκτονικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα; Οι ερωτήσεις αυτές δημιουργούνται από τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσονται οι ορογενετικοί πυρήνες και οι απαντήσεις στις ερωτήσεις αυτές βοηθούν στο συσχετισμό της εξέλιξης των πυρήνων με την κινηματική των λιθοσφαιρικών πλακών.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή του τρόπου με τον οποίο η ανάλυση των μικροδομών συμβάλει στην ερμηνεία των ορογενετικών πυρήνων. Η περιγραφή αυτή εστιάζει στην κινηματική ανάλυση και ανάλυση της καταπόνησης (strain) σε μικροδομές όπως οι πτυχές, οι φυλλώσεις, οι γραμμώσεις και ο κρυσταλλογραφικός προτιμητέος προσανατολισμός. Βασικές έννοιες θεωρούνται δεδομένες, καθώς έχουν ήδη καλυφθεί από τα μαθήματα της Τεκτονικής (Structural Geology) και της Μικροτεκτονικής.

Κινηματική Ανάλυση Πτυχών

Η εφαρμογή της μεθόδου Hansen, για τον προσδιορισμό της φοράς κίνησης στα παραμορφωμένα και πτυχωμένα πετρώματα των Άλπεων, έδειξε ότι στις εξωτερικές περιοχές των καλυμμάτων η διεύθυνση της διάτμησης είναι εγκάρσια ως προς τη γενική διεύθυνση της ορογενετικής ζώνης με φορά προς τα εξωτερικά τμήματα του ορογενούς, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο. Σημειώνεται ότι παρατηρήθη-



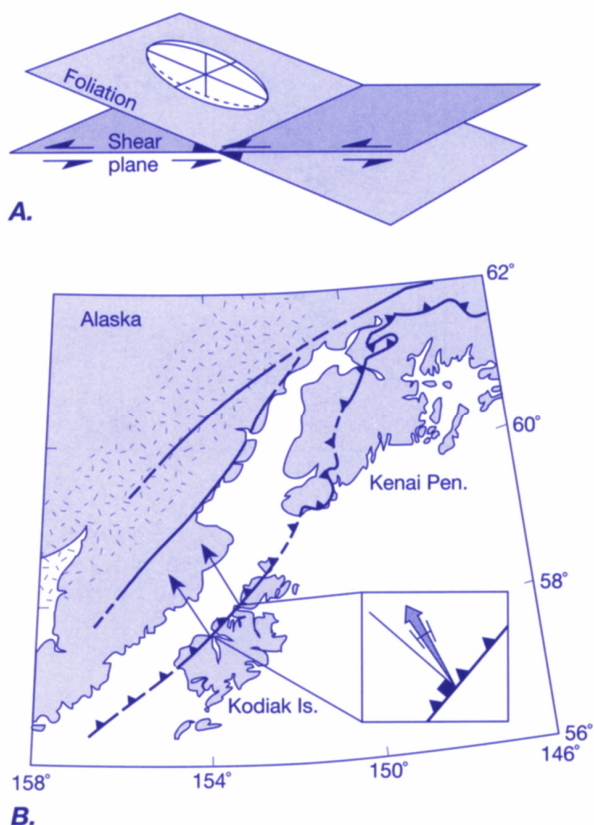
Εικόνα 9.28 Τεκτονικός χάρτης των Άλπεων, που παρουσιάζει τη φορά ολίσθησης, που έχει προσδιορισθεί με τη μέθοδο Hansen, για διάφορα τμήματα της ορογενετικής ζώνης (βλπ. κείμενο για ερμηνεία).

καν και ορισμένες εξαιρέσεις με αντίθετη φορά ολίσθησης προς τον πυρήνα (Εικ. 9.28), που ακόμα δεν έχουν ερμηνευθεί ικανοποιητικά. Στην κεντρική περιοχή, όμως, του ορογενετικού πυρήνα, η διεύθυνση της διάτμησης τείνει να γίνει παράλληλη με τον γενικό άξονα του ορογενούς (Εικ. 9.28). Αντίστοιχα αποτελέσματα περιγράφονται και στις Καλιδονίδες αλλά και τα Β. Απαλάχια. Η ασυμμετρία αυτή μπορεί να ερμηνευθεί μέσα από το μοντέλο που έχει προταθεί για τα Ιμαλάια και τις Άλπεις και προϋποθέτει ότι σε τοπικό επίπεδο τα αποτελέσματα της σύγκρουσης οδηγούν σε πλευρική διαφυγή και άρα εγκάρσια γεωμετρία κίνησης σε σχέση με τη γενική του ορογενούς.

Κινηματική Ανάλυση Φυλλώσεων

Δεδομένου ότι οι φυλλώσεις είναι τυπικά παράλληλες στο επίπεδο έκτασης (plane of flattening) του ελλειψοειδούς πεπερασμένης καταπόνησης (finite-strain ellipsoid), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της φοράς διάτμησης σε μια ρηξιγενή ζώνη, με την προϋπόθεση βέβαια ότι η φύλλωση είναι το αποτέλεσμα της διάτμησης και ο προσανατολισμός της ζώνης διάτμησης είναι γνωστός. Η διατομή του επιπέδου της φύλλωσης με το επίπεδο της διάτμησης είναι μια γραμμή περίπου κάθετη στη διεύθυνση της διάτμησης και η μικρή γωνία που σχηματίζουν τα δύο αυτά επίπεδα "δείχνει" τη φορά της σχετικής κίνησης για την αντίθετη πλευρά του επιπέδου διάτμησης (Εικ. 9.29Α).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της σχέσης αποτελεί η έρευνα που έγινε στη φύλλωση που αναπτύσσεται σε ιζήματα της Ν. Αλάσκας, που έχουν παραμορφωθεί στο πρίσμα συσσώρευσης, πάνω από τη ζώνη υποβύθισης (Εικ. 9.29Β). Η κι-



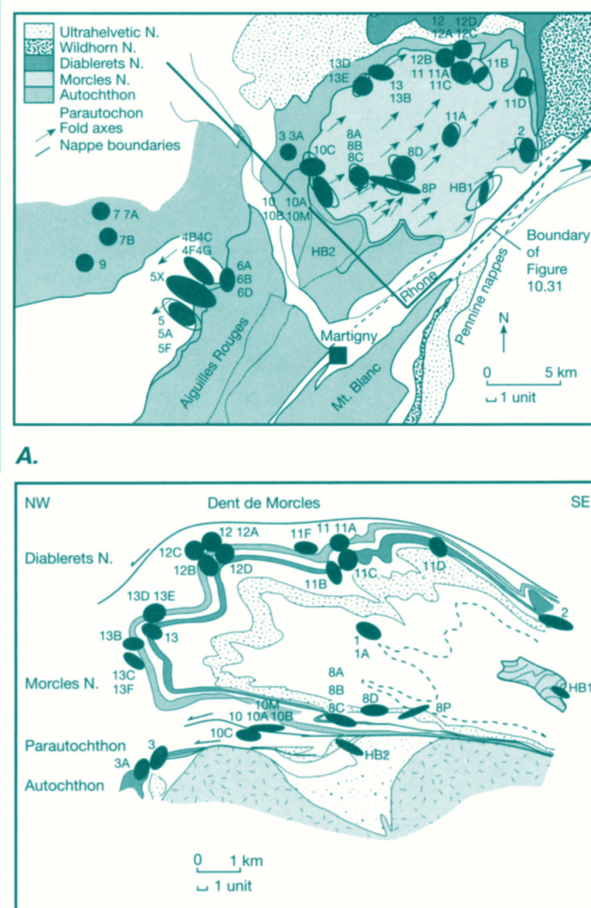
Εικόνα 9.29 Α. Συσχετισμός ανάμεσα στα επίπεδα της φύλλωσης και της διάτμησης, όπου η φορά της κίνησης είναι κάθετη στη διατομή τους. Β. Επιβεβαίωση του μοντέλου στην ύπαιθρο (Kodiak Island, Alaska), όπου η σχετική κίνηση των πλακών ταυτίζεται με αυτή που προσδιορίζεται από τη διατομή των επιπέδων φύλλωσης και διάτμησης.

νηματική αυτή επιβεβαιώνεται και από τον απευθείας υπολογισμό της σχετικής κίνησης των πλακών από τους μηχανισμούς γένεσης των σεισμών, που δείχνει να είναι εγκάρσια στη γραμμή διατομής της φύλλωσης με το επίπεδο της επώθησης.

Ανάλυση της Παραμόρφωσης (Strain)

Η κατανομή της παραμόρφωσης, (καταπόνηση, strain distribution) στα καλύμματα του Morele στις Ελβετικές Άλπεις, ΝΑ της λίμνης της Γενεύης, παρουσιάζεται στο σχήμα της Εικ. 9.30. Ο χάρτης της Εικ. 9.30Α δείχνει την κατανομή του μέγιστου και ενδιάμεσου εφελκυστικού άξονα s_1 και s_2 . Σημειώνεται ότι ο s_1 είναι συνήθως εγκάρσιος στη διεύθυνση των αξόνων των πτυχών και παράλληλος ή υποπαράλληλος στη διεύθυνση της κίνησης των καλυμμάτων, αν και κατά θέσεις συμβαίνει το αντίθετο, να είναι δηλαδή παράλληλος στους άξονες των πτυχών και εγκάρσιος στην κίνηση των καλυμμάτων. Στην τομή της Εικ. 9.30Β φαίνεται ότι η παραμόρφωση (καταπόνηση, strain), είναι υψηλό-

τερη στη βάση του καλύμματος, όπου ο s_I άξονας προσανατολίζεται σε μικρές γωνίες ως προς το υποοριζόντιο επίπεδο της επώθησης. Προς τα υψηλότερα σημεία των καλυμμάτων, το ποσό της παραμόρφωσης (καταπόνησης, strain), ελαττώνεται προοδευτικά και η κλίση του s_I άξονα γίνεται μεγαλύτερη.



Εικόνα 9.30 Κατανομή της παραμόρφωσης (strain) στα καλύμματα του Morcle στις Ελβετικές Άλπεις. **A.** Στον χώρο οι μαύρες ελλείψεις αποτελούν την οριζόντια τομή του ελλειψοειδούς παραμόρφωσης (strain ellipsoid) και οι απλές ελλείψεις τη διατομή $s_1 - s_2$ του ελλειψοειδούς πεπερασμένης παραμόρφωσης (finite strain ellipsoid). **B.** Στην τομή οι μαύρες ελλείψεις αποτελούν τη διατομή $s_1 - s_2$ του ελλειψοειδούς πεπερασμένης παραμόρφωσης (finite strain ellipsoid).

Η συνολική παραμόρφωση που έχει καταγραφεί στο ελλειψοειδές της πεπερασμένης καταπόνησης (finite strain ellipsoid), περιλαμβάνει αρχικά μια συνιστώσα έκτασης (flattening), που συνδέεται με τη διαγένεση των ιζημάτων, η οποία ακολουθείται από μια ανοικτή πτύχωση όλων των στρωμάτων, που με τη σειρά της ακολουθείται από μία ανομοιογενή απλή διάτμηση, που συνδέεται με την

τοποθέτηση των καλυμμάτων. Ως εκ τούτου λοιπόν, τα ελλειψοειδή της πεπερασμένης παραμόρφωσης (καταπόνησης, strain), δεν καταγράφουν μόνο τη διαδικασία της τοποθέτησης των καλυμμάτων και σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα μιας τέτοιας σύνθετης τεκτονικής ιστορίας και εξέλιξης της παραμόρφωσης, είναι συχνά δύσκολο να ερμηνευθούν.

Σημειώνεται ότι εκτός από τα όσα αναφέρθηκαν στα ανωτέρω, ένα πλήθος άλλων μικροδομών, όπως γραμμώσεις, κρυσταλλογραφικός προτιμητέος προσανατολισμός (LPO), φλέβες πληρωμένες με ινώδη υλικά (fibrous veins), σκιές και θύσανοι παρυφών παραμόρφωσης (strain shadows & strain fringes), boudins και πορφυροβλάστες, χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της παραμόρφωσης και της κινηματικής εξέλιξης των ορογενετικών ζωνών, ξεφεύγει όμως από το σκοπό του παρόντος βιβλίου. Πολλά στοιχεία μπορούν να αναζητηθούν στα βιβλία που δίνονται στα πλαίσια των μαθημάτων της Μικροτεκτονικής και της Τεκτονικής.

9.6 Μοντέλα Ορογενετικής Παραμόρφωσης

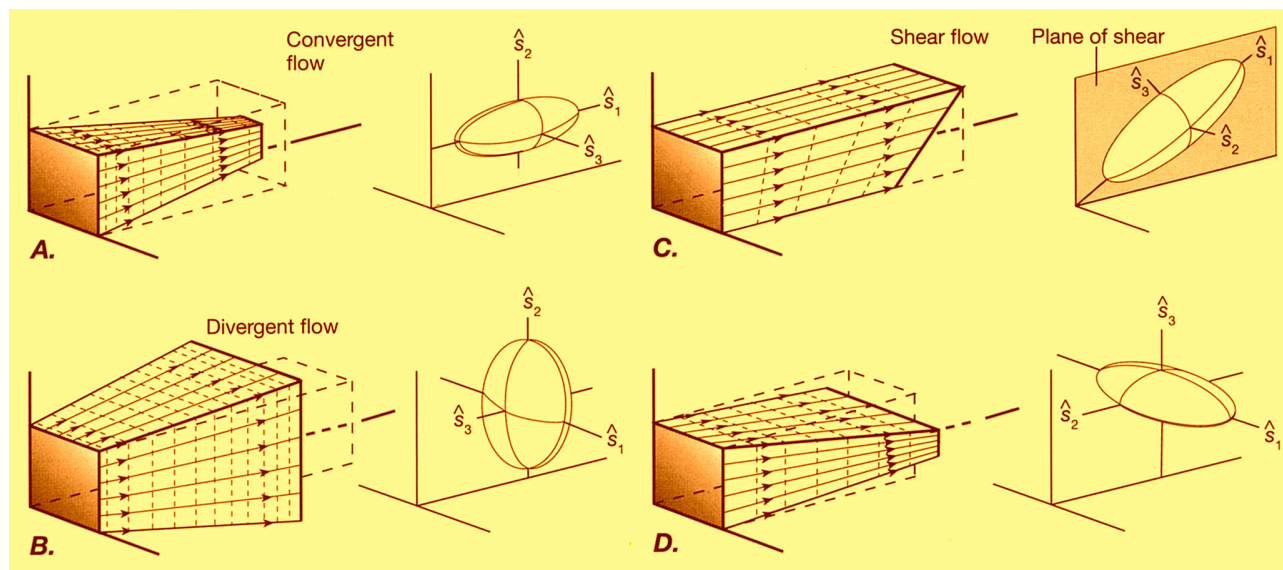
Ένας από τους κύριους στόχους της μελέτης των τεκτονικών δομών σε μια περιοχή είναι η κατανόηση της σχέσης ανάμεσα στις τοπικού χαρακτήρα μικρής κλίμακας δομές και στις μεγάλης κλίμακας τεκτονικές διαδικασίες μέχρι το επίπεδο της τεκτονικής των πλακών. Η αξιοποίηση των μικροδομών για το σκοπό αυτό προϋποθέτει συστηματική μελέ-

τη πολύ μεγάλων σε έκταση περιοχών, διαδικασία που χρειάζεται πολύ χρόνο τόσο για την εργασία υπαίθρου όσο και την ανάλυση. Παρότι έχει πλέον γίνει ένα πλήθος μελετών σε παγκόσμιο επίπεδο, δεν υπάρχει ακόμα ένα ικανοποιητικό γενικό μοντέλο που να περιγράφει την παραμόρφωση σε κλίμακα ορογενούς. Μόνο τμήματα αυτού του μωσαϊκού μπορούν ακόμα να περιγραφούν και ως εκ τούτου η συνολική εικόνα είναι ακόμα ελλιπής. Ο συσχετισμός των μικροδομών με την τεκτονική σε ευρεία κλίμακα παραμένει ένα ελκυστικό πρόβλημα για τις ορογενετικές ζώνες.

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων από περιοχές όπου εντοπίζονται πολλές και καλές εμφανίσεις τεκτονικών δομών, είναι σε γενικές γραμμές εύκολη διαδικασία και μπορεί, ως εκ τούτου, να δώσει το γενικό πλαίσιο για τη ερμηνεία των δομών που προέρχονται από περιοχές με ελλιπή στοιχεία. Για παράδειγμα, τα όρη των Άλπεων και των Καλιδονίδων έχουν πρόσφατα αποκαλυφθεί από τους παγετώνες και για το λόγο αυτό έχουν πολύ καλές εμφανίσεις πετρωμάτων και τεκτονικών δομών σε όλες τις κλίμακες παρατήρησης. Έτσι λοιπόν αποτελούν περιοχές που έχουν δουλευθεί συστηματικά και έχουν δώσει πολύ σημαντικά στοιχεία για όλα τα προβλήματα που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα.

Απλοποιημένα Πρότυπα Όλκιμης Τεκτονικής Ροής

Το πρότυπο της τεκτονικής ροής σε ένα πέτρωμα, κατά τη διάρκεια της όλκιμης παραμόρφωσης, προσδιορίζει την κατανομή της παραμόρφωσης



Εικόνα 9.31 Η γεωμετρία των γραμμών ροής (streamlines) για διάφορα πρότυπα τεκτονικής ροής. **A.** Συγκλίνουσα τεκτονική ροή (convergent flow). **B.** Αποκλίνουσα τεκτονική ροή (divergent flow). **C.** Διατμητική τεκτονική ροή (shear flow). **D.** Συνδυασμός συγκλίνουσας και αποκλίνουσας τεκτονικής ροής.

(strain) στο πέτρωμα καθώς και τον τύπο και τον προσανατολισμό των δομών που θα σχηματισθούν. Περιγράφεται με τις γραμμές ροής (streamlines of the flow), οι οποίες είναι παντού εφαπτόμενες στα ανύσματα της ταχύτητας των σημείων ύλης (material points). Μπορούν να θεωρηθούν τρεις περιπτώσεις προτύπων τεκτονικής ροής που μπορεί να συμβούν: συγκλίνουσα τεκτονική ροή (convergent flow), αποκλίνουσα τεκτονική ροή (divergent flow) και διατμητική τεκτονική ροή (shear flow). Πρέπει, όμως, να αναγνωρισθεί ότι οι τεκτονικές δομές στα πετρώματα σχηματίζονται ως το αποτέλεσμα ανομοιογενειών στην τεκτονική ροή, κάτι που δεν μελετάται σαφώς σε αυτά τα μοντέλα.

Στην συγκλίνουσα τεκτονική ροή (Εικ. 9.31Α), όλες οι γραμμές ροής συγκλίνουν προς τη φορά της ροής και η ταχύτητα πρέπει να αυξάνεται προς αυτή την κατεύθυνση, αν ο όγκος του πετρώματος παραμένει σταθερός. Το πέτρωμα υπόκειται σε ομοαξονική παραμόρφωση, και η καταπόνηση (strain) αντιστοιχεί στον τύπο constrictional του διαγράμματος Flinn. Ο άξονας της μέγιστης έκτασης (extension) s_1 του ελλειψοειδούς πεπερασμένης καταπόνησης (finite strain ellipsoid), προσανατολίζεται παράλληλα με τις γραμμές ροής, και οι άλλοι δύο κύριοι άξονες του ελλειψοειδούς αποτελούν διευθύνσεις βράχυνσης (shortening). Άρα λοιπόν αναμένεται οι άξονες των πτυχών και οι γραμμώσεις έκτασης (stretching lineations) που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης να είναι παράλληλες στις γραμμές ροής. Επειδή κατά τη διάρκεια ομοαξονικής παραμόρφωσης οι γραμμές ύλης (material lines) τείνουν να περιστραφούν προς την διεύθυνση της s_1 , αναμένεται οι παλαιότερες γραμμώσεις να περιστραφούν μέχρι να γίνουν παράλληλες με τις γραμμές ροής.

Στην αποκλίνουσα τεκτονική ροή όλες οι γραμμές ροής αποκλίνουν μεταξύ τους προς τη φορά της ροής και η ταχύτητα των σημείων ύλης μειώνεται προς την ίδια φορά (Εικ. 9.31Β). Η παραμόρφωση είναι επίσης ομοαξονική αλλά στην περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στο πεδίο της πλάτυνσης (flattening) του διαγράμματος Flinn. Ο άξονας της μέγιστης βράχυνσης (shortening) s_3 του ελλειψοειδούς πεπερασμένης καταπόνησης (finite strain ellipsoid), προσανατολίζεται παράλληλα με τις γραμμές ροής και οι άλλοι δύο κύριοι άξονες του ελλειψοειδούς αποτελούν διευθύνσεις εφελκυσμού (extension). Οι άξονες των πτυχών και οι γραμμώσεις έκτασης (stretching lineations), που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης, προσανατολίζονται εγκάρσια στις γραμμές ροής. Οι παλαιότερες γραμμώσεις περιστρέφονται προς την διεύθυνση της s_1 μέχρι να γίνουν εγκάρσιες με τις γραμμές ροής.

Στη διατμητική τεκτονική ροή οι γραμμές

ροής είναι παράλληλες μεταξύ τους και η ταχύτητα δεν μεταβάλλεται προς τη φορά της ροής. Η ταχύτητα όμως μεταβάλλεται σε μια διεύθυνση κάθετα στις γραμμές ροής (Εικ. 9.31C). Η παραμόρφωση είναι μη-ομοαξονική. Κατά τη διάρκεια της διατμητικής ροής, η διεύθυνση της s_1 και οι γραμμές ύλης (material lines) περιστρέφονται προοδευτικά προς τις γραμμές ροής. Σε γενικές γραμμές όμως καμία από αυτές δεν γίνεται εντελώς παράλληλη με αυτές. Η προοδευτική απλή διάτμηση (progressive simple shear) αποτελεί ένα τέτοιο παράδειγμα διατμητικής ροής.

Οι ανωτέρω απλοποιημένοι τύποι τεκτονικής ροής μπορούν να συνδυασθούν μεταξύ τους και να δώσουν πιο σύνθετους τύπους ροής. Για παράδειγμα οι γραμμές ροής μπορεί να συγκλίνουν σε ένα επίπεδο και να αποκλίνουν σε ένα άλλο, εγκάρσιο στο προηγούμενο (Εικ. 9.31D). Επιπλέον η διατμητική ροή μπορεί να συνδυάζεται με οποιονδήποτε από τους άλλους δύο τύπους.

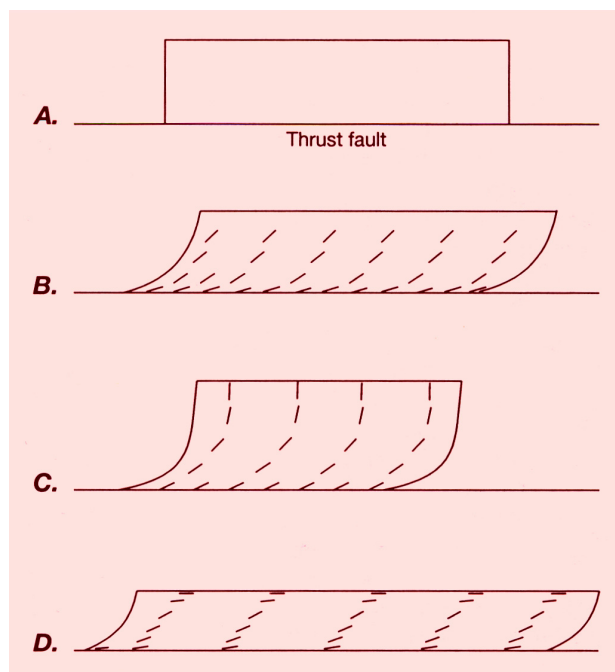
Ο προσανατολισμός των γραμμών ροής είναι ισοδύναμος με αυτό που συχνά καλείται ως διεύθυνση τεκτονικής μεταφοράς (direction of tectonic transport). Επισημαίνεται ότι δεν υφίσταται μια απλή σχέση ανάμεσα στις γραμμές ροής και τους κύριους άξονες της πεπερασμένης καταπόνησης, τους άξονες των πτυχών αλλά και τις γραμμώσεις. Αν σε μια περιοχή μπορεί να προσδιορισθεί η κατανομή των κύριων αξόνων της καταπόνησης, τότε αυτοί καταδεικνύουν τα πιθανά πρότυπα τεκτονικής ροής. Εναλλακτικά, τοπικού χαρακτήρα ανομοιογένειες στην τεκτονική ροή, μπορεί να δημιουργήσουν επιμέρους δομές από τις οποίες είναι δυνατόν να προσδιορισθούν οι γραμμές τεκτονικής ροής (streamlines).

Μοντέλα για την Τοποθέτηση Κρυσταλλικών Καλυμμάτων

Η διαδικασία μέσα από την οποία τοποθετούνται τα καλύμματα είναι σύνθετη και αποτελεί αντικείμενο έρευνας που βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στη ζώνη πτυχών-επωθήσεων της προχώρας, όπου η υψηλή πίεση των ρευστών των πόρων διαδραματίζει ένα σημαντικό ρόλο στην ελάττωση της αντίστασης της τριβής, στη βάση της σφήνας του καλύμματος. Τα κρυσταλλικά καλύμματα αποτελούν ένα άλλο πρόβλημα, καθόσον ακόμα και αν η διάτμηση συγκεντρώνεται στη βάση του καλύμματος, η παραμόρφωση είναι κυρίως όλκιμου χαρακτήρα και ως εκ τούτου η τριβή δεν παίζει κανένα ρόλο στην τοποθέτηση των καλυμμάτων.

Τρία είναι τα βασικά απλοποιημένα μοντέλα που επιχειρούν να ερμηνεύσουν την τοποθέτηση των όλκιμης παραμόρφωσης καλυμμάτων ή πτυ-

χών-καλυμμάτων: ολίσθηση βαρύτητας (gravity glide), οριζόντια συμπίεση (horizontal compression) και βαρυτική κατάρρευση (gravitational collapse). Καθένα από αυτά τα μοντέλα προϋποθέτει μια διαφορετική κατανομή των κύριων αξόνων της πεπερασμένης καταπόνησης από όπου και προσδιορίζεται ο διαφορετικός μηχανισμός τοποθέτησης.



Εικόνα 9.32 Ιδεατή κατανομή των αξόνων s_1 σε καλύμματα που έχουν παραμορφωθεί με διαφορετικούς μηχανισμούς τοποθέτησης. **A.** Τμήμα του καλύμματος πριν την παραμόρφωση. **B.** Παραμόρφωση από ολίσθηση βαρύτητας. **C.** Παραμόρφωση από οριζόντια συμπίεση. **D.** Παραμόρφωση από βαρυτική κατάρρευση.

Οι κρίσιμες διαφορές ανάμεσα στα τρία μοντέλα φαίνονται σε μια τομή εγκάρσια στα καλύμματα και παράλληλη στις γραμμές τεκτονικής ροής (διεύθυνση τεκτονικής μεταφοράς). Στην Εικ. 9.32 παρουσιάζεται ένα τμήμα μιας τέτοιας τομής στις δύο διαστάσεις, που αντιπροσωπεύεται από ένα ορθογώνιο τέμαχος (ορθογώνιο παραλληλόγραμμο στην τομή) στη βάση του καλύμματος (Εικ. 9.32A). Το μοντέλο της ολίσθησης βαρύτητας θεωρεί ότι το κάλυμμα τοποθετείται από τις δυνάμεις της βαρύτητας, που προξενούν την ολίσθηση και ελαφριά κλίση της βάσης του τεμάχους, με παραμόρφωση όλκιμης διάτμησης σε όλο το κάλυμμα (Εικ. 9.32B). Στην πιο απλή περίπτωση το κάλυμμα, ούτε εκτείνεται ούτε βραχύνεται παράλληλα με τη διεύθυνση της κίνησης. Η προκύπτουσα τεκτονική ροή είναι ένα παράδειγμα ανομοιογενούς προοδευτικής απλής διάτμησης (βλπ. Εικ. 9.31C). Η βάση του καλύμματος αποτελεί μια ζώνη η οποία χαρα-

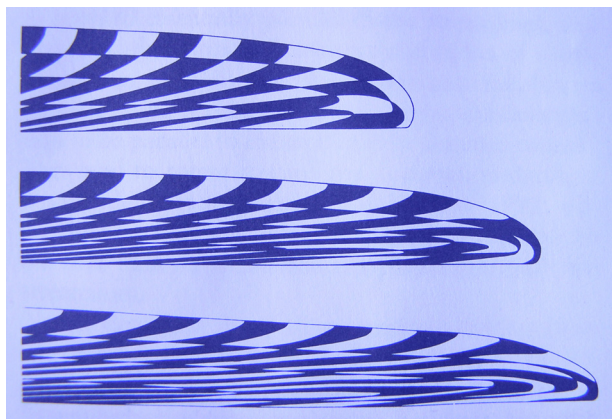
κτηρίζεται από έντονη διατμητική καταπόνηση. Προοδευτικά, προς τα ανώτερα μέλη του καλύμματος, η διατμητική καταπόνηση μειώνεται και παίρνει περίπου μηδενική τιμή πλησίον της επιφανείας. Ως εκ τούτου λοιπόν, στην κορυφή του καλύμματος, ο s_1 άξονας της έλλειψης (έλλειψης και όχι ελλειψοειδούς γιατί βρισκόμαστε στις δύο διαστάσεις), πεπερασμένης καταπόνησης (finite-strain ellipse), προσανατολίζεται στις 45° σχετικά με το επίπεδο διάτμησης (βλπ. Εικ. 9.31B). Προς τα βαθύτερα τμήματα του καλύμματος, ο άξονας s_1 περιστρέφεται με αποτέλεσμα τη μείωση της γωνίας με το επίπεδο διάτμησης, που φθάνει την ελάχιστη τιμή στη βάση του καλύμματος.

Το δεύτερο μοντέλο (Εικ. 9.32C), θεωρεί ότι η τοποθέτηση του καλύμματος γίνεται από οριζόντια συμπίεση, που εφαρμόζεται στο πίσω μέρος του καλύμματος, διαδικασία που στη βιβλιογραφία αναφέρεται συνήθως ως "ώθηση από πίσω" ("push from behind"). Η παραμόρφωση εκδηλώνεται με μια όλκιμη διάτμηση σε όλη τη βάση του καλύμματος, όπως περιγράφηκε και για το προηγούμενο μοντέλο, μόνο που στην περίπτωση αυτή παρατηρείται και μια βράχυνση του καλύμματος, παράλληλα με τις γραμμές ροής. Για λόγους απλοποίησης θεωρείται ότι η βράχυνση είναι ομοιογενής σε ολόκληρο το κάλυμμα. Η τεκτονική ροή στην περίπτωση αυτή είναι ένας συνδυασμός διατμητικής ροής (shear flow, βλπ. Εικ. 9.31C) και αποκλίνουσας ροής (divergent flow, βλπ. Εικ. 9.31B). Στην κορυφή του καλύμματος, όπου η διατμητική καταπόνηση (shear strain) είναι μηδενική, η βράχυνση αναγκάζει το s_1 άξονα να είναι κατακόρυφος. Προς τα βαθύτερα μέρη του καλύμματος, έως τη διατμητική ζώνη στη βάση, η συνιστώσα της βράχυνσης προστίθεται στην απλή διάτμηση και αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο s_1 άξονας να προσανατολίζεται σε μεγαλύτερες γωνίες ως προς το επίπεδο της διάτμησης, απ' ότι στην περίπτωση που θα υπήρχε μόνο η απλή διάτμηση, χωρίς τη συνιστώσα της βράχυνσης.

Το τρίτο μοντέλο θεωρεί ότι η τοποθέτηση του καλύμματος γίνεται με τη διαδικασία της βαρυτικής κατάρρευσης (Εικ. 9.32D), που προϋποθέτει όλκιμη παραμόρφωση με έκταση, άπλωμα (spreading) και εκλέπτυνση (thinning) του καλύμματος, όπως ακριβώς θα συνέβαινε με τη ροή ενός καλύμματος πάγου. Στο μοντέλο αυτό η τεκτονική ροή είναι το αποτέλεσμα της κλίσης της επιφάνειας της οροφής του σώματος, που τείνει να μειωθεί (η κλίση), μέσα από τη ροή αυτή. Για λόγους απλοποίησης θεωρείται ότι η κλίση της οροφής είναι μηδενική και ότι η εκλέπτυνση και έκταση (flattening) του καλύμματος είναι ομοιογενής, στο τμήμα αυτό του καλύμματος που εξετάζεται στη τομή. Η παραμόρφωση, στην περίπτωση αυτή, είναι ένας συνδυασμός δια-

τμητικής ροής (shear flow, βλπ. Εικ. 9.31C) και συγκλίνουσας ροής (convergent flow, βλπ. Εικ. 9.31A). Στην κορυφή του καλύμματος, όπου η διατμητική καταπόνηση είναι μηδενική, η έκταση (flattening) του καλύμματος αναγκάζει το s_1 άξονα να είναι οριζόντιος και παράλληλος με τις γραμμές ροής. Εκεί όπου η διατμητική καταπόνηση δεν είναι μηδενική, η εφελκυστική συνιστώσα της καταπόνησης, τείνει να περιστρέψει τον s_1 άξονα ώστε να έχει μικρότερες γωνίες με το επίπεδο της διάτμησης, απ' ό,τι θα είχε στην περίπτωση που θα υπήρχε μόνο η απλή διάτμηση, χωρίς τη συνιστώσα της έκτασης. Το αποτέλεσμα είναι οι προσανατολισμοί των s_1 αξόνων να δίνουν ένα σιγμοειδές σχήμα (S), με τις μικρότερες γωνίες να παρατηρούνται στην οροφή και τη βάση του καλύμματος και τις μεγαλύτερες κοντά στο κέντρο (Εικ. 9.32D).

Στην Εικ. 9.33 παρουσιάζεται ένα μοντέλο βαρυτικής κατάρρευσης από πλαστελίνη το οποίο περιλαμβάνει μη-μηδενική κλίση της οροφής, οριζόντια έκταση, κατακόρυφη λέπτυνση και διάτμηση στη βάση. Επισημαίνεται η σύνθετη παραμόρφωση που παρατηρείται στο μπροστινό τμήμα του καλύμματος, που μπορεί να ερμηνεύσει τις μεγάλες πτυχές και τα ανεστραμμένα σκέλη των πτυχών-καλυμμάτων. Μπορεί επίσης να ερμηνεύσει και τη δημιουργία του υπερτιθέμενου πτυχοσχισμού (crenulation cleavage), όπως π.χ. συμβαίνει στα ανεστραμμένα σκέλη των καλυμμάτων του Morele (Ελβετικές Άλπεις).



Εικόνα 9.33 Η κατανομή της καταπόνησης (strain) σε ένα μοντέλο από πλαστελίνη που προσομοιώνει την παραμόρφωση ενός καλύμματος με βαρυτική κατάρρευση και διάτμηση παράλληλα με τη βάση. Η χαρακτηριστική παραμόρφωση του μπροστινού τμήματος ερμηνεύει τις κατακεκλιμένες μεγάλες πτυχές των καλυμμάτων.

Τα μοντέλα που περιγράφησαν είναι πολύ απλοποιημένα και δεν αποτελούν παρά τη βάση με την οποία μπορεί να γίνουν κάποιες ερμηνείες. Η πραγματικότητα είναι πολύ πιο σύνθετη και πολύ-

πλοκή και για το λόγο αυτό έχουν προταθεί και πιο σύνθετα μοντέλα που προϋποθέτουν π.χ. μια ευρεία αναστροφή των πετρωμάτων του φλοιού (βλπ. Εικ. 9.15, Εικ. 9.16 και Εικ. 9.19). Δεν κρίνεται όμως σκόπιμο να δοθούν τέτοιες λεπτομέρειες, δεδομένου ότι είναι εκτός του σκοπού του βιβλίου αυτού.

Μοντέλα της Τεκτονικής των Πλακών για τους Ορογενετικούς Πυρήνες

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, οι κρυσταλλικοί πυρήνες των περισσότερων ορογενών χαρακτηρίζονται από αρκετές παραμορφωτικές φάσεις, που στο γενικό τους πλαίσιο περιλαμβάνουν μια παλαιότερη φάση από ισοκλινείς πτυχές που επικαλύπτεται από νεότερες φάσεις με ορθές και λοξοζωνικές πτυχές. Προκειμένου να συσχετισθούν αυτές οι τεκτονικές δομές με την τεκτονική των λιθοσφαιρικών πλακών, πρέπει στην ουσία να εξετασθεί η περίπτωση η παραμόρφωση να αντανακλά τις σχετικές κινήσεις των πλακών.

Πολλές προτάσεις έχουν γίνει για την ερμηνεία των παραμορφωτικών φάσεων που παρατηρούνται στους πυρήνες των ορογενετικών ζωνών, αν και τα μέχρι σήμερα δεδομένα δεν είναι αρκετά για να υποστηρίξουν καθαρά κάποια από αυτές. Οι διαφορετικές γενεές (δομών και παραμόρφωσης) μπορεί να αντιστοιχούν σε διάτμηση κατά το στάδιο της υποβύθισης, που ακολουθείται από βράχυνση και πάχυνση κατά το στάδιο της σύγκρουσης και τελικά από ισοστατική κατάρρευση του ορογενούς. Εναλλακτικά, μπορεί απλά να αντιστοιχούν σε μεταβολές της κίνησης των πλακών κατά το στάδιο της υποβύθισης, που συνεπάγεται απομάκρυνση των πετρωμάτων από το ενεργό τμήμα του πρίσματος συσσώρευσης και τοποθέτηση στο περιθώριο της πλάκας.

Επειδή συνήθως δεν υφίστανται ενδείξεις για το αν τα ορυκτά που δημιουργούν τις φυλλώσεις έχουν ανακρυσταλλωθεί μετά την παραμόρφωση, θεωρείται ότι η παραμόρφωση είναι σε γενικές γραμμές σύγχρονη με την κορύφωση της μεταμόρφωσης, η οποία μεταχρονολογείται από τη σύγκρουση κατά μερικές δεκάδες εκατομμύρια έτη (βλπ. υποκεφάλαιο 9.4). Ως εκ τούτου λοιπόν, δεν είναι ακόμα ξεκάθαρο αν κάποιες από τις δομές που παρατηρούνται στους κρυσταλλικούς πυρήνες αντανάκλουν τη γενική διεύθυνση της υποβύθισης, ή, το πιθανότερο, είναι το αποτέλεσμα της εσωτερικής παραμόρφωσης μέσα στη ζώνη της σύγκρουσης κατά τη διάρκεια των ισοστατικών επανορθώσεων και την βαρυτική κατάρρευση του παχυμένου, από την ορογένεση, φλοιού.

Παρότι δεκάδες σημαντικές και συνθετικές εργασίες για τους ορογενετικούς πυρήνες έχουν πραγματοποιηθεί από εκατοντάδες γεωλόγους, εί-

ναι ακόμα εξαιρετικά δύσκολο να γίνουν ακριβείς και ορθές συσχετίσεις ανάμεσα στις επιμέρους δομές των πυρήνων και τα τεκτονικά γεγονότα, ή να παρουσιασθούν γενικευμένα μοντέλα που να ερμηνεύουν τις παρατηρούμενες τεκτονικές δομές των πυρήνων στο πλαίσιο της τεκτονικής των λιθοσφαιρικών πλακών.

Όσο η ακρίβεια των τεχνικών χρονολόγησης εξελίσσεται, μπορεί να γίνει δυνατός ο συσχετισμός της ηλικίας σχηματισμού μιας συγκεκριμένης δομής ή τεκτονικού ιστού με την συνεπαγόμενη σχετική κίνηση των πλακών κατά το ίδιο χρονικό διάστημα. Μέχρι τότε όμως το πρόβλημα παραμένει χωρίς λύση.
