



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

10

Συμπλέγματα Μεταμορφικού Πυρήνα

10.1 Εισαγωγή

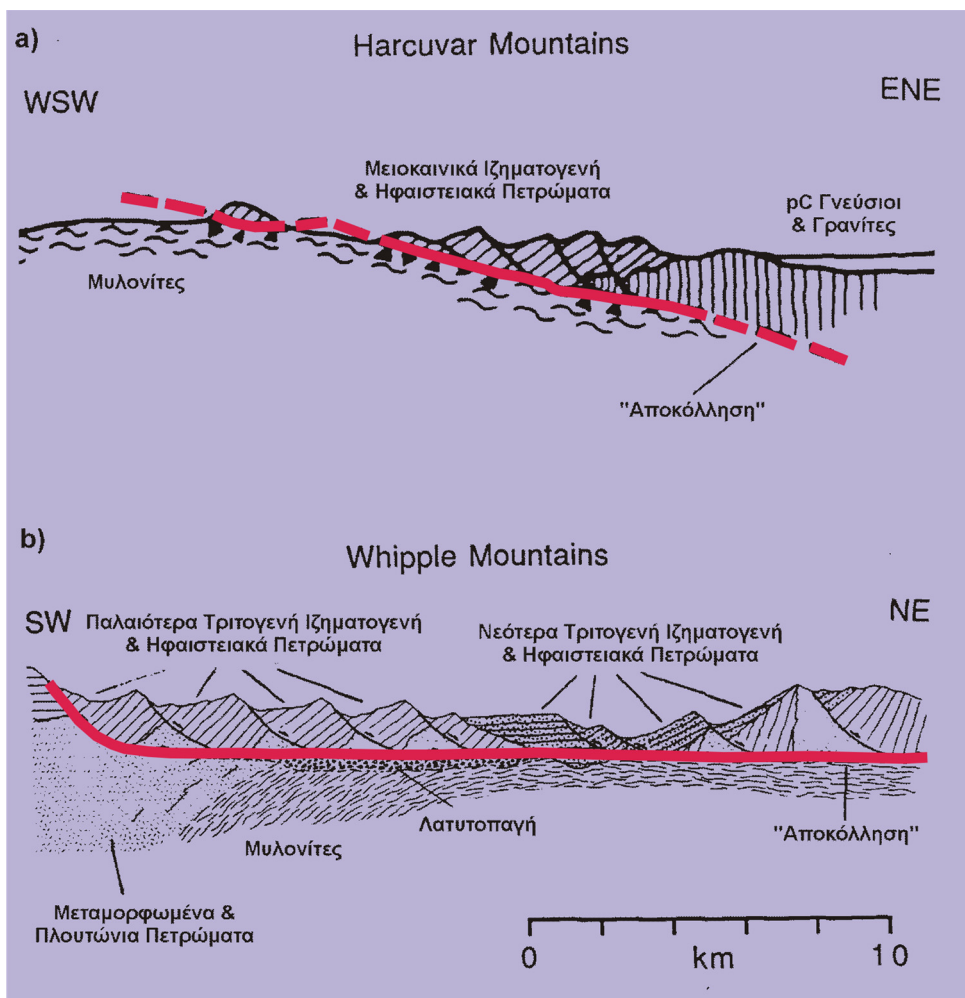
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο τις τελευταίες δεκαετίες γίνεται αρκετή συζήτηση για τις οροσειρές που προέρχονται από μεγάλης κλίμακας περιστραμμένα ρηξιτεμάχη που οριοθετούνται από κανονικά ρήγματα (fault-block mountains), με πιο χαρακτηριστική περίπτωση αυτή της επαρχίας Basin and Range των δυτικών Η.Π.Α. Η δημιουργία τους σχετίζεται με καθεστώς εφελκυσμού και λέπτυνσης του φλοιού, ενώ ο μηχανισμός μέσα από τον οποίο συμβαίνει αυτό δεν έχει ακόμα διευκρινισθεί και διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί για κάθε περίπτωση. Όπως αναφέρθηκε, η σημασία του εφελκυσμού φαίνεται ότι σε ορισμένες περιπτώσεις είναι σημαντική στη δημιουργία και εξέλιξη των ορογενετικών ζωνών, τόσο στο στάδιο της σύγκλισης (βλπ. αντίστοιχο κεφάλαιο), όσο και στο στάδιο της σύγκρουσης, αφού η πάχυνση του φλοιού δημιουργεί ισοστατική ανισορροπία με επακόλουθο την κατάρρευση του ορογενούς, που οδηγεί, συνήθως με ταχύ ρυθμό, σε εκλέπτυνση του φλοιού μέσα από κανονικά ρήγματα.

Η δημιουργία οροσειρών σε καθεστώς εφελκυσμού οδηγεί σε τεκτονικές μεγα-δομές γνωστές

με το όνομα **συμπλέγματα μεταμορφικού πυρήνα (metamorphic core complexes)**. Αρχικά, ο όρος αυτός είχε χρησιμοποιηθεί για ορισμένες περιοχές της αμερικάνικης Κορδιλιέρας στις δυτικές Η.Π.Α., αλλά γρήγορα επεκτάθηκε η χρήση του σε όλο τον κόσμο, καθώς έγινε αντιληπτό ότι τα συμπλέγματα μεταμορφικού πυρήνα αποτελούν ένα καινούργιο φαινόμενο στην επιστήμη της Γεωλογίας, με μεγάλες συνέπειες στην τεκτονική εξέλιξη και κυρίως τον εφελκυσμό, ολόκληρων περιοχών. Τα συμπλέγματα μεταμορφικού πυρήνα είναι ενόητες πετρωμάτων που ανήκαν ή βρέθηκαν κάποτε στον ενδιάμεσο φλοιό και ανήλθαν στην επιφάνεια, με διαδικασίες που προϋποθέτουν έναν ισχυρά διεργημένο και εκταμένο (εφελκυσμένο) ανώτερο φλοιό, ενώ σήμερα εμφανίζονται να αποτελούν το κάτω τέμαχος μικρής κλίσης κανονικών ρηγμάτων.

10.2 Δομή των Συμπλεγμάτων Μεταμορφικού Πυρήνα

Το πιο θεαματικό, αλλά συγχρόνως και το πιο επίμαχο γνώρισμα των συμπλεγμάτων αυτών, είναι τα



Εικόνα 10.1 Αντιπροσωπευτικές τομές από δύο συμπλέγματα μεταμορφικού πυρήνα: **a)** των Harcuvar Mountains της Αριζόνα και **b)** των Whipple Mountains στην Καλιφόρνια.

ρήγματα αποκόλλησης (detachment faults, decollement), που φέρνουν σε επαφή πετρώματα με ριζικά διαφορετική τεκτονομεταμορφική εξέλιξη (Εικ. 10.1) και συχνά καλύπτουν πολύ μεγάλες εκτάσεις, της τάξης των δεκάδων χιλιάδων Km², με σχετική μετακίνηση των εκατέρωθεν τεμαχίων της τάξης μερικών δεκάδων Km. Πολύ συχνή είναι και η χρήση του όρου **μικρής κλίσης κανονικά ρήγματα (low angle normal faults)** επειδή φαίνεται ότι η κίνηση των επιμέρους ρηξιτεμαχίων έλαβε χώρα σε σχεδόν οριζόντιες, επίπεδες επιφάνειες. Το "άνω" ("hanging wall") και "κάτω" ("foot wall") τέμαχος των ρηγμάτων αποκόλλησης, αναφέρονται συχνά ως **ανώτερη** και **κατώτερη πλάκα (upper και lower plate)** αντιστοίχως.

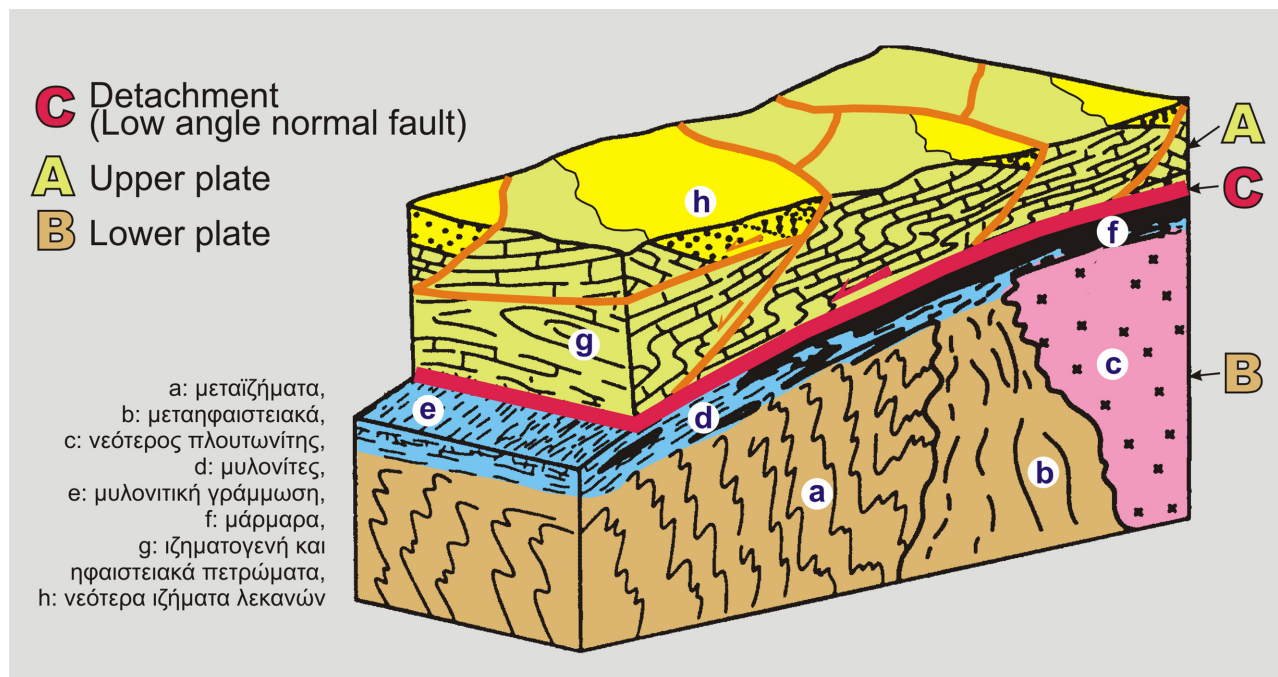
Σε όλα τα μεταμορφικά συμπλέγματα το πάνω τέμαχος (ανώτερη πλάκα), παρουσιάζεται ισχυρά διαρρηγμένο και εύκολα στοιχειοθετείται ένας σημαντικός οριζόντιος εφελκυσμός, με τη δράση διαφόρων γενεών κανονικών ρηγμάτων, μερικά από τα οποία παρουσιάζονται σήμερα με μικρές κλίσεις (Εικ. 10.1). Τα επιμέρους ρηξιτεμάχια απαρτίζονται από πετρώματα που κατά την εφελκυστική διαδικασία αποτελούσαν τμήματα του ανωτέρου φλοιού. Σε αυτή, λοιπόν, την ανώτερη πλάκα, μπορούν να

παρατηρηθούν πολλές κατηγορίες ρηγμάτων, όπως λιστρικά και κανονικά ρήγματα, παράλληλες ομάδες από κανονικά ρήγματα με διάφορες κλίσεις, καθώς και μικρής κλίσης κανονικά ρήγματα (Εικ. 10.1). Τα παράλληλα, ενδιάμεσης έως μεγάλης κλίσης, κανονικά ρήγματα αναφέρονται συνήθως με τον όρο **"ντόμινο ρήγματα" (domino faults)**. Τα ρηξιτεμάχια, που οριοθετούνται από τα ρήγματα αυτά, έχουν υποστεί συνήθως σημαντικές περιστροφές, συχνά της τάξης των 20°-60°, ή και ακόμα περισσότερο (Εικ. 10.1).

Η θραυστιγενούς τύπου παραμόρφωση (brittle deformation) στην ανώτερη πλάκα έρχεται σε θαυμάσια αντίθεση με αυτή που παρατηρείται στην κατώτερη πλάκα (Εικ. 10.1), η οποία έχει τα χαρακτηριστικά της όλκιμης παραμόρφωσης (ductile deformation). Τα πετρώματα που αποτελούν την κατώτερη πλάκα έχουν υποστεί μέσου έως πολύ υψηλού βαθμού μεταμόρφωση και κατά το ξεκίνημα της εφελκυστικής διαδικασίας, αποτελούσαν τμήματα του ενδιάμεσου φλοιού. Τα ανώτερα τμήματα της κατώτερης πλάκας περιέχουν συχνά μικρής κλίσης ζώνες από μυλονίτες και μυλονιτικούς γνεύσιους, που τα ιστολογικά και μικροτεκτονικά τους στοιχεία, από κινηματική άποψη, φανερώνουν

ότι κάποτε είχαν εμπλακεί σε μικρής κλίσης, κανονικού χαρακτήρα, ζώνες διάτμησης. Στην Εικ. 10.2 διακρίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά των συμπλεγμάτων μεταμορφικού πυρήνα της Αμερικάνικης Κορδιλιέρας των Δυτικών Η.Π.Α., τα οποία μπορούν σε γενικές γραμμές να συνοψισθούν στα παρακάτω:

εύκολα κατανοητή και ερμηνεύσιμη σε εντατικό καθεστώς συμπίεστικού χαρακτήρα. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο όταν πρόκειται για εφελκυστικό εντατικό πεδίο, όπου ο μέγιστος κύριος άξονας συμπίεσης είναι κατακόρυφος και όπου, όχι μόνο η δημιουργία, αλλά και η ολίσθηση σε τέτοια μικρής κλίσης, κανονικά ρήγματα, είναι μηχανικά αδύνατη.



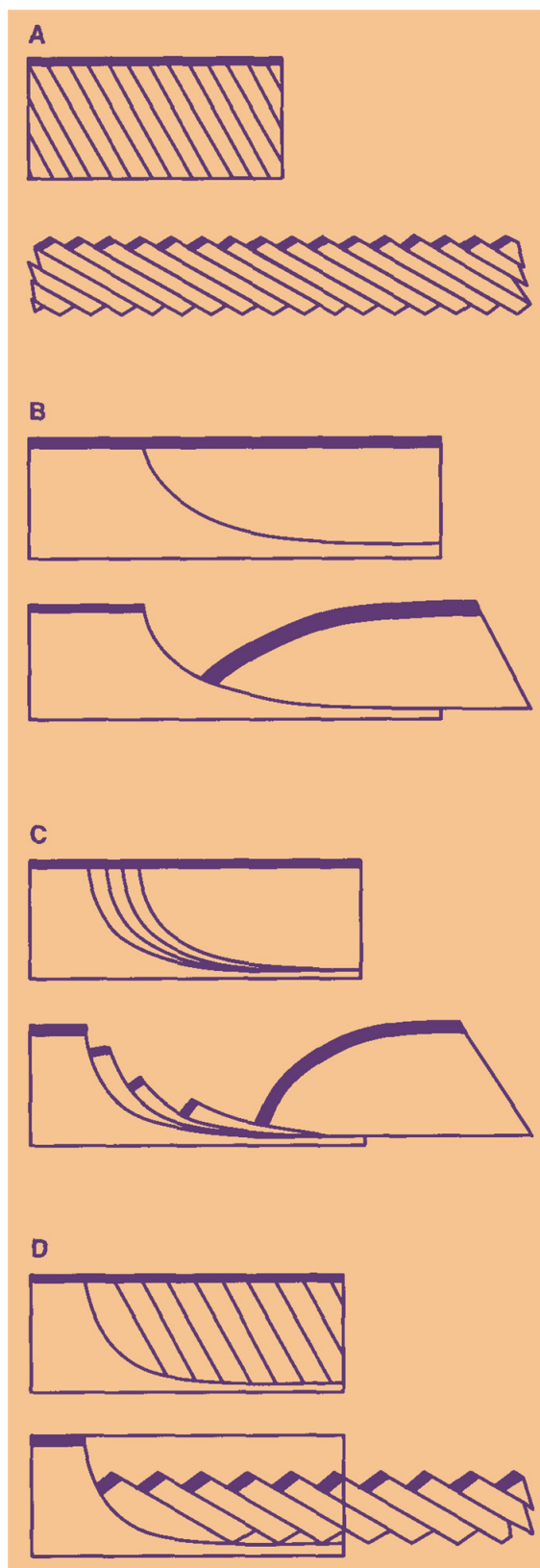
Εικόνα 10.2 Τυπικός πυρήνας μεταμορφικού συμπλέγματος. A: ανώτερη πλάκα, B: κατώτερη πλάκα, C: ρήγμα αποκόλλησης, a: παλαιότερα μετα-ιζηματογενή πετρώματα, b: παλαιότεροι πλουτωνίτες, c: νεότεροι πλουτωνίτες, d: μυλονιτική φύλλωση, e: μυλονιτική γράμμωση, f: μάρμαρο, g: ιζηματογενή και ηφαιστειακά πετρώματα, h: νεότερα ιζήματα λεκανών.

1. όλκιμες διατμητικές ζώνες στις οποίες έχουν σχηματιστεί μυλονίτες
2. επιμήκεις δόμοι πάνω στους οποίους καμυλώνεται μία γράμμωση έκτασης (stretching ή extensional lineation)
3. μία ιστορία ηφαιστειακής δραστηριότητας που σχετίζεται με την ανύψωση της κατώτερης πλάκας
4. προοδευτική μυλονιτίωση κατά τη μείωση της θερμοκρασίας
5. ρήγματα μικρής κλίσης, που δημιουργούνται κατά τα τελευταία στάδια και των οποίων το πάνω τέμαχος αποτελείται από μη μεταμορφωμένα πετρώματα.

Η προέλευση των συμπλεγμάτων μεταμορφικού πυρήνα παραμένει, μέχρι και σήμερα, θέμα υπό συζήτηση και συνδέεται άμεσα με την προσπάθεια να ερμηνευθεί ο μηχανισμός των ρηγμάτων αποκόλλησης και των σχετιζόμενων με αυτά τεκτονικών δομών. Η δημιουργία μικρής κλίσης ρηγμάτων, αλλά και η ολίσθηση σε τέτοια ρήγματα, είναι

10.3 Μοντέλα Παραμόρφωσης της Ανώτερης Πλάκας

Η ανώτερη πλάκα των συμπλεγμάτων φαίνεται να έχει παραμορφωθεί από μηχανισμούς θραύσης και διάρρηξης που δίνουν διάφορες γενιές κανονικών ρηγμάτων και έχουν δημιουργήσει διαδοχικές τεκτονικές λεκάνες και κέρατα. Όπως έχει συμβεί και με τα μοντέλα της ταφρογένεσης (rifting) παλαιότερα, τα αρχικά μοντέλα παραμόρφωσης της ανώτερης πλάκας θεωρούσαν ότι αυτή παραμορφώνεται από μεγάλα, επίπεδης μορφής και μεγάλης κλίσης, κανονικού χαρακτήρα ρήγματα που οριοθετούσαν συμμετρικές τεκτονικές λεκάνες (που γέμιζαν από διάφορης ηλικίας ιζηματογενείς σειρές), και τεκτονικά κέρατα (που αποτελούσαν τους χώρους διάβρωσης). Η νεότερη έρευνα όμως απέδειξε ότι μπορεί κάποιες λεκάνες να παρουσιάζουν συμμετρικό χαρακτήρα, αλλά δεν είναι αυτός ο κανόνας. Η λεπτομερής μελέτη των ιζηματογενών σειρών, αλλά κυρίως η χρήση σεισμικών μεθόδων



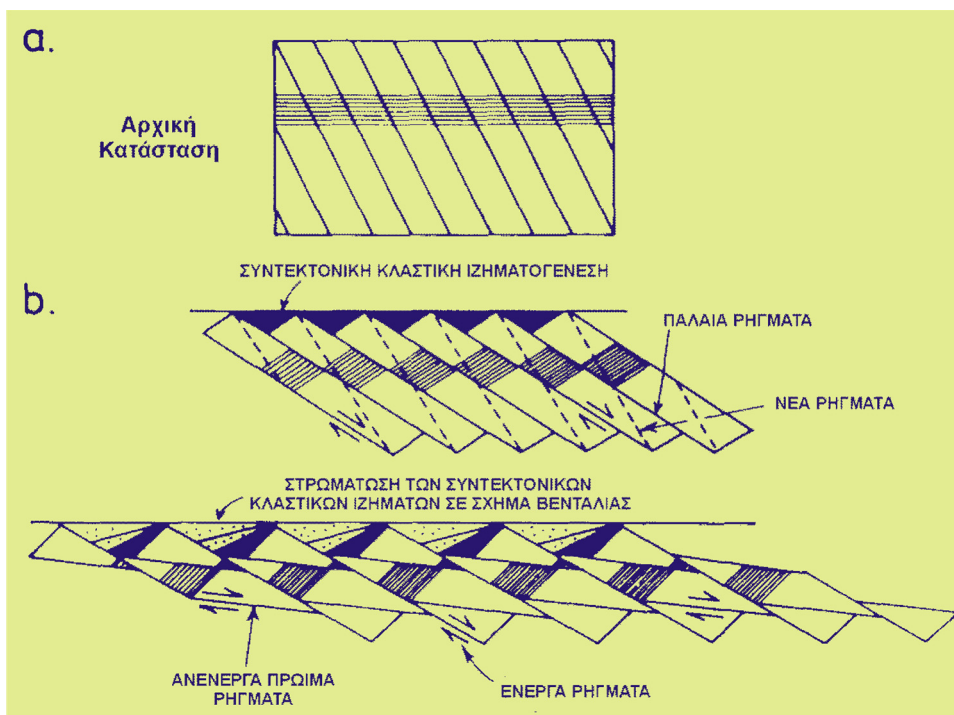
Εικόνα 10.3 Μοντέλα ρηγμάτων που χρησιμοποιούνται για τον εφελκυσμό του φλοιού. **A.** διάρρηξη τύπου "ντόμινο", **B.** λιστρική διάρρηξη με ανάστροφη πάρελξη (reverse drag), **C.** "κεραμιδοειδής" λιστρική διάρρηξη, **D.** λιστρική διάρρηξη με το πάνω τέμαχος να αποτελείται από "ντόμινο" ρήγματα.

έρευνας, απέδειξε ότι τα κέρατα αποτελούν τα μη θαμμένα τμήματα, μεγάλης κλίμακας, περιστρεφόμενων (γερμένων δηλαδή) ρηξιτεμαχών και ότι οι λεκάνες είναι τελικά ημιτάφροι (half grabens) όπου τα ρήγματα κλίνουν, συνήθως, προς την ίδια διεύθυνση και έτσι η ασυμμετρία αυτή χαρακτηρίζει ολόκληρη την εφελκυστική δομή.

Στη βιβλιογραφία οι εφελκυστικές τεκτονικές δομές διακρίνονται, συνήθως, σε δύο κύριες κατηγορίες: τις περιστροφικού και τις μη περιστροφικού χαρακτήρα. Στη μεν πρώτη κατηγορία ο εφελκυσμός συνοδεύεται από περιστροφή των στρωμάτων, ενώ μπορεί να διακριθεί και μία υποκατηγορία της όπου περιστρέφονται και τα ρήγματα, στη δε δεύτερη ο εφελκυσμός λαμβάνει χώρα χωρίς περιστροφή των στρωμάτων, και πολύ περισσότερο των ρηγμάτων. Παρόλο που στα συμπλέγματα μεταμορφικού πυρήνα και οι δύο παραπάνω κατηγορίες εφελκυστικών δομών είναι παρούσες, εντούτοις η ανάλυση της εφελκυστικής διαδικασίας, αποδεικνύει ότι την μεγαλύτερη συμμετοχή έχουν οι περιστροφικού χαρακτήρα τεκτονικές δομές (Εικ. 10.1). Έτσι, δύο "ακραία" μοντέλα για την γεωμετρία της ανώτερης πλάκας έχουν προταθεί (Εικ. 10.3).

Το ένα μοντέλο προτείνει ότι η έκταση (εφελκυσμός), της ανώτερης πλάκας προκαλείται από σειρές διαδοχικών λιστρικών ρηγμάτων, δηλαδή η ολίσθηση λαμβάνει χώρα σε μία καμπυλωμένη επιφάνεια όπου, με την αύξηση του βάθους, η κλίση της προοδευτικά μειώνεται (Εικ. 10.3B). Ένα κύριο γνώρισμα των λιστρικών ρηγμάτων είναι ότι η περιστροφή των πετρωμάτων της ανώτερης πλάκας λαμβάνει χώρα, σχεδόν αποκλειστικά, στο άνω τέμαχος, ως αποτέλεσμα της κύρτωσης που προκαλείται λόγω βαρύτητας (Εικ. 10.3B). Έτσι, μία σειρά από ρηξιτεμάχη που οριοθετούνται από λιστρικά ρήγματα (που στο σύνολό τους παρουσιάζουν μια γεωμετρία όπως τα "κεραμίδια" στη στέγη ενός σπιτιού), θα παρουσιάζουν, προς τη διεύθυνση της κίνησης, μεγαλύτερες τιμές στην κλίση των πετρωμάτων (Εικ. 10.3C). Η συνέχιση της εφελκυστικής διαδικασίας, δεν είναι απαραίτητο να προκαλέσει την περιστροφή και του ίδιου του ρήγματος. Αυτό θα συμβεί μόνο στην περίπτωση που το κάτω τέμαχος περιστρέφεται από βαθύτερα ρήγματα.

Το δεύτερο μοντέλο περιλαμβάνει διαδοχικά παράλληλα, μεγάλης γωνίας, κανονικά ρήγματα (σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους), που κατά την εφελκυστική διαδικασία περιστρέφονται έτσι ώστε τα "γερμένα" ρηξιτεμάχη να παρουσιάζουν την εικόνα του ντόμινο (Εικ. 10.3A). Το μοντέλο αυτό είναι πολύ πιο "δημοφιλές", από το προηγούμενο των λιστρικών ρηγμάτων, για την παραμόρφωση του πάνω τεμάχους των ρηγμάτων αποκόλλησης. Η απλούστερη μορφή του μοντέλου αυτού παρουσιάζει

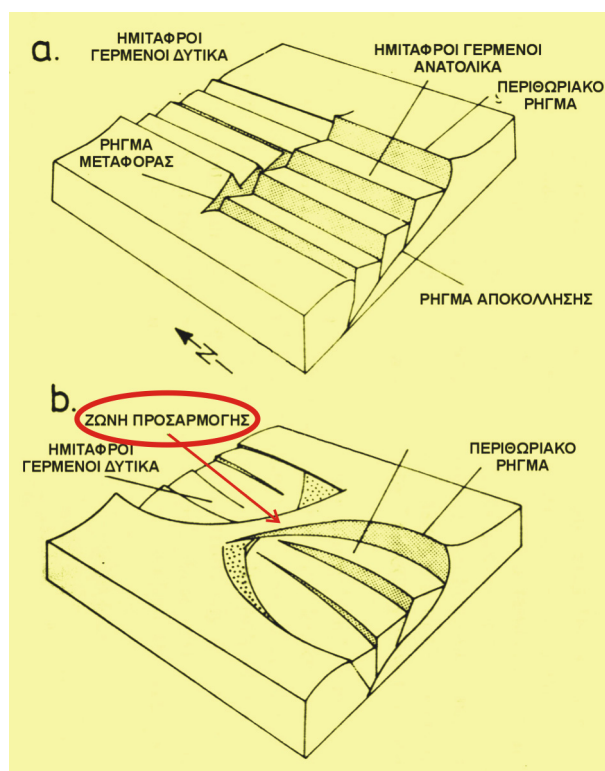


Εικόνα 10.4 Τα ντόμινο ρήγματα παρουσιάζουν αρχική κλίση 60° (α). Μετά από μία ορισμένη τιμή περιστροφής, απαιτείται η δημιουργία μίας άλλης ομάδας ρηγμάτων με κλίση περίπου στις 60° (β). Οι ημιτάφροι που δημιουργούνται γεμίζουν με συντεκτονικά ιζήματα, όπου τα παλαιότερα παρουσιάζουν μεγαλύτερες κλίσεις από τα νεότερα

ζει ένα πρόβλημα χώρου, όπου, κατά το "γέρσιμο" των ρηξιτεμαχών, δημιουργείται ένα μεγάλο κενό στη βάση τους (Εικ. 10.3Α). Το πρόβλημα αυτό φαίνεται να ξεπερνιέται είτε από ένα συνδυασμό ρηξιγενούς και όλκιμης παραμόρφωσης, αν η διάρρηξη φτάνει σε βάθος τουλάχιστον μέχρι τη ζώνη μετάβασης θραυστιγενούς-όλκιμης παραμόρφωσης, είτε από έντονη κατακλαστική ροή στη βάση των ρηξιτεμαχών. Το γέρσιμο των ρηξιτεμαχών ακολουθεί τους κανόνες της περιστροφής στερεού σώματος και έτσι, αν κατά το ξεκίνημα της εφελκυστικής διαδικασίας, τα στρώματα ήταν οριζόντια, μετρώντας τις κλίσεις των στρωμάτων και των ρηγμάτων, μπορεί να υπολογισθεί το ποσό του εφελκυσμού που έχει επηρεάσει την περιοχή.

Λόγω της περιστροφής των ρηγμάτων, η διατηρητική τάση που απαιτείται για την ολίσθηση αυξάνεται και έτσι, μετά από μία ορισμένη τιμή της κλίσης, δεν μπορεί να λάβει χώρα παραπέρα ολίσθηση. Τότε καινούργιες σειρές από μεγάλης κλίσης ρήγματα δημιουργούνται, που τέμνουν τα παλαιότερα και, καθώς περιστρέφονται και αυτά, περιστρέφουν ταυτόχρονα και όλες τις πρώιμες τεκτονικές δομές, μαζί και τα συντεκτονικά ιζήματα (Εικ. 10.4). Έτσι, η όλη ακολουθία των συντεκτονικών ιζηματογενών σειρών, παρουσιάζει μία μείωση της κλίσης των στρωμάτων προς τα νεότερα μέλη (Εικ. 10.4).

Τόσο τα λιστρικά, όσο και τα ντόμινο ρήγματα, τέμνονται συχνά, σχεδόν κάθετα στην διεύθυνση της παράταξής τους, από άλλα ρήγματα που καλούνται **ρήγματα μεταβίβασης (transfer faults)** (Εικ. 10.5α). Αυτά επιτρέπουν σε γειτονικές περιο-



Εικόνα 10.5 Επίπεδα ρήματα μεταβίβασης που χωρίζουν ζώνες με διαφορετική γεωμετρία (α). Καμπύλα λιστρικά ρήματα που η γεωμετρία τους αλλάζει μέσω ζωνών προσαρμογής (β).

χές να έχουν μερικώς ή εξ' ολοκλήρου διαφορετικό ρυθμό και γεωμετρία εφελκυσμού και έτσι να δημιουργούνται εφελκυστικές ζώνες που διαφέρουν στο είδος της παραμόρφωσης κατά μήκος της πα-

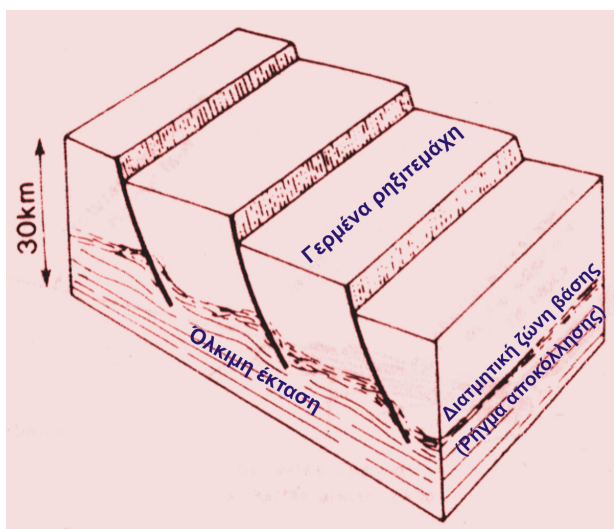
ράταξης των ρηγμάτων (Εικ. 10.5a). Πρόσφατες αναλύσεις σε περιοχές με κύρια γεωμετρία τα λιστρικά ρήγματα δείχνουν ότι τα ρήγματα αυτά παρουσιάζονται καμπυλωμένα τόσο κατά μήκος της παράταξής τους, όσο και κατά μήκος της φοράς κλίσης τους και σε τρισδιάστατη απεικόνιση έχουν την μορφή "κουταλιού" (Εικ. 10.5b). Έτσι, μεταξύ ρηγμάτων με αντίθετη φορά καμπυλότητας, παρατηρούνται μεταβατικές ζώνες που είναι ισοδύναμες των ρηγμάτων μεταβίβασης.

Σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές, τα στοιχεία από τα σεισμολογικά δεδομένα και οι σύγχρονες ερμηνείες για τον εφελκυσμό αποκαλύπτουν ότι αυτός συνδέεται σχεδόν αποκλειστικά με επίπεδα ρήγματα με μεγάλες κλίσεις. Αυτά φαίνεται να παρουσιάζουν επίπεδη μορφή μέχρι τα βάθη των 10-16 Km, χωρίς να παρατηρείται κάποια ισχυρή καμπύλωσή τους, όπως συμβαίνει στα λιστρικά ρήγματα. Μάλιστα, έχει αποδειχθεί ότι η κλίση ενός τέτοιου ρήγματος δεν παρουσιάζει διαφορά στην κλίση του, με την αύξηση του βάθους, μεγαλύτερη

μορφωμένου, ανώτερου φλοιού.

Και τα δύο μοντέλα έκτασης εμφανίζουν τα ρήγματα (λιστρικά ή τύπου ντόμινο ανάλογα με το μοντέλο) που τέμνουν το πάνω τεμάχος να διακλαδίζονται στο βάθος με ένα, επίπεδης μορφής και μικρής κλίσης, κανονικό ρήγμα, το ρήγμα αποκόλλησης. Όπου το ρήγμα αποκόλλησης εντοπίζεται σε ρηχούς τεκτονικούς ορόφους, τα επιμέρους ρηξιτεμάχη παρουσιάζονται αρκετά περιστραμμένα (γερμένα) και τα ρήγματα που τα οριοθετούν λιγότερο ενεργά. Αντίθετα στο τμήμα του ρήγματος αποκόλλησης, που βρίσκεται σε βαθιούς τεκτονικούς ορόφους, τα ρηξιτεμάχη είναι λιγότερο γερμένα και τα ρήγματα πιο βαθιά και περισσότερο ενεργά. Στην περίπτωση αυτή, δεν μπορούμε να μιλάμε για ένα ρήγμα αποκόλλησης με την έννοια μίας ρηξιγενούς επιφάνειας, επίπεδης και καθορισμένης, αλλά για μικρής κλίσης όλκιμες διατμητικές ζώνες, που δημιουργούνται στη βάση των μεγάλων κανονικών ρηγμάτων. Σε αυτή τη μεταβατική ζώνη, τα, με εύπλαστο τρόπο, παραμορφωμένα πετρώματα κόβονται από ρήγματα, κυρίως όταν λαμβάνουν χώρα μεγάλα σεισμικά γεγονότα.

Ολοκληρώνοντας για την παραμόρφωση της πάνω πλάκας, επισημαίνεται ότι είναι μάλλον αδύνατο να ενεργεί αποκλειστικά ο ένας από τους δύο τύπους ρηγμάτων. Ένα γενικό σενάριο έκτασης και εφελκυσμού της ανώτερης πλάκας μπορεί να περιλαμβάνει την ταυτόχρονη λειτουργία και των δύο αυτών "ακραίων" μοντέλων. Αρκετοί ερευνητές έχουν προτείνει ότι τα πιο σημαντικά ρήγματα στις περιοχές που υπόκεινται σε εφελκυσμό είναι τα λιστρικά, ενώ τα ντόμινο ρήγματα παρατηρούνται στα πάνω τεμάχη των λιστρικών αυτών ρηγμάτων (Εικ. 10.3D). Γι' αυτό το λόγο αρκετοί υποστηρίζουν ότι τα ρήγματα αποκόλλησης είναι επίπεδης μορφής στο κατώτερο και λιστρικής μορφής στο ανώτερο τμήμα τους.



Εικόνα 10.6 Τα σεισμολογικά δεδομένα προϋποθέτουν μεγάλου βάθους και κλίσης κανονικά ρήγματα που οριοθετούνται από, σχεδόν οριζόντιες, όλκιμες διατμητικές ζώνες, που "ανακουφίζουν" τις τάσεις που αναπτύσσονται στη βάση των ρηγμάτων αυτών.

των 10⁰. Στη βάση λοιπόν των, κλίμακας φλοιού, ρηξιτεμαχών, που οριοθετούνται από αυτά τα ρήγματα, αναπτύσσονται όλκιμες διατμητικές ζώνες, μικρής κλίσης που ανακουφίζουν τις τάσεις που δημιουργούνται από την ολίσθηση αυτών των ρηγμάτων, όταν λάβει χώρα, για παράδειγμα, ένα σεισμικό γεγονός (Εικ. 10.6). Η κλίση μάλιστα αυτών των διατμητικών ζωνών είναι μικρή για να μπορούν αυτές να αποτελούν τις ζώνες μετάβασης μεταξύ του, με όλκιμο τρόπο παραμορφωμένου, κατώτερου φλοιού και του, με θραυστιγενή τρόπο παρα-

10.4 Μοντέλα Παραμόρφωσης της Κατώτερης Πλάκας

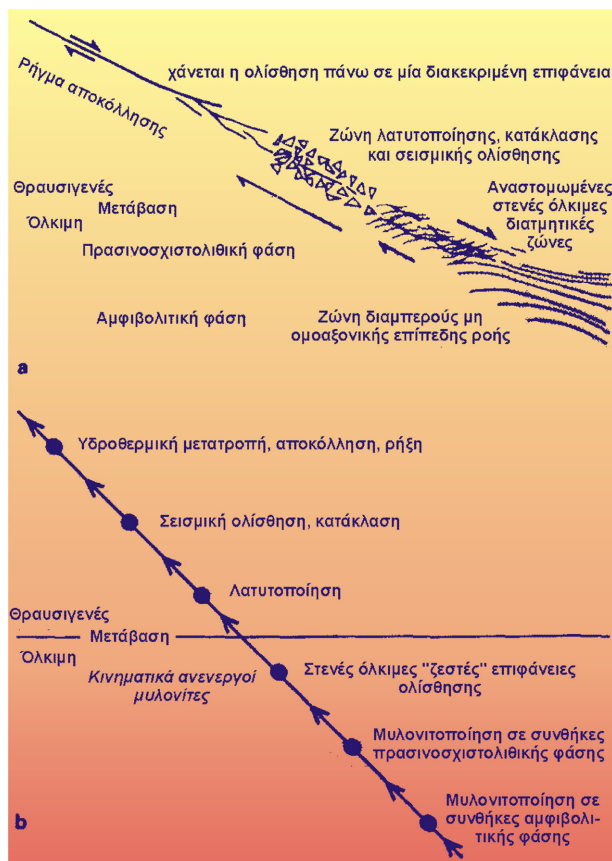
Τα θραυστιγενή φαινόμενα της ανώτερης πλάκας των συμπλεγμάτων μεταμορφικού πυρήνα δίνουν τη θέση τους στην όλκιμη παραμόρφωση της κατώτερης. Τα ανώτερα τμήματα του κάτω τεμάχους περιέχουν ζώνες μικρής κλίσης από μυλονίτες, μυλονιτικούς γενέσιους, υπερμυλονίτες κλπ. Αρχικά πιστευόταν ότι τα πετρώματα αυτά είχαν υποστεί έντονο οριζόντιο εφελκυσμό και ότι αυτός είχε επηρεάσει όλο το φλοιό ή τη λιθόσφαιρα. Μικροτεκτονικές αναλύσεις και η χρήση μίας μεγάλης ποικιλίας μικροτεκτονικών κινηματικών δεικτών απέδειξαν ότι τα τμήματα αυτά συμμετείχαν κάποτε σε

μικρής βύθισης, κανονικής ολίσθησης, διατμητικές ζώνες. Έτσι, έγινε κατανοητό ότι οι διατμητικές ζώνες δημιουργήσαν σημαντικό οριζόντιο εφελκισμό των πετρωμάτων, χωρίς όμως να επηρεάσουν τα βαθύτερα πετρώματα της κατώτερης πλάκας.

Οι διατμητικές αυτές ζώνες εξελίσσονται με σύνθετο και πολύπλοκο τρόπο, τόσο στο χώρο όσο και το χρόνο. Εξελίσσονται πλευρικά αλλά και με το βάθος, γιατί οι ιδιότητες των πετρωμάτων αλλάζουν με τις συνθήκες του περιβάλλοντος, συνθήκες όπως η πίεση, η θερμοκρασία, οι διαφορικές τάσεις, η συμμετοχή ρευστών, η πίεση των ρευστών, η σύσταση των ρευστών κλπ. Εξελίσσονται με το χρόνο γιατί η λειτουργία των διατμητικών ζωνών μεταφέρει πετρώματα από έναν τεκτονικό όροφο σε άλλο, εκτός και αν η κίνηση είναι σχετικά οριζόντια. Έτσι, σε μία διατμητική ζώνη, κανονικού χαρακτήρα, καθώς η κατώτερη πλάκα μετακινείται προς την επιφάνεια, οι μυλονίτες που σχηματίστηκαν σε κάποιο βάθος μεταφέρονται σε ρηχότερους τεκτονικούς ορόφους και υπόκεινται σε διαφορετικούς μηχανισμούς παραμόρφωσης. Αυτή η αλληλεξάρτηση μεταξύ του χώρου και του χρόνου, είναι από τα πιο χαρακτηριστικά γνωρίσματα των διατμητικών ζωνών. Η χωρική σειρά που διακρίνεται στην Εικ. 10.7a για μία εξελισσόμενη διατμητική ζώνη, αντανακλάται επίσης και σε μία χρονική σειρά γεγονότων (Εικ. 10.7b), που μπορούν να αναγνωρισθούν μελετώντας τη σειρά των μεσοσκοπικών και μικροσκοπικών τεκτονικών και πετρολογικών δομών του πετρώματος. Σημειώνεται ότι η μετάβαση μεταξύ θραυστιγενούς και όλκιμης παραμόρφωσης φαίνεται ως μία απότομη μετάβαση για την απλοποίηση του σχήματος.

Στα περισσότερα συμπλέγματα η ακολουθία αρχίζει με διαμπερή, μη ομοαξονική, τεκτονική ροή κατά επίπεδα, σε συνθήκες μεταμόρφωσης αμφιβολιτικής ή άνω πραιοσχιτολιθικής φάσης και με δημιουργία L και S τεκτονικών. Οι πιο σημαντικές μικροδομές σε αυτούς τους L ή S τεκτονίτες είναι η γράμμωση έκτασης, οι ατρακτοειδείς δομές των μαρμαρυγιών (mica fish), η ανάπτυξη πλάγιων φυλλώσεων (oblique foliations) και τα δυναμικά ανακρυσταλλωμένα χαλαζιακά αθροίσματα. Οι μετρήσεις του c-άξονα χαλαζία δείχνουν στοιχεία έντονης μη ομοαξονικής τεκτονικής ροής κατά επίπεδα, με μεγάλη συμμετοχή της απλής διάτμησης. Επίσης, οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται στον προσανατολισμό της γράμμωσης από ένα μέρος σε άλλο, είναι συνήθως βαθμιαίες και μάλιστα είναι παράλληλες με τεκτονικές γραμμώσεις σε γειτονικά θραυστιγενώς παραμορφωμένα πετρώματα της ανώτερης πλάκας.

Οι παραπάνω μικροδομές έχουν επικαλυφθεί τοπικά από, μικρού πάχους, όλκιμες διατμητικές ζώνες, που τέμνουν τον παλαιότερο ιστό. Το μέγε-



Εικόνα 10.7 Η θεωρία μίας εξελισσόμενης διατμητικής ζώνης, απαιτεί μία χωρική και χρονική διαφοροποίηση. Στο διάγραμμα (a) διακρίνεται η χωρική διαφοροποίηση της συμπεριφοράς των πετρωμάτων με την αύξηση του βάθους, με το ρήγμα αποκόλλησης να εξαφανίζεται μέσα σε ζώνες λατυποποίησης, κατάκλασης και σεισμικής ολίσθησης και έπειτα να περνάει σε όλκιμες διατμητικές ζώνες. Ένα πέτρωμα που ανεβαίνει προς τα πάνω, στο κάτω τέμαχος ενός ρήγματος αποκόλλησης, μετατρέπει τη χωρική σειρά συμπεριφοράς του υλικού του διαγράμματος (a) σε χρονική σειρά αντίδρασης του υλικού του διαγράμματος (b).

θος των ανακρυσταλλωμένων κόκκων μειώνεται φανερόντας υψηλές διαφορικές τάσεις κατά τη δημιουργία τους. Αυτό το συμπέρασμα είναι συμβατό με την άποψη ότι τα πετρώματα ταξιδεύοντας προς τα πάνω στο κάτω τέμαχος ενός συστήματος αποκόλλησης, πρέπει να περάσουν από την μετάβαση θραυστιγενούς-όλκιμης παραμόρφωσης και έτσι είναι κοντά σε τεκτονικούς ορόφους όπου οι διαφορικές τάσεις αναμένεται να είναι οι υψηλότερες. Η φορά της διάτμησης σε αυτές τις διατμητικές ζώνες, παραμένει συνεχώς σταθερή.

Στους ανώτερους τεκτονικούς ορόφους, η κίνηση λαμβάνει χώρα σε επίπεδες ρηξιγενείς επιφάνειες, που συνοδεύονται από ζώνες θραυσματοπαγών και τεκτονικών λατυποπαγών. Τα θραυσματοπαγή μπορεί να δημιουργούνται από μεταφορά μάζας, που συνοδεύει την μετανάστευση των υγρών

μέσω των επιφανειών των ρηγμάτων, ενώ η κατάκλαση μπορεί να είναι αποτέλεσμα συνεχιζόμενης λατυποποίησης των πετρωμάτων. Σε περιπτώσεις όπου η κίνηση των ρηγμάτων είναι αρκετά γρήγορη για να γεννήσει έναν σεισμό και δεν υπάρχουν σημαντικά ποσά ρευστών, τότε μπορεί να λάβει χώρα τήξη των πετρωμάτων και η ανάπτυξη φλεβών νευδοταχυλίτη.

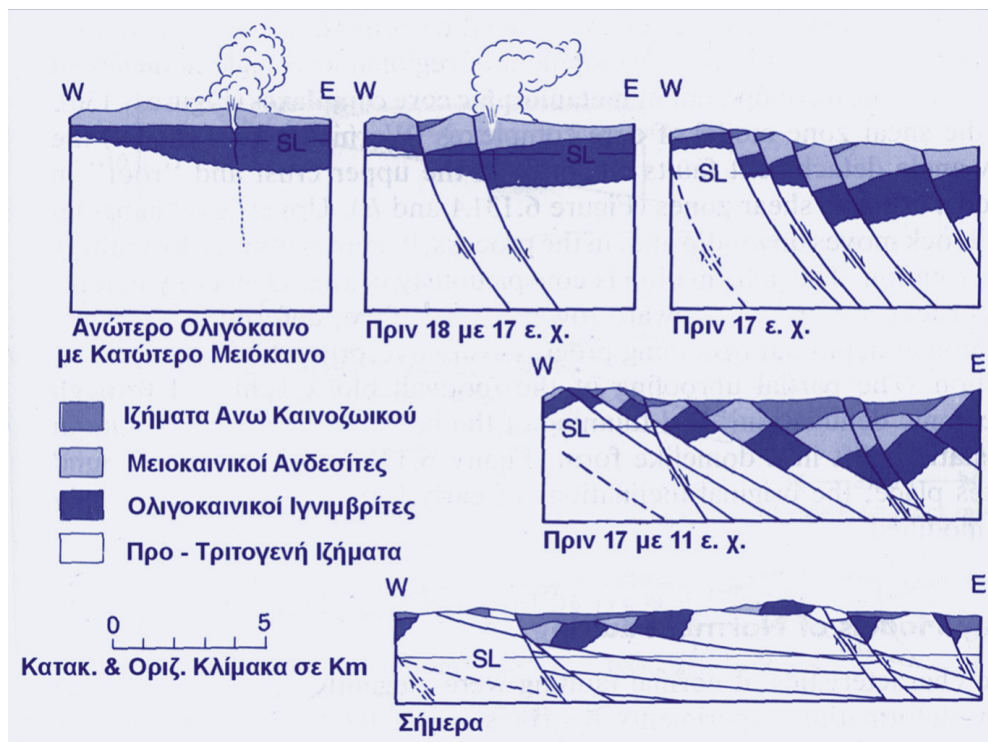
10.5 Μοντέλα Προέλευσης των Ρηγμάτων Αποκόλλησης

Στα προηγούμενα περιγράψαμε τα διάφορα μοντέλα παραμόρφωσης για την ανώτερη και κατώτερη πλάκα ενός συστήματος μεταμορφικού πυρήνα. Το ερώτημα που τίθεται είναι πως όλα αυτά συνδέονται με το ρήγμα αποκόλλησης και τελικά ποια είναι η προέλευσή του, πως δημιουργείται και πως εξελίσσεται μέσα στο χώρο και το χρόνο. Οποιοδήποτε μοντέλο για την προέλευση των ρηγμάτων αποκόλλησης ταυτίζεται στην ουσία με τη δημιουργία των συμπλεγμάτων μεταμορφικού πυρήνα. Τα ρήγματα αποκόλλησης έχουν περιγραφεί και ερμηνευθεί κατά καιρούς ως: ασυμφωνίες, επωθή-

αυτό που σήμερα βλέπουμε, δηλαδή μικρής κλίσης κανονικά ρήγματα.

Η αρχή για την έντονη διαμάχη που έχει ξεσπάσει σχετικά με την προέλευση των ρηγμάτων αποκόλλησης, έγινε στις αρχές της δεκαετίας του '70, όταν ορισμένοι ερευνητές απέδειξαν ότι πολλά από τα ρήγματα που είχαν περιγραφεί από παλαιότερους μελετητές ως επωθήσεις, ουσιαστικά ήταν ρήγματα μικρής κλίσης, με κανονική φορά κίνησης. Πολλοί αντιμετώπισαν μεγάλη δυσκολία στο να πείσουν ότι τα μικρής κλίσης κανονικά ρήγματα που περιέγραφαν, ήταν πραγματικά ρήγματα και όχι ασυμφωνίες ή κανονικές επαφές στρωμάτων (Εικ. 10.8). Ανέφεραν, μάλιστα, πολύ σημαντικές περιστροφές των στρωμάτων και των ρηγμάτων, περιστροφές που σε αρκετές περιπτώσεις ξεπερνούσαν τις 90° , όπου τα σχετικά παλιότερα ρήγματα έχουν περιστραφεί (και έτσι έχουν αποκτήσει μικρότερες κλίσεις) και ταυτόχρονα έχουν γίνει ανενεργά. Στη συνέχεια τέμνονται και περιστρέφονται ακόμη περισσότερο από σχετικά νεότερα ρήγματα (Εικ. 10.8).

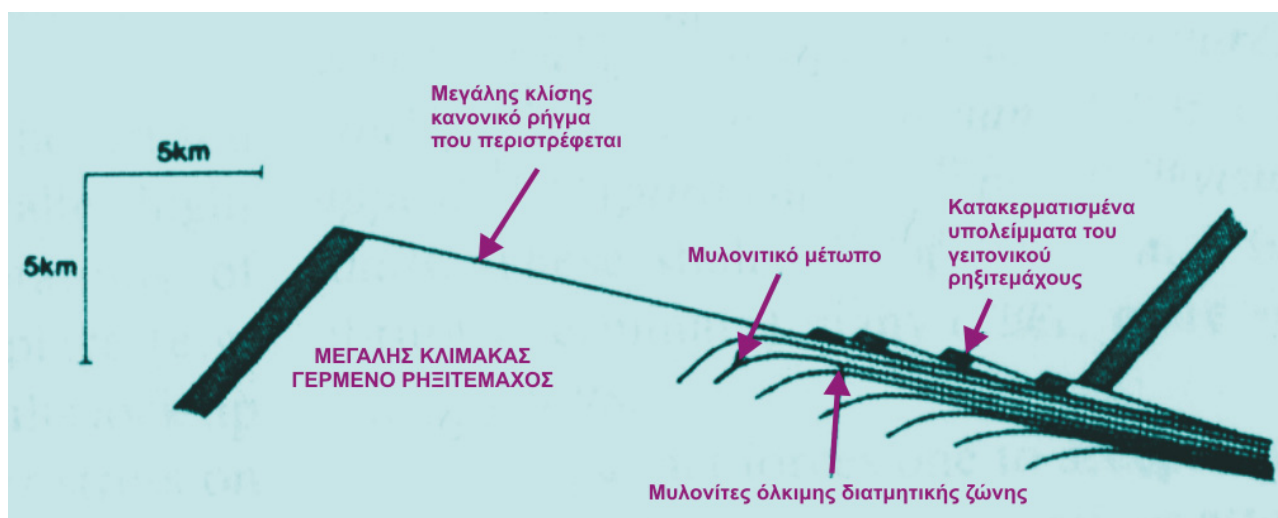
Η απόδειξη της ύπαρξης των μικρής κλίσης κανονικών ρηγμάτων έφερε ένα πολύ σημαντικό, μηχανικής φύσεως, πρόβλημα. Η θεωρία του Anderson παρουσιάζει ένα γενικό πλαίσιο για την



Εικόνα 10.8 Το κινηματικό πρότυπο παραμόρφωσης στη Δυτική Νεβάδα των Η.Π.Α. με κύριο χαρακτηριστικό την περιστροφή και σταδιακή μείωση της κλίσης των ρηγμάτων, που καθίστανται ανενεργά και τη δημιουργία νέας γενεάς ρηγμάτων.

σεις ή εφιπτεύσεις, επωθήσεις που έχουν επαναστασιοποιηθεί, ως μεγάλης κλίσης κανονικά ρήγματα που περιστράφηκαν, ως επιφάνειες που αντιπροσωπεύουν την μετάβαση μεταξύ θραυσίγους και όλκιμης παραμόρφωσης και τελικά ως

περιγραφή της θραύσης (διάρρηξης), σε σχέση με το ασκούμενο εντατικό πεδίο στο γήινο φλοιό. Η γήινη επιφάνεια θεωρείται μία ελεύθερη επιφάνεια και επομένως οι κύριοι άξονες είναι κάθετοι ή παράλληλοι σε αυτή, στους ανώτερους τεκτονικούς



Εικόνα 10.9 Ένα μοντέλο για την προέλευση των μεταμορφικών συμπλεγμάτων είναι η τύπου ντόμινο περιστροφή τεραστίων ρηξιτεμαχών. Το μοντέλο υποθέτει ότι το ρήγμα αποκόλλησης είναι ένα περιστραμμένο μεγάλης κλίσης κανονικό ρήγμα, γεγονός όμως που απαιτεί μία πολύ μεγάλη διαφοροποίηση του μεταμορφικού βαθμού του κάτω τεμάχους προς τη φορά κλίσης του ρήγματος.

ορόφους. Έτσι, για να λάβει χώρα η γένεση κάποιου κανονικού ρήγματος πρέπει ο άξονας σ_1 να είναι κατακόρυφος και οι σ_2 και σ_3 να είναι οριζόντιοι. Η μέγιστη κύρια τάση αντιπροσωπεύεται από το λιθοστατικό φορτίο. Το ρήγμα που θα δημιουργηθεί θα σχηματίζει γωνία με το οριζόντιο επίπεδο $\theta=90^\circ-\phi$, όπου ϕ η εσωτερική γωνία τριβής του πετρώματος και επειδή η μέση τιμή της ϕ είναι περίπου 30° , η γωνία θ έχει τιμή περίπου 60° .

Η μελέτη των μηχανισμών γένεσης ενός σημαντικού αριθμού μεγάλων σεισμών απέδειξε ότι αυτοί γεννιούνται από ρήγματα με κλίσεις μεταξύ 30° - 60° , ενώ δεν έχει μέχρι σήμερα παρατηρηθεί σεισμικότητα πάνω σε κανονικά ρήγματα μικρής κλίσης ($<20^\circ$). Αυτό όμως έρχεται σε αντίθεση με τα στοιχεία υπαίθρου από πολλές περιοχές της γης με καθεστώς εφελκυσμού, όπου περιγράφονται μικρής κλίσης κανονικά ρήγματα και μάλιστα με πολύ μεγάλα άλματα. Άρα λοιπόν ή θα πρέπει για το τοπικό εντατικό ή διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης να αποκλίνει σημαντικά από την κατακόρυφο, ή θα πρέπει να αναζητηθεί άλλη ερμηνεία. Μία λύση που προτάθηκε ήταν η επαναδραστηριοποίηση κάποιου παλαιότερου ρήγματος που είτε ήταν αρχικά μία επιφάνεια επώθησης, είτε ένα μεγάλης κλίσης κανονικό ρήγμα που περιστράφηκε. Αυτή η λύση όμως δεν θεωρείται ιδιαίτερα ικανοποιητική δεδομένου ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η διατμητική αντοχή μιας προϋπάρχουσας ασυνέχειας (επώθηση, ρήγμα κλπ.), που όμως έχει κακό προσανατολισμό σε σχέση με τους κύριους άξονες των τάσεων, υπερβαίνει την αντίστοιχη διατμητική αντοχή για την γένεση μίας νέας, πιο ικανοποιητικής για ολίσθηση, επιφάνειας.

Μία άλλη λύση είναι αυτή που υποστηρίζει ότι

αυτά που σήμερα βλέπουμε ως μικρής κλίσης κανονικά ρήγματα δεν ήταν τίποτε άλλο παρά μεγάλης κλίσης κανονικά ρήγματα, που επεκτείνονταν σε μεγάλο βάθος στο φλοιό και τα οποία περιστράφηκαν με αποτέλεσμα να αποκτήσουν μικρότερες κλίσεις. Αναφέραμε σε προηγούμενη παράγραφο ότι τα σημερινά μεγάλα ρήγματα εκτείνονται σε μεγάλο βάθος χωρίζοντας επιμέρους ρηξιτεμάχη (σε κλίμακα φλοιού) και τα οποία στο βάθος οριοθετούνται από όγκιμες διατμητικές ζώνες, που ανακουφίζουν τις τάσεις που δημιουργούνται από την ολίσθηση πάνω σε ένα τέτοιο κανονικό ρήγμα, για παράδειγμα μετά από ένα σεισμικό γεγονός. Θα μπορούσε ένα τέτοιο τεράστιο ρηξιτεμάχος να περιστραφεί έτσι ώστε η βάση του να ανυψωθεί και να αποκαλυφθεί στην γήινη επιφάνεια (Εικ. 10.9). Τότε αυτό που θα βλέπαμε θα ήταν ένα τεράστιο οριζόντιο ρήγμα που είχε περιστραφεί από μία αρχική κλίση των 60° . Το πρόβλημα με ένα τέτοιο μοντέλο είναι ότι απαιτεί μία αύξηση του βαθμού μεταμόρφωσης στην κατώτερη πλάκα, καθώς βαδίζουμε προς τη φορά κλίσης του ρήγματος, κάτι το οποίο όμως δεν παρατηρείται.

Το ενδιαφέρον λοιπόν για την προέλευση των ρηγμάτων αποκόλλησης εστιάζεται ουσιαστικά σε δύο βασικά ερωτήματα: α) πώς μπορεί να παραχθεί μία σχεδόν οριζόντια επιφάνεια που χωρίζει πολύ διαφορετικού βαθμού μεταμόρφωσης πετρώματα, δηλαδή έχει να κάνει με τη φύση της κίνησης τόσο πάνω σε αυτήν την επιφάνεια όσο και εγκάρσια σε αυτή; και β) πώς μεταφέρθηκαν τόσο γρήγορα οι μυλονίτες, στη γήινη επιφάνεια, ή πολύ κοντά σε αυτή, από το βάθος των 10-15 Km που σχηματίστηκαν, καθώς οι γεωχρονολογικές έρευνες έχουν αποδείξει την ταχεία ανύψωση αυτών; Παρακάτω

παρουσιάζονται σε γενικές γραμμές τα μοντέλα που έχουν κατά καιρούς προταθεί για την προέλευση των ρηγμάτων αποκόλλησης και κατά συνέπεια και για την δημιουργία των συμπλεγμάτων μεταμορφικού πυρήνα.

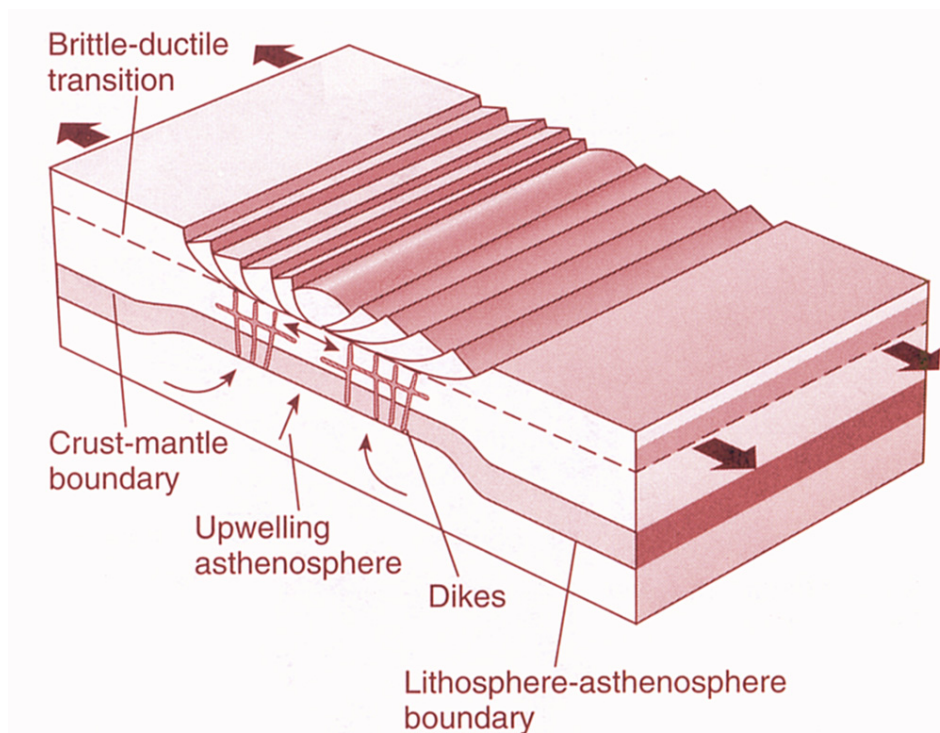
Μοντέλο Καθαρής Διάτμησης

Επειδή το ρήγμα αποκόλλησης αντιπαραθέτει πετρώματα με εντελώς διαφορετική τεκτονομεταμορφική εξέλιξη, είχε θεωρηθεί αρχικά ότι αντιπροσωπεύει την μετάβαση μεταξύ θραυστιγενούς και όλκιμης παραμόρφωσης. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η επιφάνεια αποκόλλησης θεωρείται ότι είναι η επιφάνεια εκείνη όπου τα ρήγματα της ανώτερης πλάκας σταματάνε να λειτουργούν με διαδικασίες θραύσης και δίνουν τη θέση τους σε μία πιο όλκιμη και καθαρή διάτμηση (Εικ. 10.10). Το μοντέλο αυτό έφερε μαζί του αρκετά προβλήματα, όχι μόνο μηχανικής φύσεως και στην απλούστερη μορφή του έχει απορριφθεί.

Το σημαντικότερο πρόβλημα αφορά την ίδια τη φύση της μετάβασης, η οποία είναι πολύ πιο πολύπλοκη από ότι ένα απλό διάγραμμα μπορεί να δείξει. Ο όρος θραυστιγενής είναι ένας όρος που εξαρτάται καθαρά από την κλίμακα παρατήρησης και έχει διαφορετική εφαρμογή σε κλίμακα μικρής τομής από ότι σε κλίμακα φλοιού. Επίσης έχει κατά καιρούς προταθεί ότι η μετάβαση αυτή αντιπροσωπεύει το σεισμικό/ασεισμικό όριο. Αυτό μπορεί να είναι σωστό, αλλά η μετάβαση εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως η ορυκτολογική σύνθεση των πετρωμάτων, η πίεση, η θερμοκρασία και η

παρουσία ή όχι ρευστής φάσης. Επίσης, ορισμένα ρήγματα μπορούν να λειτουργούν για μεγάλη περίοδο ασεισμικά, κυρίως με την παρουσία πεπιεσμένων ρευστών, και κατά τη διάρκεια ενός σεισμού να διαδοθούν μέχρι τα βάθη των 15-20 Km, όπου κόβουν πετρώματα που κάτω από άλλες συνθήκες θα παραμορφώνονταν με όλκιμο τρόπο. Αυτά τα πετρώματα θα απορροφήσουν την αύξηση της τάσης λόγω του σεισμικού γεγονότος με έναν εύπλαστο τρόπο έτσι ώστε να παρατηρηθεί μία εναλλαγή από διάρρηξη και θραύση σε όλκιμη ροή σε αυτά τα βάθη. Επομένως, είναι πολύ δύσκολο να ορισθεί ένα συγκεκριμένο βάθος που να σηματοδοτεί την μετάβαση μεταξύ θραυστιγενούς και όλκιμης παραμόρφωσης και φαίνεται ότι η μετάβαση είναι πολύ περισσότερο βαθμιαία παρά απότομη, όπως παρουσιάζεται σε αυτό το μοντέλο. Το μοντέλο αυτό μπορεί να συμφωνεί με την απλή μηχανική των πετρωμάτων, ωστόσο είναι δύσκολο να ερμηνεύσει την απότομη αλλαγή στον βαθμό μεταμόρφωσης, ακριβώς γιατί είναι δύσκολο να ερμηνευθεί το πώς η επιφάνεια αποκόλλησης συνεχίζει να αποτελεί το όριο μεταξύ περιοχών που παραμορφώνονται τελείως διαφορετικά καθώς μεταφέρεται από το βάθος στην επιφάνεια, χωρίς να υπάρχουν τα πετρώματα εκείνα που αντανakλούν τους ενδιάμεσους τεκτονικούς ορόφους.

Πέρα από αυτές τις γενικού χαρακτήρα παρατηρήσεις, υπάρχουν και άλλα στοιχεία που οδηγούν μάλλον στην απόρριψη αυτού του μοντέλου. Πρώτον, ένα τέτοιο μοντέλο προϋποθέτει ότι οι μυλονίτες της κατώτερης πλάκας δημιουργούνται ταυτό-



Εικόνα 10.10 Τρισδιάστατο σκαρίφημα για το μοντέλο καθαρής διάτμησης. Το ρήγμα αποκόλλησης φαίνεται να αντιπροσωπεύει μία παλιά θραυστιγενή-όλκιμη μετάβαση του γήινου φλοιού. Η θραυστιγενής παραμόρφωση στον ανώτερο φλοιό είναι σύγχρονη με την όλκιμη του κατώτερου φλοιού ως αποτέλεσμα ομοαξονικού εφελκυσμού καθώς όλο το κατώτερο τμήμα της λιθόσφαιρας επεκτείνεται ομοιόμορφα.

χρονα με την θραυστιγενή παραμόρφωση της ανώτερης πλάκας. Ωστόσο, υπάρχουν μικροτεκτονικές αποδείξεις που φανερώνουν μία χρονική καθυστέρηση μεταξύ αυτών των δύο γεγονότων. Δεύτερον, η μυλονιτική φύλλωση της κατώτερης πλάκας πολλές φορές κόβεται από τα σημερινά ορατά ρήγματα αποκόλλησης, κάτι που σημαίνει ότι αυτές οι δομές ήταν ανενεργές όταν λάβαινε χώρα η αποκόλληση και άρα αυτά τα δύο γεγονότα δεν μπορεί να είναι ισόχρονα. Τρίτον, υπάρχουν αρκετές αποδείξεις που δείχνουν ότι κάποια από τα ρήγματα αποκόλλησης έχουν σχηματιστεί και λειτουργήσει σε συνθήκες οι οποίες δεν μπορούν να δικαιολογήσουν με κανένα τρόπο την όλκιμη ροή στην κατώτερη πλάκα, καθώς τόσο η ανώτερη όσο και η κατώτερη πλάκα, βρίσκονταν μέσα στο θραυστιγενή φλοιό, όταν έλαβε χώρα η αποκόλληση.

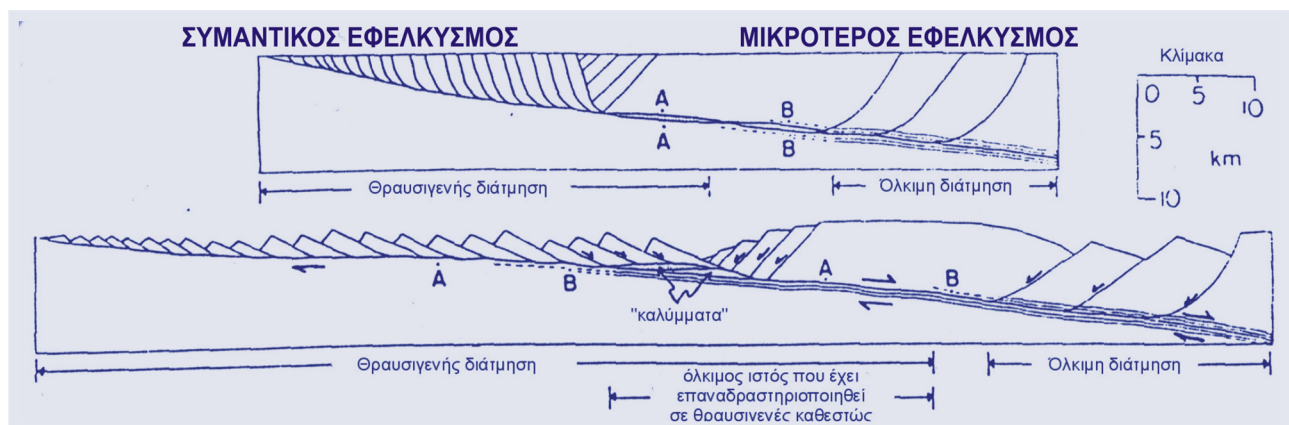
Μοντέλο Απλής Διάτμησης

Περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το μοντέλο απλής διάτμησης. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, το κλειδί του προβλήματος βρίσκεται στην κατανόηση της δημιουργίας ορεινών αλυσίδων μέσα από καθεστώς συμπίεσης, όπου οριζόντια, ή σχεδόν οριζόντια, μετατόπιση καλυμμάτων πάνω από την υποβυθιζόμενη πλάκα, μπορεί να λαμβάνει χώρα για δεκάδες ή εκατοντάδες χιλιόμετρα. Το ίδιο πιθανόν να συμβαίνει και στη δημιουργία ορεινών αλυσίδων μέσα από καθεστώς εφελκυσμού. Έτσι, τα μικρή κλίσης κανονικά ρήγματα μπορεί να εκτείνονται για δεκάδες ή εκατοντάδες χιλιόμετρα και να κόβουν ολόκληρο τον φλοιό ή και τη λιθόσφαιρα σαν μία στενή ζώνη που φέρνει σε επαφή δύο πλάκες με διαφορετικά πετρώματα (Εικ. 10.11). Προς το μέρος που βυθίζεται το μικρή κλίσης κανονικό ρήγμα, ο εφελκυσμός μπορεί να είναι ασήμαντος ή

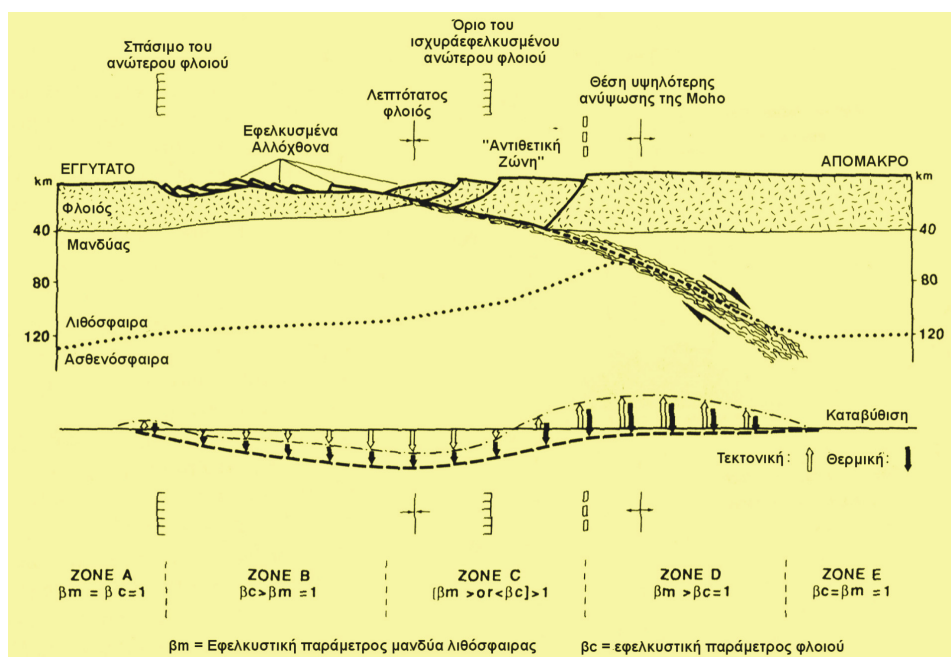
να μην υπάρχει καθόλου, αλλά προς την αντίθετη φορά, η πάνω πλάκα λεπτύνεται, χάνει τη συνοχή της και αντιπροσωπεύει ένα πεδίο που έχει υποστεί ισχυρό εφελκυσμό (Εικ. 10.11 & 10.12). Μεγάλης έκτασης και μικρή κλίσης ρήγματα, μπορεί να σχηματίζουν ζώνες με όλκιμη διάτμηση προς τα βαθύτερα τμήματά τους. Αν η μετακίνηση είναι αρκετά μεγάλη, αυτές οι ζώνες μπορεί να βρεθούν σε ανώτερους τεκτονικούς ορόφους και να επαναστασιοποιηθούν σε θραυστιγενείς συνθήκες. Πάνω από το ρήγμα αποκόλλησης, η ανώτερη πλάκα μπορεί να παραμορφώνεται με τη δημιουργία μεγάλων λιστρικών ή ντόμινο ρηγμάτων (Εικ. 10.11).

Αργότερα χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο αυτό και η επίδραση της ισοστατικής επανόρθωσης (Εικ. 10.12). Έτσι, στην περιοχή της έντονης ρήξης του ανώτερου φλοιού, θα λάβει χώρα μία αρχική καταβύθιση ανάλογη του εφελκυσμού, η οποία συνοδεύεται από μία άνοδο της βάσης της λιθόσφαιρας, χωρίς όμως να υπόκειται η ίδια σε εφελκυσμό. Στο αντίθετο άκρο της διατμητικής ζώνης, θα λάβει χώρα μία σημαντική, ισοστατική ανύψωση λόγω της λέπτυνσης της κατώτερης λιθόσφαιρας κάτω από τον μη λεπτυσμένο, υπερκείμενο φλοιό. Ακολουθώντας την εφελκυστική κίνηση της διατμητικής ζώνης, η περιοχή του λεπτυσμένου φλοιού υπόκειται σε μία μέτρια θερμική καταβύθιση καθώς η λιθόσφαιρα προσπαθεί να εξισορροπηθεί. Στο αντίθετο άκρο, επίσης, θα υπάρξει μία θερμική καταβύθιση, η οποία λόγω της απουσίας της διάβρωσης, θα αναγκάσει την επιφάνεια της λιθόσφαιρας να ξαναγυρίσει στη θέση που ήταν πριν την ανύψωση.

Το μοντέλο του αυτό συνάντησε ευρεία αποδοχή και χρησιμοποιήθηκε για να ερμηνεύσει τον εφελκυσμό σε πολλά γεωλογικά πεδία ανά τον κόσμο. Το γεγονός της ευρείας αποδοχής οφείλεται



Εικόνα 10.11 Ένα μεγάλης κλίμακας και μικρής κλίσης κανονικό ρήγμα οριοθετεί την πάνω πλάκα που έχει υποστεί ένα έντονο πεδίο εφελκυσμού δημιουργώντας ένα ρηξιγενές μωσαϊκό από λιστρικά και επίπεδα ρήγματα με έντονες περιστροφές. Επίσης διακρίνεται ο τρόπος με τον οποίο το μωσαϊκό αυτό μπορεί να βρεθεί σε επαφή με πετρώματα που έχουν υποστεί την επίδραση της πλαστικής παραμόρφωσης.



Εικόνα 10.12 Το μοντέλο απλής διάτμησης όπου διακρίνονται οι ισοστατικές κινήσεις λόγω της λειτουργίας μίας στενής, μικρής κλίσης ζώνης διάτμησης που διαπερνά όλη τη λιθόσφαιρα.

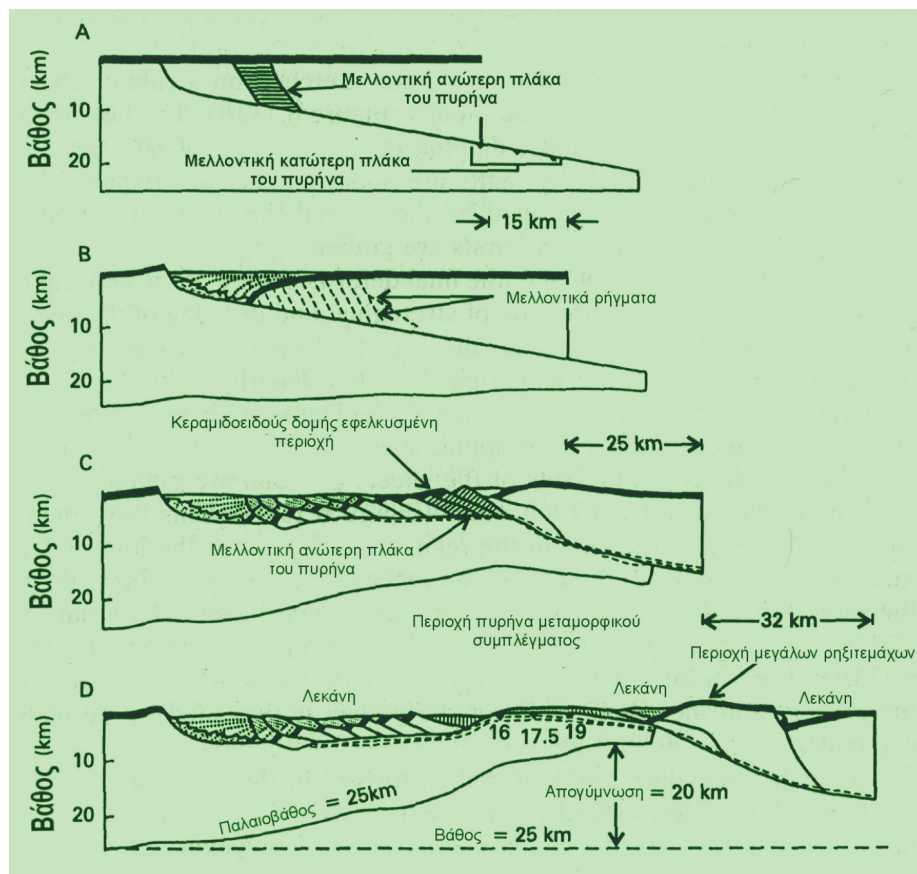
στο ότι ερμηνεύει την απότομη επαφή μεταξύ πετρωμάτων διαφορετικού βαθμού μεταμόρφωσης ενώ ταυτόχρονα συμφωνεί με τις παρατηρήσεις για τα μεγάλα άλματα των ρηγμάτων αποκόλλησης. Επίσης, προτείνει ότι τα ρήγματα που παρατηρούνται στην ανώτερη πλάκα οφείλονται σε μία "δομική κατάρρευση" του άνω τεμάχους του ρήγματος αποκόλλησης. Υπάρχουν όμως και αρκετοί σκεπτικιστές όσον αφορά την εφαρμογή αυτού του μοντέλου, πέρα από το γεγονός ότι υπάρχουν δεδομένα από τις περιοχές που εφαρμόστηκε που δεν μπορούν να ερμηνευθούν με το μοντέλο αυτό.

Ο σκεπτικισμός αυτός εστιάζεται σε δύο βασικές κατευθύνσεις. Η πρώτη σχετίζεται με το ότι η μηχανική των πετρωμάτων δεν επιτρέπει τη δημιουργία μικρής κλίσης κανονικών ρηγμάτων λόγω εφελκυσμού στο θραυσιγενές τμήμα του φλοιού καθώς και στο ότι μέχρι σήμερα δεν έχει καταγραφεί σεισμός που να οφείλεται στην δραστηριοποίηση ενός τέτοιου ρήγματος. Η θεωρία αναφέρει ότι κανονική διάρρηξη μπορεί να λάβει χώρα για επίπεδα με κλίσεις μεταξύ 45° – 70° . Αυτό βασίζεται στην παραδοχή ότι η μέγιστη συμπίεστική τάση σ_1 είναι κατακόρυφη και η ελάχιστη συμπίεστική τάση σ_3 είναι οριζόντια. Αυτή η παραδοχή συμφωνεί με τις μετρήσεις του εντατικού πεδίου σε περιοχές όπου υπάρχουν σήμερα ενεργά ρήγματα. Σημειώνεται επίσης ότι για έναν συντελεστή τριβής 0,75 δεν μπορεί να λάβει χώρα ολίσθηση σε επίπεδα με κλίσεις μικρότερες των 37° . Νεότερες έρευνες έδειξαν ότι λαμβάνοντας υπόψη ακόμα και την επίδραση της πίεσης των ρευστών των πόρων, για να λάβει χώρα ολίσθηση σε ρήγματα που βυθίζονται με γωνία μικρότερη των 20° απαιτείται ένας συντελεστής τριβής στην ολίσθηση πολύ κοντά στο μηδέν.

Η δεύτερη σχετίζεται με το συμπέρασμα όπου δεν μπορούν να συνυπάρχουν και να λειτουργούν ταυτόχρονα ρήγματα με μεγάλες κλίσεις και ρήγματα αποκολλήσεων. Αν πράγματι μικρής κλίσης κανονικά ρήγματα, υπάρχουν και συμβάλουν στον εφελκυσμό ολόκληρων περιοχών, τότε αυτές οι περιοχές πρέπει να αποτελούνται από δύο διαφορετικές επαρχίες, όπου σε κάθε μία λειτουργεί μόνο ο ένας από τους δύο τύπους παραμόρφωσης του ανώτερου φλοιού: μία επαρχία όπου λαμβάνει χώρα διάρρηξη με μικρής κλίσης ρήγματα και απουσία σεισμών και μία άλλη όπου μεγάλοι σεισμοί συνοδεύουν την ολίσθηση πάνω σε μεγάλης κλίσης κανονικά ρήγματα. Η κλίμακα όπου αυτός ο χωρικός διαχωρισμός υπάρχει, εξαρτάται καθαρά από την κλίση του ρήγματος αποκόλλησης και το πάχος του θραυσιγενούς φλοιού.

Το μοντέλο αυτό εφαρμόστηκε, όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε αρκετά γεωλογικά πεδία. Αρχικά θεωρήθηκε ένα πολύ ικανοποιητικό μοντέλο για την επαρχία Basin & Range των Η.Π.Α. αλλά το θέμα ακόμη είναι υπό έρευνα καθώς έχει δυσκολία στο να εξηγήσει κάποια δεδομένα που υπάρχουν. Έτσι, δεν μπορεί να εξηγήσει τα γεωχρονολογικά δεδομένα αφού αυτά απαιτούν ένα ρυθμό κίνησης, μίας τέτοιας μικρής κλίσης διατμητικής ζώνης, της τάξης των 2,5 cm/έτος, ώστε να μπορεί να ερμηνευθεί ο γρήγορος ρυθμός ψύξης των πετρωμάτων της κατώτερης πλάκας. Ο σημερινός όμως ρυθμός εφελκυσμού, για το μεγάλο αυτό τμήμα των Η.Π.Α., είναι μικρότερος του 1 cm/έτος. Τέλος υπάρχουν κάποιες τεκτονικές παρατηρήσεις που δεν συμφωνούν με αυτό το μοντέλο, που προϋποθέτει την ύπαρξη μίας στενής διατμητικής ζώνης που εξελίσσεται στο χώρο και στο χρόνο. Αυτό απαιτεί

Εικόνα 10.13 Το μοντέλο απλής διάτμησης. **A.** Η αρχική κατάσταση όπου διακρίνονται οι πρωτογενείς θέσεις των πεδίων που έπειτα θα αποτελέσουν την ανώτερη και κατώτερη πλάκα του μεταμορφικού συμπλέγματος. **B, C, D,** η εξέλιξη της λειτουργίας του μικρής κλίσης ρήγματος αποκόλλησης που προκαλεί την ανύψωση στην επιφάνεια των πετρωμάτων που έχουν υποστεί έντονη διάτμηση.

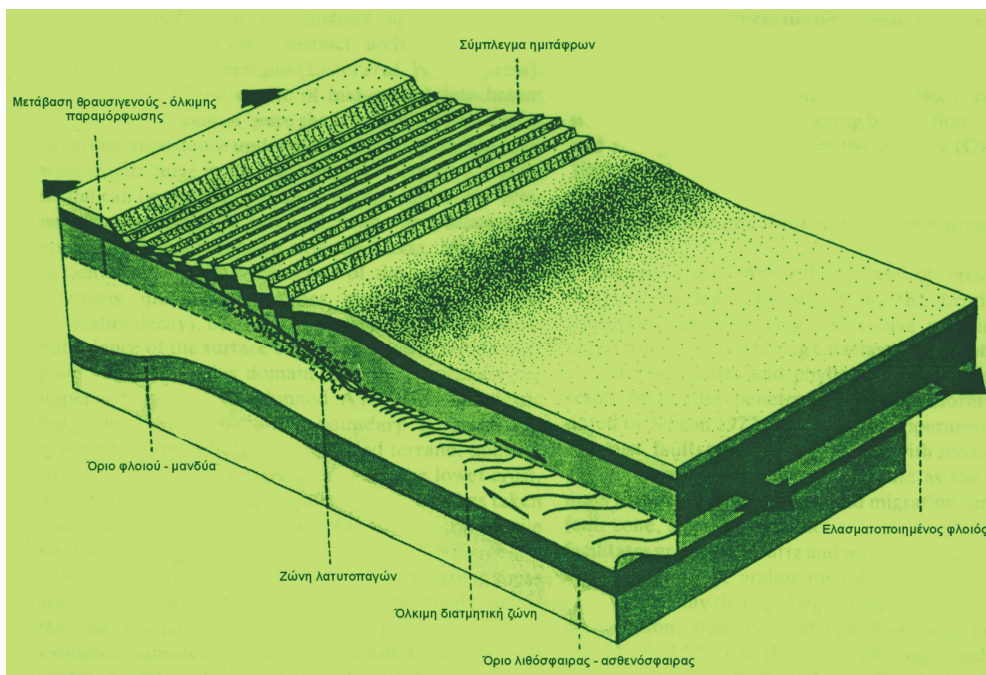


ότι οι μυλονίτες που σχηματίστηκαν στα βαθύτερα τμήματα αυτής της ζώνης, τραβήχτηκαν προς την επιφάνεια περνώντας μέσα από διαφορετικούς τεκτονικούς ορόφους της ίδιας ζώνης. Σε αυτήν την περίπτωση, οι μυλονίτες που σχηματίστηκαν στα βαθύτερα τμήματα της διατμητικής ζώνης πάντοτε θα υπόκεινται των ρηγμάτων αποκόλλησης που σχηματίστηκαν σε πιο επιφανειακά τμήματα της ζώνης, και ότι αυτά τα ρήγματα αποτελούν δομές που σχηματίστηκαν στο ξεκίνημα της μετακίνησης και θα παρέμειναν ενεργές καθ' όλη τη διάρκεια ζωής αυτής της ζώνης. Ωστόσο, πολλά από τα τμήματα των ρηγμάτων αποκόλλησης που παρατηρούμε σήμερα δεν μπορούν να ανήκουν στα ρήγματα αποκόλλησης που αποτελούσαν τις προς τα επάνω απολήξεις των εφελκυστικών διατμητικών ζωνών στις οποίες δημιουργήθηκαν οι μυλονίτες. Η παραμόρφωση της κατώτερης πλάκας έλαβε χώρα σε συνθήκες αμφιβολιτικές έως πρασινοσχιστολιθικές. Αυτοί οι τεκτονίτες κόπηκαν από ρήγματα αποκόλλησης μόνο αφού ο μεταμορφικός βαθμός είχε φτάσει σε χαμηλότερες της πρασινοσχιστολιθικής φάσης. Ακόμη, οι θραυστιγενείς μικροδομές έχουν επικαλύψει την όλκιμη παραμόρφωση. Αυτό δείχνει ότι οι μυλονίτες ήταν κινηματικά ανενεργοί πριν κοπούν από τα ρήγματα αποκόλλησης που βλέπουμε σήμερα και πολύ αυτά τα ρήγματα αποκόλλησης δεν υπήρχαν όταν λάβανε χώρα η όλκιμη παραμόρφωση που δημιούργησε τους μυλονίτες.

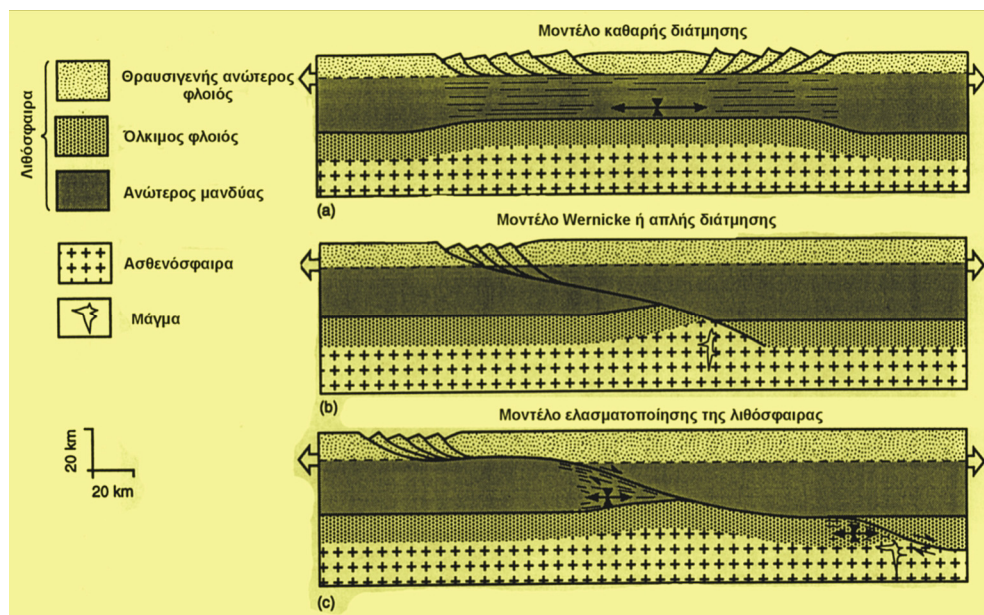
Τέλος, παλαιότερα ρήγματα αποκόλλησης κείνται πάνω από τους μυλονίτες και όταν αυτοί οι μυλονίτες κοβόντουσαν από τα σύγχρονα ρήγματα αποκόλλησης, τα παλαιά γινόντουσαν ανενεργά. Ήδη, λοιπόν, τέθηκε το θέμα των πολλών γενιών από ρήγματα αποκόλλησης που αποτελεί τη βάση του επόμενου μοντέλου δημιουργίας του πυρήνων μεταμορφικών συμπλεγμάτων, το οποίο αποτελεί εξέλιξη του μοντέλου αυτού.

Μοντέλο Ελασματοποίησης

Μία εναλλακτική γεωμετρία του μοντέλου της απλής διάτμησης αποτελεί το μοντέλο αποκόλλησης + καθαρής διάτμησης. Το μοντέλο αυτό υποστηρίζει την ύπαρξη εξελισσόμενων διατμητικών ζωνών μέσα στο φλοιό και σε τεκτονικούς ορόφους κάτω από την θραυστιγενή-όλκιμη μετάβαση. Αυτές μπορούν να πλαταίνουν με το βάθος και να εξαφανίζονται σε μία ζώνη από σύνθετες αναστομούμενες διατμητικές ζώνες, που χαρακτηρίζονται από καθαρή διάτμηση, στον ενδιάμεσο και κατώτερο φλοιό. Τέτοια μοντέλα μπορούν να ερμηνεύσουν σχετικά συμμετρικό εφελκυσμό, όπως φανερώνεται από τη διαφοροποίηση του πάχους του φλοιού στην εφελκυσμένη περιοχή. Η γενική γεωμετρία του μοντέλου αυτού περιλαμβάνει μία διατμητική ζώνη που αρχίζει από την γήινη επιφάνεια με μικρή κλίση, γίνεται οριζόντια στη μετάβαση θραυστιγενούς και



Εικόνα 10.14 Ένα εναλλακτικό μοντέλο ηπειρωτικού εφελκυσμού που υποστηρίζει τη θεωρία μίας διατμητικής ζώνης η οποία προκαλεί την αποκόλληση του ηπειρωτικού φλοιού κάτω από τη θραυστιγενή – όλκιμη μετάβαση. Η διατμητική ζώνη πλαταίνει με το βάθος και σταματάει εντός του φλοιού.



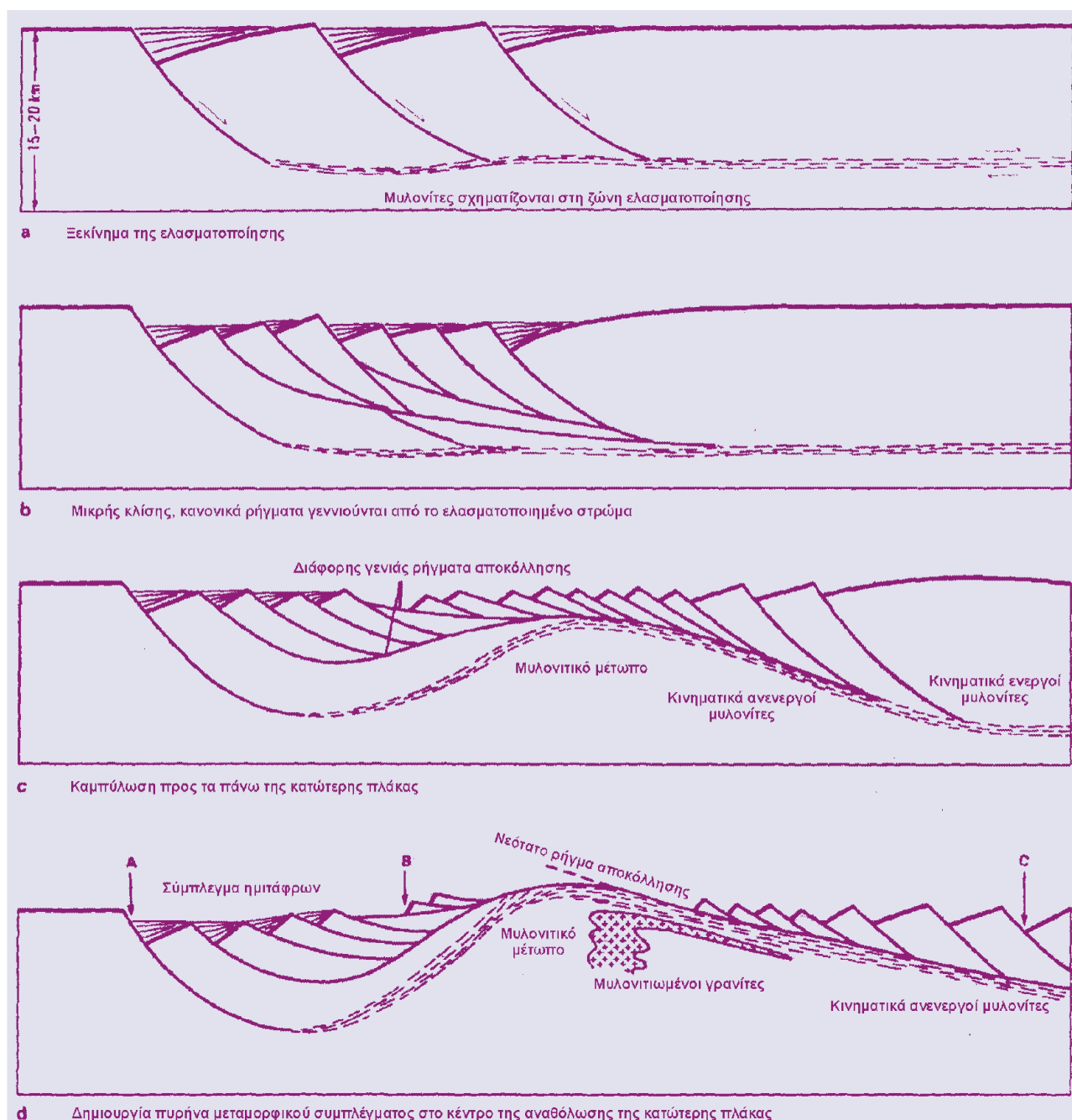
Εικόνα 10.15 Τα τρία μοντέλα εφελκυσμού όπου διακρίνεται και το μοντέλο ελασματοποίησης της λιθόσφαιρας.

όλκιμης παραμόρφωσης, αποκτά ξανά κάποια μικρή κλίση μέχρι το όριο φλοιού-μανδύα και ξαναγίνεται οριζόντια. Το μοντέλο αυτό λέγεται και μοντέλο ελασματοποίησης αφού προκαλεί μία ελασματοποίηση της λιθόσφαιρας.

Μοντέλο Πολλαπλών Αποκολλήσεων

Το μοντέλο πολλαπλών αποκολλήσεων αποτελεί εξέλιξη του μοντέλου απλής διάτμησης. Βασίζεται κυρίως στις παρατηρήσεις που περιγράφησαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπου φαίνεται η πιθανότητα λειτουργίας όχι μίας αλλά πολλών επιφανειών αποκόλλησης σε διαφορετικό χρονικό και χωρικό στάδιο εξέλιξης των συμπλεγμάτων μεταμορφικού

πυρήνα. Σύμφωνα με το μοντέλο, το παράδοξο της δημιουργίας των μικρής κλίσης κανονικών ρηγμάτων σε ένα εφελκυστικό καθεστώς, μπορεί να εξηγηθεί ως το αποτέλεσμα του σχηματισμού μίας σχεδόν οριζόντιας όλκιμης διατμητικής ζώνης στον ηπειρωτικό φλοιό, κάτω από την μετάβαση μεταξύ θραυστιγενούς και όλκιμης παραμόρφωσης (Εικ. 10.16a). Αυτή η διατμητική ζώνη βάσης δημιουργεί ένα καθεστώς τάσεων ευνοϊκό από μηχανική άποψη για τη γένεση και τη λειτουργία των μικρής κλίσης κανονικών ρηγμάτων. Η διατμητική ζώνη βάσης σχηματίζεται κατά τη διάρκεια του μοντέλου I ηπειρωτικού εφελκυσμού, όταν σειρές από μεγάλης κλίσης κανονικά ρήγματα που εκτείνονται σε

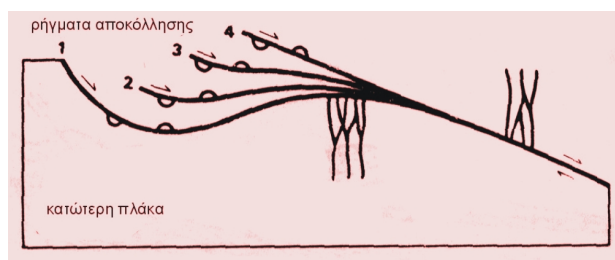


Εικόνα 10.16 Ο εφελκυσμός αρχίζει με μεγάλης κλίσης κανονικά ρήγματα που σε βάθος καταλήγουν σε μία οριζόντια ζώνη διάτμησης (α). Μικρής κλίσης ρήγματα αποκόλλησης δημιουργούνται ως αποτέλεσμα της λειτουργίας αυτής της ζώνης. Τα ρήγματα αυτά τέμνουν τα παλαιότερα μεγάλης κλίσης ρήγματα (β). Η λέπτυνση του ανώτερου φλοιού δημιουργεί ισοστατική ανύψωση του πρώιμου ρήματος αποκόλλησης (c) και το κάτω τέμαχος αυτού εμφανίζεται στην επιφάνεια ως σύμπλεγμα μεταμορφικού πυρήνα (d).

μεγάλο βάθος συνοδεύουν τον εφελκυσμό του ανώτερου φλοιού, ενώ καθαρή διάτμηση λαμβάνει χώρα στον κατώτερο φλοιό και ανώτερο μανδύα (Εικ. 10.16a).

Το μοντέλο II ηπειρωτικού εφελκυσμού λαμβάνει χώρα όταν θραυσσιγενή ρήγματα αποκόλλησης ενεργοποιούνται από την όλκιμη διατμητική ζώνη βάσης, έτσι ώστε το ένα μέρος του εφελκυσμένου πεδίου αποσπάται σιγά σιγά κάτω από το άλλο (Εικ. 10.16b). Καθώς η κατώτερη πλάκα τρα-

βιέται προς τα έξω, τότε καμπλώνεται προς τα πάνω, δημιουργώντας μία μεγάλη αναθόλωση. Η καμπύλωση αυτή μπορεί να οφείλεται σε ισοστατικές κινήσεις λόγω της υπερκείμενης τεκτονικής απογύμνωσης, αλλά κυρίως οφείλεται σε γρανιτικές διεισδύσεις (Εικ. 10.16c&d). Η αναθόλωση έχει ως αποτέλεσμα, το πάνω τμήμα του ρήματος αποκόλλησης να μην μπορεί πλέον να λειτουργήσει και να απαιτείται η δημιουργία ενός νέου κλάδου που θα έχει κοινή ρίζα με το προηγούμενο (Εικ. 10.16c



Εικόνα 10.17 Η αναθόλωση του υποβάθρου οδηγεί σε καμπύλωση του κύριου ρήγματος αποκόλλησης, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός νέου κλάδου. Η συνεχιζόμενη αναθόλωση, προκαλεί την καμπύλωση και του νέου κλάδου. Έτσι, δημιουργείται μία ακολουθία από ρήγματα αποκόλλησης, με το νεότερο να είναι και το λιγότερο καμπυλωμένο ρήγμα.

&10.17). Αυτό με τη σειρά του αναγκάζει τα πετρώματα της κατώτερης πλάκας να ακολουθήσουν νέα διαδρομή και να έρθουν σε επαφή με πετρώματα της ανώτερης πλάκας, που στο ξεκίνημα της διαδικασίας βρίσκονταν σε ανώτερους τεκτονικούς ορόφους. Έτσι οι μεταμορφικοί πυρήνες των συμπλεγμάτων εμφανίζονται να αποτελούν το κάτω τέμαχος των πιο νέων, σε σχέση με τα πρώιμα στάδια, ρηγμάτων αποκόλλησης και το μυλονιτικό μέτωπο να αντιπροσωπεύει μία αρχικά οριζόντια όλκιμη διατμητική ζώνη (Εικ. 10.16d).

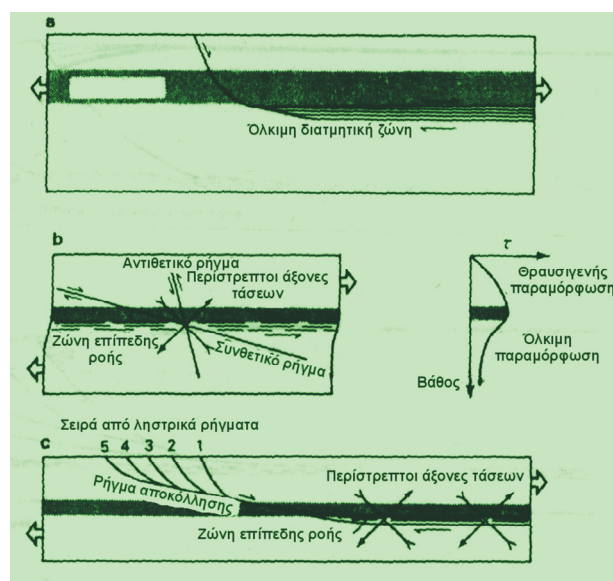


Εικόνα 10.18 Διακλαδώσεις του ρήγματος αποκόλλησης οδηγούν στη δημιουργία πολλαπλών αποκολλησεων που με τη σειρά τους σχηματίζουν διάφορες αποκομμένες "φλούδες" που ανήκουν είτε στην ανώτερη είτε στην κατώτερη πλάκα.

Ένα σημαντικό στοιχείο αυτού του μοντέλου είναι εκτός του ότι επιτρέπει την ανάπτυξη πολλαπλών ρηγμάτων αποκόλλησης, ότι επίσης επιτρέπει, λόγω ακριβώς αυτής της ανάπτυξης πολλών κλάδων, τη δημιουργία κάποιων απομονωμένων ή αποκομμένων «καλυμμάτων», τα οποία μπορεί να αποτελούνται από πετρώματα που ανήκουν είτε στην ανώτερη είτε στην κατώτερη πλάκα, ανάλογα με το αν ο νέος κλάδος του κύριου ρήγματος αποκόλλησης αναπτυσσόταν εντός της ανώτερης ή κατώτερης πλάκας αντίστοιχα (Εικ. 10.18).

Το μοντέλο αυτό προτείνει και μία λύση στο

πρόβλημα της λειτουργίας των μικρής κλίσης κανονικών ρηγμάτων, καθώς αυτά αποτελούν συνθετικές επιφάνειες αστοχίας εξαιτίας του εντατικού πεδίου που δημιουργείται από τη λειτουργία της διατμητικής ζώνης βάσης (Εικ. 10.19). Οι ίδιοι ερευνητές θεωρούν ότι αυτά λειτουργούν σεισμικά. Επίσης, το μοντέλο αυτό είναι σύμφωνο με πολλές από τις τεκτονικές παρατηρήσεις σε διάφορα γεωλογικά πεδία, χρησιμοποιεί κάποια επίδραση της ισοστασίας, λαμβάνει υπόψη του τον πλουτωνισμό που συνοδεύει πολλές φορές τον εφελκυσμό στους πυρήνες και συνδυάζει τα σεισμολογικά στοιχεία που κάνουν λόγο για μεγάλης κλίσης κανονικά ρήγματα, με τα στοιχεία υπαίθρου που δείχνουν τη λειτουργία των μικρής κλίσης ρηγμάτων.



Εικόνα 10.19 Ο εφελκυσμός του ανω-τέρου φλοιού δημιουργεί μία οριζόντια διατμητική ζώνη που επιτρέπει την αποκόλληση του ανώτερου από τον κατώτερο φλοιό (α). Η λειτουργία της διατμητικής ζώνης οδηγεί στην περιστροφή του εντατικού πεδίου (b). Τότε επιτρέπεται η γένεση μίας συνθετικής επιφάνειας αστοχίας με μικρή κλίση (c). Αυτό ενεργεί σαν ένα μεγάλο κύριο ρήγμα στο βάθος από το οποίο διακλαδίζονται λιστρικά κανονικά ρήγματα (1-5).

Παρόλα αυτά όμως ενστάσεις για το μοντέλο αυτό, υπάρχουν. Οι περισσότερες είναι ακριβώς αυτές που περιγράφηκαν και στο προηγούμενο μοντέλο της απλής διάτμησης, δηλαδή ότι η σύγχρονη θεωρία δεν επιτρέπει τη γέννηση και λειτουργία των μικρής κλίσης κανονικών ρηγμάτων στον ανώτερο φλοιό και αν πράγματι υπάρχουν και λειτουργούν αυτά θα πρέπει να βρίσκονται σε διαφορετικό χώρο από αυτό όπου απαντούν ενεργά μεγάλης κλίσης κανονικά ρήγματα. Επίσης τα γεωχρονολογικά δεδομένα κάνουν λόγο για γρήγορη ανύψωση των πετρωμάτων της κατώτερης πλάκας, μία ανύ-

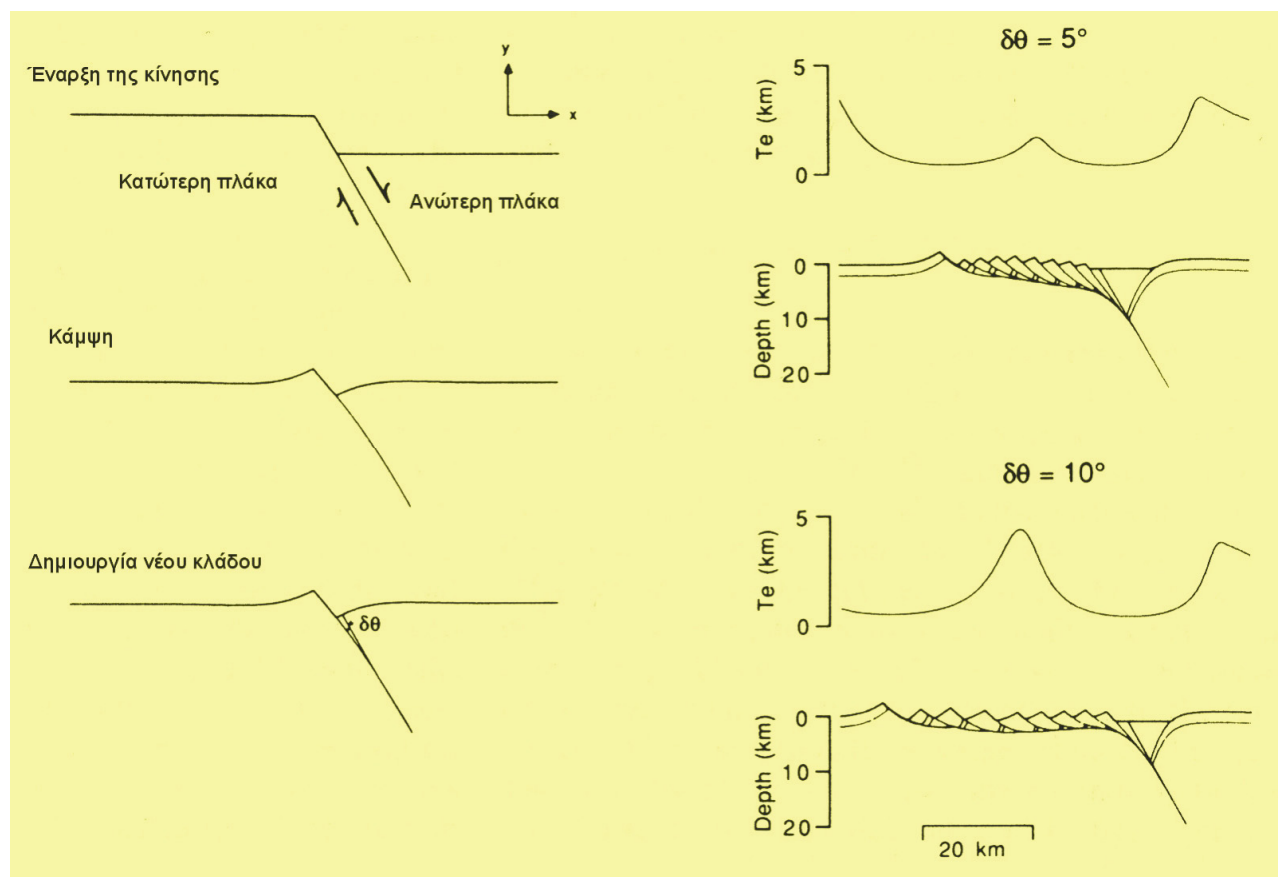
ψωση που απαιτεί ρυθμούς πολύ μεγαλύτερους από αυτούς που παρατηρούνται σήμερα στην επαρχία Basin & Range. Σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές, τέτοιος ρυθμός δεν μπορεί να μοιραστεί σε πολλά ρήγματα αποκόλλησης, αλλά θα πρέπει όλη η κίνηση να συγκεντρωθεί αποκλειστικά σε ένα ρήγμα.

Ισοστατικό Μοντέλο

Σε όλα τα προηγούμενα μοντέλα, σημαντικό ρόλο στην δημιουργία των πυρήνων, διαδραματίζει και η ισοστασία. Η σημασία της ισοστατικής επίδρασης στην εξέλιξη των ρηγμάτων αποκόλλησης μοντελοποιήθηκε και προτείνει ότι τα σημερινά μικρής κλίσης κανονικά ρήγματα αποκόλλησης προέρχονται από την περιστροφή των ανωτέρων τμημάτων των μεγάλης κλίσης κανονικών ρηγμάτων, λόγω της επίδρασης της ισοστασίας (Εικ. 10.20). Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε τρεις βασικές παραδοχές: 1) η ισοστατική αντίδραση στην κανονική διάρρηξη είναι ένα γενικής έκτασης φαινόμενο, 2) όταν ένα τμήμα του ρήματος περιστραφεί σημαντικά

από την αρχική του κλίση σε σχέση με το εντατικό πεδίο του φλοιού, τότε αντικαθίσταται από ένα νέο ρήγμα που έχει την ίδια αρχική κλίση με το προηγούμενο και 3) το ρήγμα κόβει όλο τον ανώτερο φλοιό και η κίνηση του ρήματος λαμβάνει χώρα πάντα στην ίδια περιοχή, στη βάση του ανωτέρου φλοιού, δηλαδή έχει πάντα την ίδια ρίζα. Με βάση τα σεισμολογικά δεδομένα τα ρήγματα αυτά έχουν μία αρχική κλίση 60° . Τα πιο πολλά ισοστατικά μοντέλα έχουν υπολογίσει την ισοστατική αντίδραση σε ένα κανονικό ρήγμα, θεωρώντας ότι το άλμα είναι μόνο μερικά χιλιόμετρα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, παρατηρείται ανύψωση του κάτω τεμάχους και μία περιστροφή του πάνω τμήματος του επιπέδου του ρήματος, που είναι της τάξης των 10° – 15° .

Άλλα μοντέλα θεωρούν πολύ μεγαλύτερο άλμα, αρκετών δεκάδων χιλιομέτρων και υπολογίζουν τις ισοστατικές συνέπειες. Έτσι, με την χρήση μαθηματικών εξισώσεων, αποδεικνύεται ότι σε πολύ έντονο εφελκισμό είναι πιθανό ένα ρήγμα που παρουσίαζε μία αρχική κλίση της τάξης των 60° , να περιστραφεί σε μία επίπεδη – οριζόντια δομή, η



Εικόνα 10.20 Το ισοστατικό μοντέλο για τη δημιουργία των μεταμορφικών πυρήνων. Η αριστερή στήλη παρουσιάζει το βασικό ισοστατικό μοντέλο που περιλαμβάνει τη δημιουργία μίας νέας ρηξιγενούς επιφάνειας μετά από μία περιστροφή $\delta\theta$ του ανωτέρου τμήματος του αρχικού ρήματος. Η δεξιά στήλη δείχνει δύο μοντέλα, με βάση τις τιμές του T_e (ενεργό ελαστικό πάχος) και ιζηματογενούς φόρτισης όπου το αρχικό ρήγμα έχει περιστραφεί στο ανώτερο τμήμα σε οριζόντιο.

οποία παρουσιάζει ακόμη μία ενεργή ρίζα με την αρχική κλίση των 60° (Εικ. 10.20). Η περιστροφή του επιπέδου του ρήγματος κατά 60° , είναι ένα παράδειγμα εξτρεμιστικής ανύψωσης του κάτω τεμάχους. Ως συνέπεια αυτής της ανύψωσης και της περιστροφής, το μοντέλο αυτό μπορεί να μεταφέρει πετρώματα του ενδιάμεσου φλοιού κοντά στην επιφάνεια, όπου σχηματίζουν ένα σύμπλεγμα μεταμορφικού πυρήνα (Εικ. 10.20).

Επίσης το μοντέλο της ισοστασίας έχει ως αποτέλεσμα ένα σχεδόν επίπεδο – οριζόντιο ρήγμα πάνω από το οποίο απαντούν μικρές φέτες πετρωμάτων της ανώτερης πλάκας, επιτρέπει την παρουσία μίας μεγάλης αντίθεσης στο βαθμό μεταμόρφωσης κάθετα στην επιφάνεια του ρήγματος και την γρήγορη κίνηση των πετρωμάτων της κατώτερης πλάκας από τα βάθη του ενδιάμεσου φλοιού σε ρηχότερους τεκτονικούς ορόφους. Όλα αυτά αποτελούν χαρακτηριστικά γνωρίσματα των συμπλεγμάτων μεταμορφικού πυρήνα. Επίσης δέχεται ότι δεν μπορούν να λειτουργήσουν μικρής κλίσης κανονικά ρήγματα. Αυτό όμως έρχεται σε πλήρη αντίθεση με έρευνες που έχουν γίνει σε διάφορους πυρήνες της αμερικάνικης Κορδιλιέρας, όπου τεκτονικά, στρωματογραφικά και γεωχρονολογικά στοιχεία, αποδεικνύουν ότι πολλά ρήγματα αποκόλλησης δημιουργήθηκαν και λειτούργησαν έχοντας πολύ μικρές κλίσεις και μάλιστα σε πολύ επιφανειακούς τεκτονικούς ορόφους, δηλαδή σε βάθη μόλις μερικών εκατοντάδων μέτρων. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το ρήγμα Rawhide στη δυτική Αριζόνα, το οποίο δημιουργήθηκε κατά τα τελευταία στάδια του ηπειρωτικού εφελκυσμού αλλά και σε πολύ ρηχά επίπεδα της τάξης των 100 περίπου μέτρων, έχοντας μία κλίση μικρότερη των 20° .

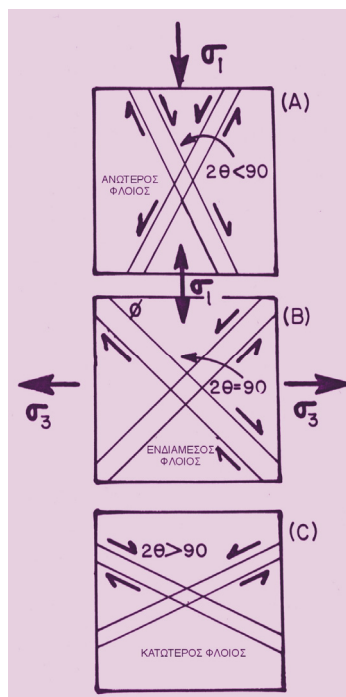
Μία άλλη ένσταση, που θα μπορούσε να αφορά και όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιούν την ισοστασία, είναι ότι σεισμικές τομές ανάκλασης στο βόρειο τμήμα της επαρχίας Basin & Range στις δυτικές Η.Π.Α., φανερώνουν, αντίθετα από τα αναμενόμενα, μία επίπεδη Moho, τόσο κάτω από τις τάφρους, όσο και κάτω από τα τεκτονικά κέρατα. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι η ισοστατική αντίδραση στη λειτουργία των ρηγμάτων, έλαβε χώρα ισοδύναμα σε κάθε ρήγμα που παρουσίαζε το ίδιο άλμα, κάτι που φανερώνει ότι η παρατηρούμενη διαφοροποίηση στην γωνία κλίσης των ρηγμάτων, είναι συνέπεια της ετερογένειας στη σύνθεση, στη ρεολογία και στην κατανομή της τάσης μέσα στο φλοιό.

Επίσης το μοντέλο της ισοστασίας παρουσιάζει τους πυρήνες να εμφανίζονται κάτω από παχιές ιζηματογενείς σειρές που έχουν αποθεθεί στις ασύμμετρες λεκάνες που δημιουργήθηκαν από την περιστροφή των ρηξιτεμαχών της ανώτερης πλάκας. Αυτό όμως έρχεται σε αντίθεση με παρατηρή-

σεις υπαίθρου που δείχνουν ότι τα πετρώματα των πυρήνων είναι κυρτωμένα σε μεγάλα αντικλινόρια μεγάλων οροσειρών, δηλαδή αποτελούν συνήθως τεκτονικά κέρατα και δεν βρίσκονται θαμμένα κάτω από μεγάλου πάχους ιζηματογενείς λεκάνες.

Μοντέλο Αναστομοωμένων Διατμητικών Ζωνών

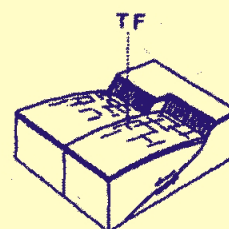
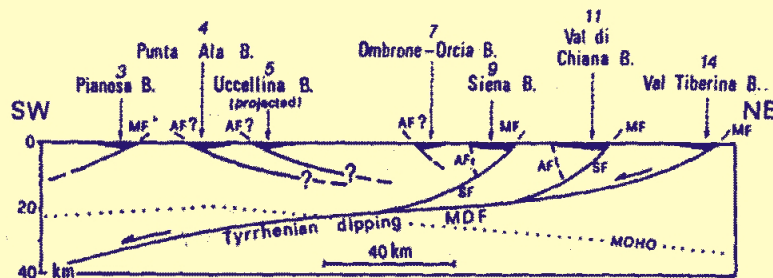
Το μοντέλο των αναστομοωμένων διατμητικών ζωνών προτείνει ότι η παραμόρφωση στον ενδιάμεσο και κατώτερο φλοιό λαμβάνει χώρα με καθαρή διάτμηση μέσα από σύνθετες αναστομούμενες διατμητικές ζώνες. Ειδικότερα ο εφελκυσμός λαμβάνει χώρα κατά μήκος πολλών διατμητικών ζωνών, που δημιουργούν ένα πλέγμα από αναστομούμενες διατμητικές ζώνες. Τέτοιες γεωμετρίες έχουν παρατηρηθεί σε μικροσκοπική, μεσοσκοπική και μακροσκοπική κλίμακα στις ενότητες που αποτελούν το υπόβαθρο των κεντρικών Άλπεων και προτάθηκε ότι σε οροσειρές που έχουν δημιουργηθεί από εφελκυσμό παρόμοιες αναστομούμενες διατμητικές ζώνες απαντούν σε τεκτονικούς ορόφους κάτω από το ρήγμα αποκόλλησης.



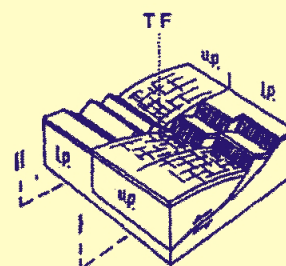
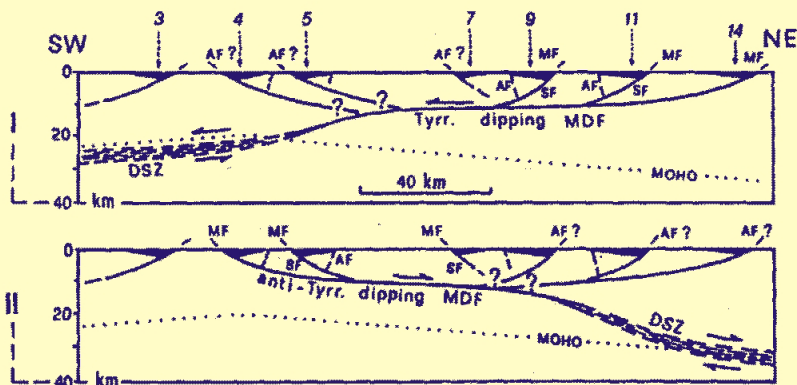
Εικόνα 10.21 Ανάπτυξη συζυγών διατμητικών ζωνών. Η γωνία 2θ μπορεί να πάρει διάφορες τιμές, σε σχέση με την μέγιστη κύρια συμπίεστική τάση (σ_1), όπως σχολιάζεται στο κείμενο.

Η διαφοροποίηση στην κλίση των διατμητικών ζωνών και κατά συνέπεια και στη διέδρη γωνία που σχηματίζουν οι συζυγείς διατμητικές ζώνες με το βάθος, έχει παρατηρηθεί ότι είναι πολύ συστηματική και έτσι προτάθηκε ότι αυτές οι κλίσεις είναι οι πρωταρχικές και δεν οφείλονται σε περιστροφή. Σε πεδία εφελκυσμού, όπου ο κύριος άξονας συμπίεσης σ_1 είναι κατακόρυφος, σημαίνει ότι σε επιφανειακούς τεκτονικούς ορόφους, η διέδρη γωνία 2θ

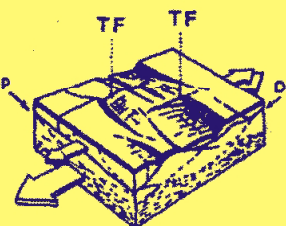
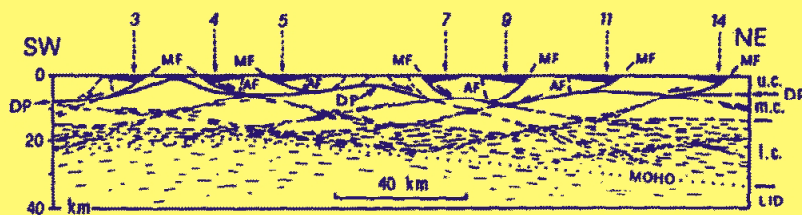
α. ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΛΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ



β. ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΛΑΣΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ



γ. ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΣΤΟΜΩΜΕΝΩΝ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ



- AF = αντιθετικό ρήγμα
- DP = επιφάνεια αποκόλλησης
- MF = κύριο ρήγμα
- SF = συνθετικό ρήγμα
- TF = ρήγμα μεταφοράς
- MDF = κύριο ρήγμα αποκόλλησης
- DSZ = όγκιμη διατμητική ζώνη

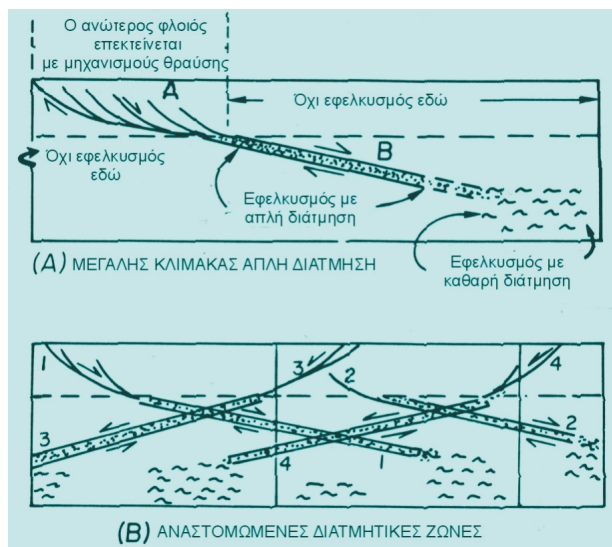
- u.p. = ανώτερη πλάκα
- l.p. = κατώτερη πλάκα
- u.c. = ανώτερος φλοιός
- m.c. = ενδιάμεσος φλοιός
- l.c. = κατώτερος φλοιός

Εικόνα 10.22 Η σύγκριση τριών μοντέλων για την εξέλιξη του βόρειου Τυρρηνικού Πελάγους και των Βόρειων Απεννίνων. α. Μοντέλο απλής διάτμησης. β. Μοντέλο ελασματοποίησης της λιθόσφαιρας με δύο πιθανές λύσεις. γ. Μοντέλο αναστομωμένων διατμητικών ζωνών.

$< 90^\circ$ και οι διατμητικές ζώνες κλίνουν με γωνία $\phi > 45^\circ$. Σε ενδιάμεσους τεκτονικούς ορόφους, η γωνία $2\theta = 90^\circ$ και οι ζώνες έχουν κλίση $\phi = 45^\circ$, ενώ σε μεγάλους βάθους τεκτονικούς ορόφους, η $2\theta > 90^\circ$ και οι διατμητικές ζώνες έχουν κλίση $\phi < 45^\circ$ (Εικ. 10.21).

Άλλοι ερευνητές προτείνουν ότι τα μεταμορφωμένα και άλλα όγκιμα παραμορφωμένα πετρώματα, διαδραματίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην εφελκυστική διαδικασία και ότι το είδος του εφελκυσμού, είναι συνάρτηση του βάθους. Έτσι, τόσο τα μεγάλης κλίσης, όσο και τα μικρής κλίσης κανο-

νικά ρήγματα, μαζί με τα αντιθετικά τους, δρουν μόνο στον ανώτερο θραυστιγενή φλοιό και τερματίζουν σε μία γενικά εκτεταμένη κυματοειδή επιφάνεια αποκόλλησης που απαντά στην μετάβαση μεταξύ θραυστιγενούς-όλκιμης παραμόρφωσης (Εικ. 10.22γ). Ο εφελκυσμός στον ενδιάμεσο φλοιό εκτονώνεται με όλκιμο τρόπο κατά μήκος των αναστομωμένων διατμητικών ζωνών που χαρακτηρίζονται από υψηλή παραμόρφωση και περιβάλλουν



Εικόνα 10.23 Η παραμόρφωση στο μοντέλο απλής διάτμησης συγκεντρώνεται σε μία ζώνη διάτμησης (Α) ενώ στο μοντέλο αναστομωμένων διατμητικών ζωνών κατανέμεται σε ένα πολύπλοκο δίκτυο από μικρότερης κλίμακας διατμητικές ζώνες (Β).

τεράστια φακοειδή τεμάχια ή μπλοκ, χαμηλής καταπόνησης, τα οποία μετακινούνται το ένα σε σχέση με το άλλο, μέσω αυτών των αναστομωμένων ζωνών (Εικ. 10.22γ & 10.23). Στον κατώτερο φλοιό ο εφελκυσμός προέρχεται μόνο από καθαρή διάτμηση. Στο μοντέλο αυτό τα ρηξιτεμάχια του ανώτερου φλοιού γέρνουν και ολισθαίνουν και στις δύο διευθύνσεις, κάθετα στον επιμήκη άξονα του εφελκυσμένου πεδίου, πάνω σε ρήγματα που μπορούν να παρουσιάζουν αντίθετες κλίσεις. Αυτά τα κύρια ρήγματα, συγκλίνουν σε μία ευρεία επιφάνεια αποκόλλησης, κυματοειδούς μορφής. Αυτή η μορφή της, έχει ως αποτέλεσμα η κλίση της να διαφέρει από θέση σε θέση, και οφείλεται στη φορά της κίνησης των μεγάλων κύριων ρηγμάτων του ανώτερου φλοιού (Εικ. 10.22γ). Ο ενδιάμεσος φλοιός υπόκειται σε έναν πολύ υψηλότερο ρυθμό εφελκυσμού κατά μήκος αναστομωμένων διατμητικών ζωνών που με τη σειρά τους δίνουν γένεση σε φακοειδούς μορφής τεμάχια ή μπλοκ (Εικ. 10.22γ & 10.23).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι τα κύρια ρήγματα του ανώτερου

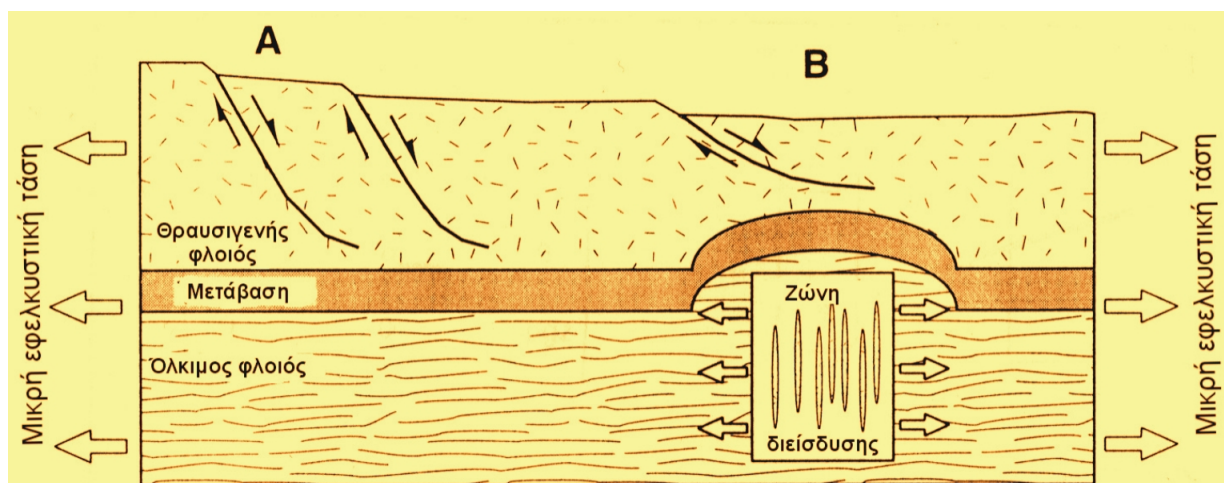
φλοιού δεν είναι απαραίτητο να παρουσιάζουν μια σταθερή γεωμετρία, όπως πρότειναν τα προηγούμενα μοντέλα. Ο λόγος είναι ότι ο εφελκυσμός στον υποκείμενο ενδιάμεσο φλοιό δίνει γένεση σε επιμήκη, φακοειδούς μορφής μπλοκ που μηχανικά αποσυνδέονται από αυτά του υπερκείμενου ανώτερου φλοιού. Μέσα από αυτή τη θεώρηση, τα μεγάλα κύρια ρήγματα χάνουν τη σημασία του γενικού και αποκτούν μία σημασία τοπικού χαρακτήρα, καθώς πλέον αυτά σχετίζονται με τη δημιουργία μίας, ή μόνο μερικών, λεκανών και όχι με το σύνολο των δομών που αναπτύσσονται στην περιοχή που βρίσκεται σε εφελκυσμό.

Ένα άλλο πλεονέκτημα του μοντέλου των αναστομωμένων διατμητικών ζωνών, είναι ότι τα ρήγματα "μεταφοράς", που επηρεάζουν μόνο τον ανώτερο, θραυστιγενούς χαρακτήρα, φλοιό, δεν χρειάζεται να είναι τόσο επίπεδα και παράλληλα, όπως προτείνει το μοντέλο ελασματοποίησης της λιθόσφαιρας και έτσι μπορούν και ερμηνεύουν καλύτερα κάποιες περιέργες σε μορφή και κατανομή τεκτονικές γραμμές, που παρατηρούνται στις ανώτερες πλάκες διαφόρων πυρήνων (Εικ. 10.22β&γ). Η γεωμετρία αυτών των γραμμών εξαρτάται από την γεωμετρία των φακοειδών μπλοκ του ενδιάμεσου φλοιού. Τέλος αυτό το γεγονός δεν αποκλείει την πιθανότητα ότι αυτά τα ρήγματα μεταφοράς, να αντιστοιχούν σε παλιές γραμμές αδυναμίας του φλοιού.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, το τελευταίο αυτό μοντέλο παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς δεν είναι απαραίτητη μία συγκεκριμένη γεωμετρία, γεγονός που το καθιστά πολύ ευέλικτο. Παρόλο που εφαρμόστηκε και στην αμερικανική Κορδιλιέρα, δεν βρήκε ευρεία αποδοχή, αντίθετα με τη γειτονική Ιταλία όπου εφαρμόστηκε με πλήρη επιτυχία στα Βόρεια Απέννινα και στις ιταλικές Άλπεις, καθώς φαίνεται ότι αυτές οι αντίθετες ολισθήσεις, επιβεβαιώνονται από βαθιές σεισμικές ανακλάσεις.

10.6 Πλουτωνισμός - Προέλευση των Συμπλεγμάτων Μεταμορφικού Πυρήνα

Ένα από τα κύρια γνωρίσματα των πυρήνων είναι ότι κατά την προοδευτική ανύψωση της κατώτερης πλάκας, παρατηρείται και μία σημαντική εκρηξιγενής δραστηριότητα, είτε με την μορφή του πλουτωνισμού είτε με την ηφαιστειακή. Η επίδραση της εκρηξιγενούς αυτής δραστηριότητας χρησιμοποιήθηκε κυρίως στο μοντέλο των πολλαπλών αποκολλησεων, όπου εκτιμάται ότι η αναθόλωση της κατώτερης πλάκας οφείλεται κατά κύριο λόγο στη



Εικόνα 10.24 Κατακόρυφη τομή όπου φαίνεται η παραμόρφωση λόγω εφελκυστικών τάσεων. Η εφελκυστική καταπόνηση συνδυάζεται με κανονικά ρήγματα στον ανώτερο εύθραυστο φλοιό και με όλκιμη ροή στον κατώτερο φλοιό (Α). Οι διεισδύσεις στον κατώτερο και ενδιάμεσο φλοιό καταλαμβάνουν πολύ όγκο και δημιουργούν εφελκυστικές τάσεις, ενώ θερμαίνουν τα γειτονικά πετρώματα. Μικρής κλίσης κανονικά ρήγματα δημιουργούνται πάνω από τη διείσδυση, ενώ ανυψώνεται η μετάβαση μεταξύ θραυστιγενούς και όλκιμου φλοιού.

διείσδυση πλουτώνιων σωμάτων και λιγότερο στην ισοστατική αντίδραση λόγω της υπερκείμενης τεκτονικής απογύμνωσης.

Επίσης, πολλές φορές έχει αναφερθεί ότι η γένεση και λειτουργία των μικρής κλίσης κανονικών ρηγμάτων στον ανώτερο θραυστιγενή φλοιό, αντιτίθεται στη μέχρι σήμερα αποδεκτή θεωρία για τη γένεση και λειτουργία των κανονικών ρηγμάτων. Έτσι, για να ερμηνευθούν αυτά τα ρήγματα, είτε πρέπει να δεχτούμε ότι αυτά προέρχονται από περιστροφή κάποιων μεγάλης κλίσης, κανονικών ρηγμάτων, είτε από περιστροφή του ίδιου του εντατικού πεδίου. Ορισμένοι ερευνητές πρότειναν λοιπόν ότι το εντατικό πεδίο αλλά και η ρεολογία του ανώτερου φλοιού, μπορούν να επηρεαστούν από το μαγματισμό, ο οποίος κάτω από ιδιαίτερες περιπτώσεις μπορεί να δημιουργήσει ευνοϊκές συνθήκες για τη γένεση και λειτουργία των μικρής κλίσης κανονικών ρηγμάτων (Εικ. 10.24). Η ανύψωση της θερμοκρασίας από το διεισδύον μάγμα, μπορεί να προκαλέσει την προσωρινή άνοδο του επιπέδου μετάβασης μεταξύ θραυστιγενούς και όλκιμης παραμόρφωσης, ενώ η προκαλούμενη διάτμηση από τη διείσδυση του μάγματος μπορεί να είναι η αιτία για την περιστροφή του εντατικού πεδίου και τη γένεση των μικρής κλίσης κανονικών ρηγμάτων (Εικ. 10.24 & 10.25). Επίσης, οι διεισδύσεις μπορεί να είναι η αιτία για τη διαφορική ανύψωση της κατώτερης πλάκας των συμπλεγμάτων, ενώ η γρήγορη ψύξη της κατώτερης πλάκας, που παρουσιάζουν οι μετρήσεις με τη μέθοδο $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, μπορεί να έχει λάβει χώρα μετά από την άφιξη του μάγματος και έτσι δεν χρειάζεται να είναι αποτέλεσμα ταχείας διάβρωσης ή τεκτονικής απογύμνωσης.

Το μοντέλο αυτό παρότι έχει κάποια βάση δεν φαίνεται να ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις για τη δημιουργία των πυρήνων. Το πιο σημαντικό πρόβλημα είναι ότι οι διεισδύσεις έχουν περισσότερο τοπικό και όχι γενικό χαρακτήρα, ώστε να επηρεάσουν όλη τη σημερινή επιφανειακή έκταση των πυρήνων, ενώ οι σεισμικές ανακλάσεις δείχνουν ότι ο μεγαλύτερος όγκος αυτών βρίσκεται αρκετά βαθιά, κάτω από το ρήγμα αποκόλλησης, και δεν μπορεί να επηρεάσει το εντατικό πεδίο. Η όλη προσπάθεια μοιάζει περισσότερο σαν μία προσπάθεια καλής θέλησης, παρά σαν μία τεκμηριωμένη και ολοκληρωμένη πρόταση και έχει πολλά προβλήματα ακόμα να λύσει.

10.7 Μηχανική Δυνατότητα Επίτευξης Μικρής Κλίσης Ρηγμάτων – Το Μοντέλο Westaway

Όπως έχει αναφερθεί, το πιο σημαντικό πρόβλημα των συμπλεγμάτων μεταμορφικού πυρήνα, είναι ότι η θεωρία που έχει αναπτυχθεί το δεύτερο μισό του αιώνα απορρίπτει τη γένεση και τη λειτουργία ρηγμάτων μικρής κλίσης με κανονική φορά της ολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, δεν μπορεί να λάβει χώρα δημιουργία κανονικών ρηγμάτων με κλίσεις μικρότερες των 45° . Καθώς ο εφελκυσμός συνεχίζεται, τα κανονικά ρήγματα περιστρέφονται προοδευτικά, αποκτώντας μικρότερες κλίσεις. Ωστόσο η ίδια θεωρία αναφέρει ότι όταν το ρήγμα αποκτήσει



Εικόνα 10.25 Το αρχικό στάδιο (Α) εμπεριέχει μικρής κλίσης διατμητικές ζώνες κάτω από μεγάλης κλίσης κανονικά ρήγματα. Η διεύθυνση των πλουτωνιτών οδηγεί σε διαφορετικό εφελκυσμό της ανώτερης πλάκας. Η συγκέντρωση του πλουτωνισμού (Β) οδηγεί σε συγκεντρωμένη ανύψωση, ενώ διασκορπισμένος πλουτωνισμός οδηγεί σε μη κατανεμμένη ανύψωση (Γ).

την κλίση των 30° , το εντατικό πεδίο δεν μπορεί να συνεχίσει την ολίσθηση πάνω σε αυτό το ρήγμα, καθώς είναι πιο εύκολο να δημιουργήσει μία καινούργια ρηξιγενή επιφάνεια.

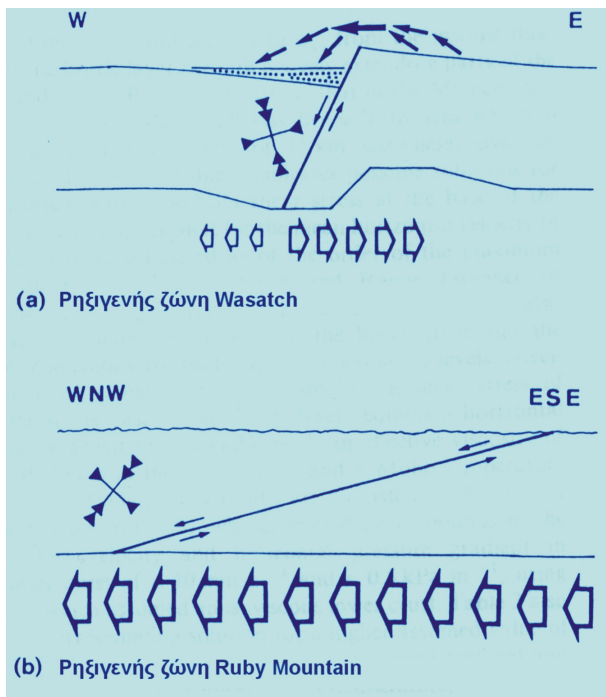
Μετά την απόδειξη της ύπαρξης, αλλά και της δραστηριοποίησης, των ρηγμάτων μικρής κλίσης σε εφελκυστικές συνθήκες, πολλοί προσπάθησαν να ερευνήσουν τις συνθήκες όπου μπορεί να λάβει χώρα κανονική διάρρηξη σε επιφάνειες μικρής κλίσης. Οι έρευνες ακολούθησαν βασικά δύο δρόμους. Στον ένα προσπαθούσαν να βρουν τις συνθήκες εκείνες που θα επέτρεπαν τη γένεση τέτοιων ρηγμάτων σε σταθερό εντατικό πεδίο, που ήταν αυτό της γήινης επιφάνειας με το μεγαλύτερο συμπίεστικό άξονα σ_1 κατακόρυφο. Σε αυτόν εξέταζαν τις ιδιότητες των υλικών του φλοιού και την παρουσία ρευστών των πόρων, όπου με βάση μαθηματικές εξισώσεις και κάποιες παραδοχές, κατέληγαν στο συμπέρασμα ότι ακόμη και κάτω από εξτρεμιστικές συνθήκες, όπως μηδενική διατμητική αντοχή κατά μήκος του επιπέδου ολίσθησης και σημαντική παρουσία της ρευστής φάσης, δεν μπορούσε να λάβει χώρα ολίσθηση πάνω σε επιφάνειες με κλίση μικρότερη των 25° .

Ιδιαίτερα για την περίπτωση της παρουσίας μίας ρευστής φάσης, υποστηρίχθηκε ότι μία υψηλή πίεση ρευστών των πόρων θα μπορούσε να επιτρέψει τη γένεση μικρής κλίσης κανονικών ρηγμάτων. Ωστόσο, σημειώνεται ότι οι διαφοροποιήσεις στην πίεση των ρευστών των πόρων, δεν θα επιδρούσαν στο μέγεθος της διατμητικής τάσης ή στον προσανατολισμό του εντατικού πεδίου, οπότε κάποιος άλλος παράγοντας είναι απαραίτητος ώστε να δημιουργηθεί διατμητική αστοχία σε επιφάνειες μικρής κλίσης. Έχει προταθεί ότι ένας τέτοιος παράγοντας θα μπορούσε να είναι η ανισοτροπία στις

μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων. Ακόμη η πίεση των ρευστών, μπορεί να διαφέρει από μέρος σε μέρος μέσα στην ίδια ρηξιγενή ζώνη.

Ο άλλος δρόμος που ακολούθησαν οι έρευνες ήταν η προσπάθεια εξέτασης της πιθανότητας οι κύριοι άξονες του εντατικού πεδίου να είναι κεκλιμένοι. Σε μία τέτοια περίπτωση, θα ήταν δυνατό να δημιουργηθούν ρήγματα είτε με σχεδόν κατακόρυφες επιφάνειες είτε με πολύ μικρές κλίσεις. Μία τέτοια υπόθεση θεωρεί ότι η υψηλή τοπογραφία και η έξαρση της Moho κάτω από πεδία εφελκυστικών τάσεων, μπορεί να είναι η αιτία δημιουργίας τέτοιων εντατικών πεδίων. Ωστόσο, τα εντατικά πεδία τέτοιων μοντέλων, είναι πιο πολύ συμπίεστικά παρά εφελκυστικά, ενώ μεγάλης κλίσης κανονικά ρήγματα υπάρχουν σε περιοχές με υψηλό τοπογραφικό ανάγλυφο.

Πολύ περισσότερος λόγος έχει γίνει για την πιθανότητα η αιτία που θα περιέστρεφε το εντατικό πεδίο να είναι μία διατμητική έλξη στη βάση του ανώτερου φλοιού, δηλαδή στη βάση του θραυσιγενούς τμήματος του φλοιού. Το μοντέλο του σχολιάστηκε και επανεξετάστηκε, και χρησιμοποιώντας πιο ρεαλιστικά κριτήρια αστοχίας, οι ερευνητές έφτασαν στο συμπέρασμα ότι τα μοντέλα που προτείνουν διατμητική έλξη στη βάση του ανώτερου φλοιού, για τη γένεση μικρής κλίσης κανονικών ρηγμάτων, δεν είναι εφαρμόσιμα. Το ίδιο μοντέλο σχολιάστηκε και πάλι και σημειώνεται ότι δύο στοιχεία του μοντέλου το καθιστούν μη εφαρμόσιμο. Πρώτον ότι η μικρότερη από 45° κλίση του κύριου συμπίεστικού άξονα σ_1 δείχνει ότι το εντατικό πεδίο είναι συμπίεστικό και όχι εφελκυστικό και δεύτερον ότι η διατμητική έλξη κατευθύνεται προς το κάτω τέμαχος. Το προηγούμενο μοντέλο είχε προτείνει ότι σε ένα εφελκυστικό πεδίο η

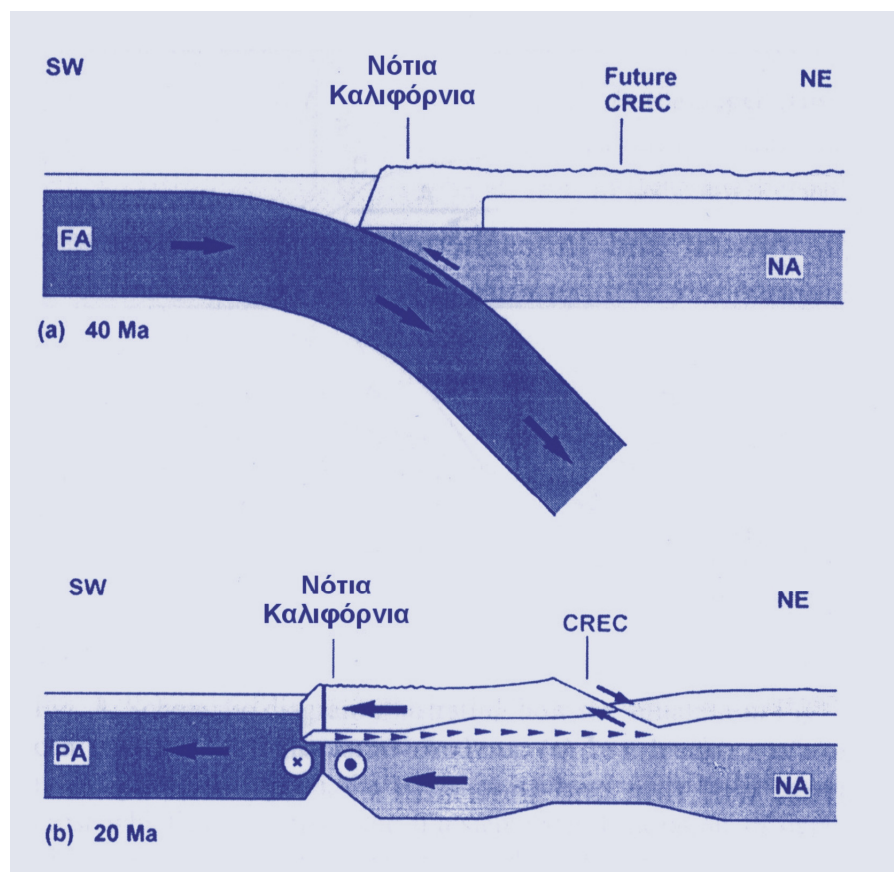


Εικόνα 10.26 Η επίδραση της διατμητικής έλξης στην δημιουργία διαφόρων κλίσεων κανονικών ρηγμάτων στον ανώτερο φλοιό. Το ρήγμα Wasatch δραστηριοποιήθηκε στο Μειόκαινο σαν αντιθετική επιφάνεια αστοχίας (α) ενώ η ρηξιγενής ζώνη των Ruby Mountains σαν συνθετική (β).

παρουσία μίας οριζόντιας διατμητικής έλξης, απαιτεί αυτή η έλξη να κατευθύνεται από το κάτω προς το πάνω τέμαχος, επειδή στην αντίθετη περίπτωση θα εξανάγκαζε τα μικρής κλίσης κανονικά ρήγματα να περιστραφούν και να αποκτήσουν μεγαλύτερες κλίσεις.

Στην ανάλυση που παρουσιάστηκε από τον Westaway αναφέρεται ότι η διατμητική έλξη που δημιουργείται από τη ροή του κατώτερου φλοιού μπορεί να προκαλέσει την περιστροφή των κύριων αξόνων του εντατικού πεδίου (Εικ. 10.26). Η βύθιση αυτών των αξόνων εξαρτάται από την τιμή της αδιάστατης παραμέτρου h , που είναι δύο φορές ο λόγος της διατμητικής τάσης προς την διαφορά μεταξύ της κατακόρυφης και οριζόντιας τάσης, την οποία ονόμασε “αριθμός Herschel”. Όταν το h είναι μηδέν, τότε εφαρμόζεται η κοινότητα θεωρία όπου οι αρχικές κλίσεις των ρηγμάτων καθορίζονται από τον συντελεστή τριβής f . Όπου το h είναι διάφορο του μηδενός, τα κανονικά ρήγματα που κλίνουν προς τη διεύθυνση ροής του κατώτερου φλοιού θα βυθίζονται με μικρότερες κλίσεις από αυτά που κλίνουν αντίθετα και μάλιστα θα είναι σχεδόν οριζόντια όταν η παράμετρος h είναι μεγαλύτερη του 1 (Εικ. 10.26).

Το ίδιο μοντέλο υποστηρίζει, λοιπόν, ότι η μικρής κλίσης διάρρηξη δεν είναι συνέπεια κάποιου μαγματισμού ή πάχυνσης του φλοιού, αλλά οφείλεται σε αλλαγή της γεωμετρίας των πλακών



Εικόνα 10.27 Σκίτσα εγκάρσιων τομών που φανερώνουν τη σχέση μεταξύ της γένεσης των μικρής κλίσης κανονικών ρηγμάτων στην υπόφελκυστικό καθεστώς περιοχή του ποταμού Κολοράντο (CREC) και της γεωμετρίας των πλακών Farallon (FA), Ειρηνικής (PA) και Βόρειας Αμερικής (NA).

και ότι αυτή η διάρρηξη δημιούργησε ρήγματα με κλίσεις γύρω στις 30^0 , που κλίνουν προς τη διεύθυνση ροής του κατώτερου φλοιού και περιστράφηκαν σε ακόμη μικρότερες κλίσεις σαν αποτέλεσμα του συνεχιζόμενου εφελκυσμού (Εικ. 10.27).

Επανερχόμενος ένα χρόνο αργότερα αναφέρει ότι τέτοιες συνθήκες που επιτρέπουν τη δημιουργία κανονικών ρηγμάτων μικρής κλίσης διαφέρουν από τα λιθοστατικά φορτία και μπορούν να υπάρξουν μόνο κάτω από εξτρεμιστικές συνθήκες. Η διατμητική έλξη που απαιτείται να αναπτυχθεί στη βάση του ανώτερου φλοιού πρέπει να είναι αρκετών δεκάδων MPa και προτείνει ότι τέτοιες τάσεις μπορούν να αναπτυχθούν σαν αποτέλεσμα των διαφοροποιήσεων της θερμικής ισορροπίας μέσα στο ηπειρωτικό φλοιό, λόγω των αλλαγών στη γεωμετρία της υποβυθιζόμενης πλάκας που αντιπροσωπεύει ωκεάνια λιθόσφαιρα.

Ειδικότερα, για την περιοχή του ποταμού Colorado στις δυτικές ΗΠΑ, προτείνεται η παρακάτω σειρά γεγονότων για να δικαιολογηθεί η παρουσία των μικρής κλίσης κανονικών ρηγμάτων (Εικ. 10.27). Αρχικά, πριν το ξεκίνημα της μικρής κλίσης διάρρηξης, η υποβύθιση της πλάκας Farallon κάτω

από την πλάκα της Βόρειας Αμερικής, είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας μικρής γεωθερμικής διαφοροποίησης που επέτρεπε στον ηπειρωτικό φλοιό να είναι θραυσσιγενής μέχρι τη Moho (Εικ. 10.27a).

Με το τέλος της υποβύθισης, άρχισε η οριζόντια ολίσθηση μεταξύ της πλάκας του Ειρηνικού και της Βόρειας Αμερικής που επιτρέπει στη γεωθερμική βαθμίδα να επανέλθει στις φυσιολογικές της τιμές. Αυτό δημιουργεί μια "πλαστική" ζώνη στον κατώτερο φλοιό η οποία βρίσκεται σε υψηλότερες πιέσεις από τις γύρω περιοχές στα βορειοανατολικά, επειδή η βάση του θραυσσιγενούς φλοιού, που βρίσκεται σε εκείνη την περιοχή, είναι βαθύτερα από οπουδήποτε αλλού (Εικ. 10.27b).

Αποτέλεσμα αυτού είναι η ροή του πλαστικού στρώματος προς τα βορειοδυτικά, ροή που θα αναπτύξει μία διατμητική έλξη στη βάση του θραυσσιγενούς φλοιού (Εικ. 10.27b). Αν αυτή η διατμητική έλξη φτάσει και υπερβεί τα 100 MPa, τότε μπορεί η διατμητική αστοχία στον ανώτερο φλοιό, να λάβει χώρα σε επιφάνειες με μικρές κλίσεις (Εικ. 10.27b). Αυτή η ροή θα διαρκέσει μέχρι να επανέλθει στο σύστημα η θερμική ισορροπία.