ΚΕΦΑΛΑΙΟ

7 Σύγκρουση Περιθωρίων Λιθοσφαιρικών Πλακών

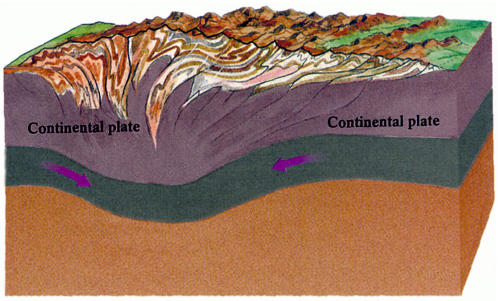
7.1 Εισαγωγή

Καθώς ένα αναλισκόμενο περιθώριο (consuming margin) εξελίσσεται, θα φθάσει η στιγμή που ο ωκεάνιος φλοιός της υποβυθιζόμενης πλάκας θα αναλωθεί εντελώς με αποτέλεσμα η διαδικασία αυτή να μεταφέρει ηπειρωτικό φλοιό, ή φλοιό νησιωτικού τόξου, στη ζώνη υποβύθισης. Από τη στιγμή αυτή μια ζώνη σύγκρουσης (collision zone), αντικαθιστά το αναλισκόμενο περιθώριο, που στη συνέχεια εξελίσσεται σε ορογένεση (Εικ. 7.1). Η είσοδος χαμηλής πυκνότητας φλοιού στη ζώνη υποβύθισης, επιφέρει μια μεταβολή στη γεωμετρία και κινηματική των πλακών, γιατί η άντωσή του εξουδετερώνει τις δυνάμεις που κινητοποιούν την υποβύθιση και ως εκ τούτου μεταβάλει την κίνηση των πλακών. Άρα, σταματάει η υποβύθιση (ο ελαφρύς φλοιός και των δύο ηπείρων που έχουν έρθει σε επαφή δεν μπορεί να υποβυθισθεί) και άρα αρχίζει η σύγκρουση.

Υποβυθίζονται οι Ήπειροι;

Στο σημείο αυτό τίθεται όμως το ερώτημα: μπορεί ο ηπειρωτικός φλοιός, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, να βυθισθεί και πόσο βαθειά μπορεί να φθάσει; Έρευνες των τελευταίων 20 ετών έχουν δείξει ότι το εμπρόσθιο άκρο μιας ηπείρου μπορεί να παρασυρθεί από τη ζώνη υποβύθισης για εκατοντάδες χιλιόμετρα βαθειά μέσα στο μανδύα. Επειδή, όμως το τμήμα αυτό του ηπειρωτικού φλοιού είναι πιο ελαφρύ από το μανδύα που το περιβάλει, θα ανέλθει γρήγορα στην επιφάνεια. Ή μπορεί, σε ορισμένες περιπτώσεις να εγκλωβιστεί εκεί; Ως απάντηση σε όλα τα παραπάνω ερωτήματα αναφέρονται τα ακόλουθα:

Όπως αναφέρθηκε ο ηπειρωτικός φλοιός είναι πιο ελαφρύς από τον ωκεάνιο και αρκετά πιο ελαφρύς από τα πετρώματα του μανδύα. Από τη στιγμή που σχηματίζεται ο ηπειρωτικός φλοιός μπορεί να ρηγματώνεται και να δημιουργεί τάφρους (rift), μπορεί τμήματά του να αποσπώνται (drift), ή να συγκρούονται (collide), με άλλες ηπείρους, αλλά η μεγαλύτερη άντωση που έχει, σε σχέση με τα πιο βασικής σύστασης πετρώματα, τον δυσκολεύουν στο να βυθιστεί. Ως εκ τούτου, λοιπόν, έχει την τάση να παραμένει στην γήϊνη επιφάνεια. Παρ' όλα αυτά, η σχετικά πρόσφατη ανακάλυψη ορυκτών υπερ-υψηλής πίεσης στον ηπειρωτικό φλοιό, "σπέρνει" κάποιες αμφιβολίες, σχετικά με τη "συμ-



Εικόνα 7.1 *Η σύγκρουση των ηπείρων (κάτω σχήμα), δημιουργεί εντυπωσιακές οροσειρές, όπως αυτή των Άλπεων (φωτογραφία αριστερά). Είναι η κορυφή Matterhorn στις Ελβετικές Άλπεις, που το τελικό σχήμα του κεράτου (horn), το "σμίλευσαν" οι παγετώνες.*

βατική άποψη" που λέει ότι οι ήπειροι δεν υποβυθίζονται. Τα διαμάντια και ο κοεσίτης, μια μορφή υπερ-υψηλών πιέσεων του χαλαζία, που έχουν βρεθεί στον ηπειρωτικό φλοιό, στη Νορβηγία, την Ιταλία, την Κίνα και το Καζακστάν, θέτουν δύο ερωτήματα: Υποβυθίζονται οι ήπειροι; Έχει η ηπειρωτική λιθόσφαιρα ανακυκλωθεί μέσα στο μανδύα κατά το παρελθόν;

Η απάντηση στο πρώτο ερώτημα πρέπει να είναι "ναι". Μέχρις ενός σημείου, ο ηπειρωτικός φλοιός πρέπει να υποβυθίζεται μέσα στο μανδύα σε βάθη που σχηματίζονται διαμάντια (περίπου 150 km). Και στη συνέχεια βέβαια πρέπει να επιστρέφει στην επιφάνεια, για να μπορούμε εμείς σήμερα να τον μελετάμε τα διαμάντια αυτά στη Νορβηγία, το Καζακστάν και αλλού (Εικ. 7.2). Δεν υπάρχει άλλος τρόπος, εκτός από την τεράστια πίεση που θα άσκουσε η πτώση ενός μετεωρίτη, για να δημιουργηθούν διαμάντια σε πετρώματα που έχουν σχηματισθεί στην επιφάνεια της Γης.

Δεν εκπλήσσει επίσης το γεγονός ότι αυτά τα, πολύ βαθειά, θαμμένα πετρώματα, επιστρέφουν στην επιφάνεια. Για να γίνει πιο κατανοητό, αναφέρεται το παράδειγμα μιας μπάλας που βυθίζεται σε μια πισίνα με νερό. Η άνωση θα την μεταφέρει γρήγορα στην επιφάνεια, γιατί ή ίδια από μόνη της δεν είναι αρκετά πυκνή (και άρα βαριά), για να παραμείνει κάτω από το νερό. Με τον ίδιο τρόπο, τα μικρής πυκνότητας πετρώματα του ηπειρωτικού φλοιού, θα ανέλθουν από το μανδύα, μιας και οι δυνάμεις που τα υποβύθισαν σε αυτά τα βάθη, δεν μπορούν πια να ανταπεξέλθουν στις δυνάμεις της άντωσης. Η πιο ενδιαφέρουσα πλευρά αυτής της ιστορίας, είναι τα πολύ μεγάλα βάθη που φθάνουν τα τμήματα αυτά του ηπειρωτικού φλοιού. Η πιο πειστική ερμηνεία για το γεγονός αυτό θεωρεί ότι όταν ο ωκεάνιος φλοιός αναλωθεί στο σύνολό του, σε μια ζώνη υποβύθισης, οι παρυφές της ηπείρου, (που "έσερνε" μαζί του ο ωκεάνιος φλοιός), δηλαδή το ηπειρωτικό περιθώριο, που είναι πιο λεπτό από τον υπόλοιπο φλοιό, παρασύρεται και αυτό προς τα κάτω από την βαρυτική έλξη της κατερχόμενης πλάκας, για μια απόσταση μέχρι η άντωση να γίνει μεγαλύτερη από την έλξη προς τα κάτω.

Άλλο ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα της υποβύθισης του ηπειρωτικού φλοιού, αποτελεί και η πιθανότητα να μην επιστρέφει στο σύνολό του στην επιφάνεια. Αν ο μανδύας αφομοιώνει κάποιο από

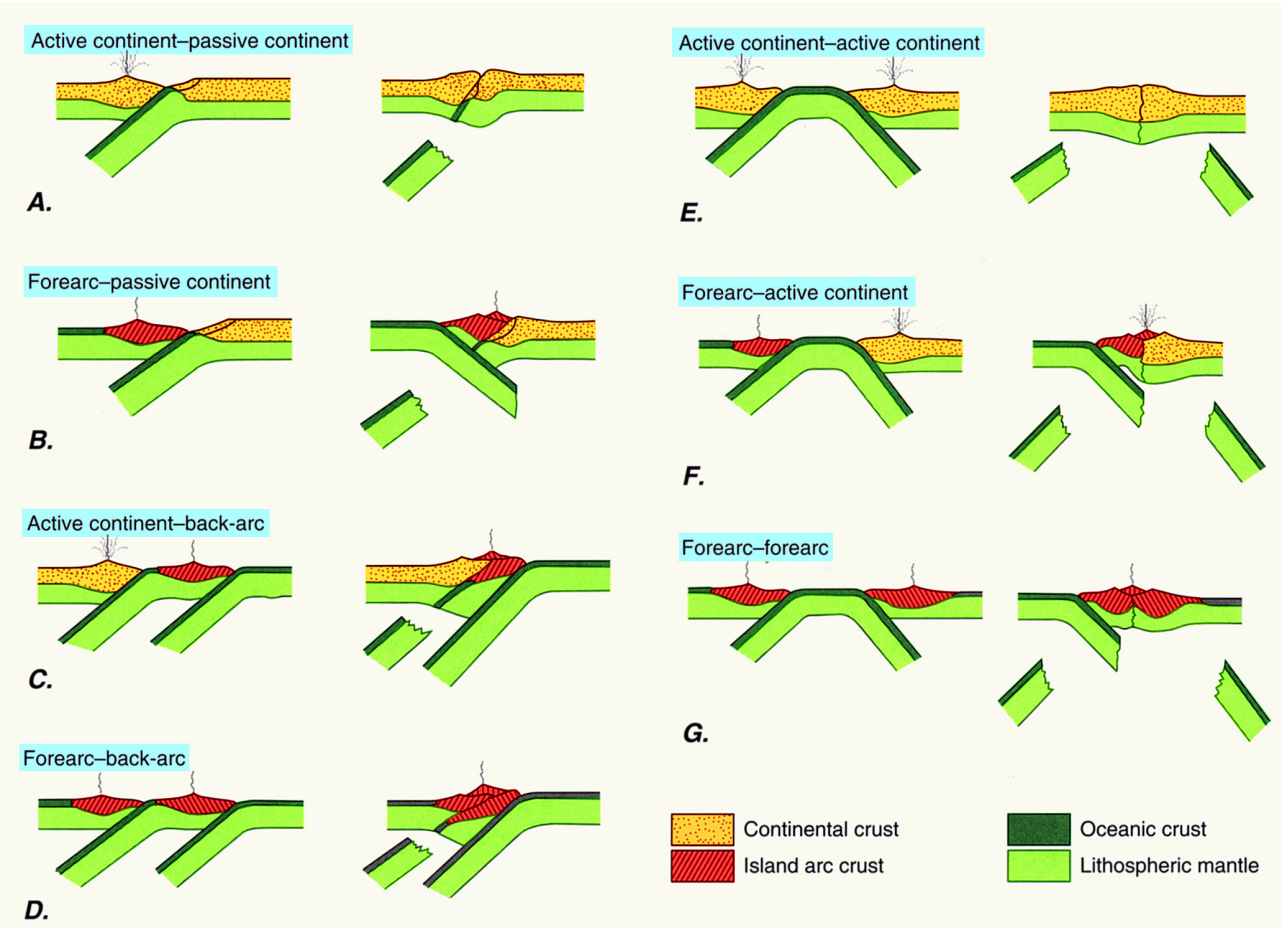
Εικόνα 7.2 *Τα βέλη δείχνουν μικροσκοπικά διαμάντια που απαντώνται σε υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης γνευσίους (από την παραλιακή ζώνη της Νορβηγίας). Στη διπλανή φωτογραφία παρουσιάζεται ένας κόκκος διαμαντιού από πετρώματα στο Καζακστάν.*

αυτό το κατερχόμενο υλικό, αυτό πρέπει να αντανακλάται στη χημική του σύσταση. Αυτή καθ' αυτή η ύπαρξη διαμαντιών στο μανδύα, μπορεί να είναι μια ισχυρή ένδειξη για την προσθήκη ηπειρωτικού υλικού στο μανδύα. Ο άνθρακας των διαμαντιών πρωτογενώς μπορεί να προέρχεται από οργανική ή άλλη ανθρακική ύλη, που υποβυθίστηκε μαζί με τα ιζηματογενή πετρώματα του ηπειρωτικού περιθωρίου.

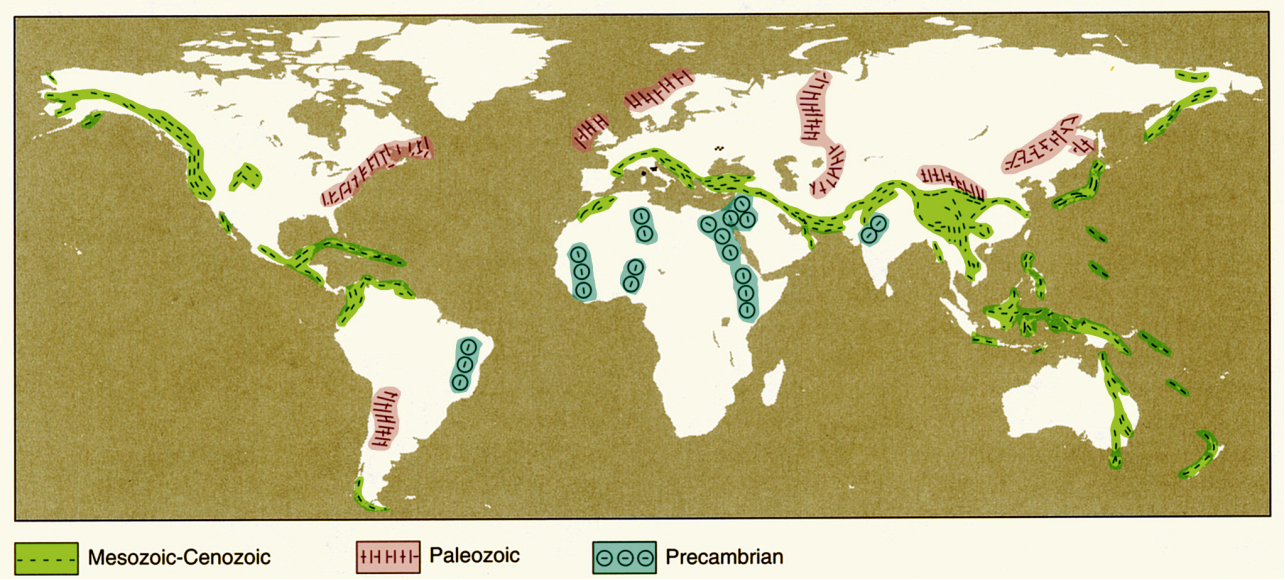
Επισημαίνεται ότι τέτοια υπερ-υψηλής πίεσης πετρώματα δεν έχουν βρεθεί ακόμα στο υψηλότερο βουνό του κόσμου, τα Ιμαλάϊα, αλλά και σε άλλες περιοχές του πλανήτη, όπως στη Βόρεια Αμερική και αλλού. Πιθανά δεν υφίστανται τέτοιου τύπου πετρώματα στις περιοχές αυτές, ή δεν έχουν ακόμα ανακαλυφθεί. Όπως και να έχει, η έρευνα για την υποβύθιση του ηπειρωτικού φλοιού συνεχίζεται, μέχρι να απαντηθούν όλα τα ερωτήματα που σχετίζονται με αυτή.

Τύποι της Σύγκρουσης

Υπάρχουν αρκετοί πιθανοί τύποι σύγκρουσης, όπως αναλυτικά παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.3, που εν μέρει, εξαρτώνται από το αν στην όλη διαδικασία εμπλέκονται μία ή δύο ζώνες υποβύθισης. Αν μόνο μία ζώνη υποβύθισης είναι παρούσα, το παθητικό ηπειρωτικό περιθώριο της κατερχόμενης πλάκας μπορεί να συγκρουσθεί είτε με ένα ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο (Εικ. 7.3A), είτε με το περιθώριο ενός εμπροσθο-τόξου (fore-arc, Εικ. 7.3B), που βρίσκεται στην επωθούμενη πλάκα. Εάν δύο ζώνες υποβύθισης, που κλίνουν προς την ίδια κατεύθυνση, εμπλέκονται στο όλο σύστημα, το οπισθο-τόξο (back-arc) της κατερχόμενης πλάκας μπορεί να συγκρουσθεί είτε με ένα ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο (Εικ. 7.3C), είτε με το περιθώριο ενός εμπροσθο-τόξου (Εικ. 7.3D), που βρίσκονται στην επωθούμενη πλάκα. Τέλος, αν υπάρχουν δύο



Εικόνα 7.3 *Διαγράμματα που παρουσιάζουν τους θεωρητικά πιθανούς τύπους σύγκρουσης, προϋποθέτοντας μία (**A** & **B**), ή δύο ζώνες σύγκρουσης με την ίδια (**C** & **D**), ή διαφορετική (**E**, **F** & **G**), φορά κλίσης. Η αριστερή στήλη παρουσιάζει τη γεωμετρία των πλακών πριν τη σύγκρουση και η δεξιά τη γεωμετρία των τεμαχών του φλοιού και της υποβυθιζόμενης πλάκας(ή πλακών), μετά τη σύγκρουση. Σε όλες τις περιπτώσεις η αρχικά υποβυθιζόμενη λιθοσφαιρική πλάκα έχει αποκοπεί από την επιφανειακή πλάκα και η γεωμετρία του συστήματος υποβύθισης επαναοργανώνεται.*



Εικόνα 7.4 *Η κατανομή των διαφόρων ηλικιών οφιολιθικών ζωνών σε παγκόσμιο επίπεδο, καταδεικνύει την ύπαρξη πολλών παλαιών ζωνών σύγκρουσης, αναδεικνύοντας το φαινόμενο αυτό ως μια πολλή σημαντική τεκτονική διαδικασία.*

ζώνες υποβύθισης, που κλίνουν σε διαφορετικές κατευθύνσεις, οι δύο επωθούμενες πλάκες μπορούν να συγκρουσθούν με τρεις διαφορετικούς τρόπους, δηλαδή σύγκρουση: ενεργού ηπειρωτικού περιθωρίου με ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο (Εικ. 7.3E), εμπροσθο-τόξου με ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο (Εικ. 7.3F) και εμπροσθο-τόξου με εμπροσθο-τόξο (Εικ. 7.3G). Άρα λοιπόν, με βάση την Εικόνα 7.3, προβλέπονται: Δύο τύποι σύγκρουσης ηπείρου με ήπειρο (Εικ. 7.3A και 7.3E), τρεις τύποι σύγκρουσης τόξου με ήπειρο (Εικ. 7.3B, 7.3C και 7.3F) και δύο τύποι σύγκρουσης τόξο με τόξο (Εικ. 7.3D και 7.3G).

Δύο θεμελιώδεις θεωρήσεις είναι σημαντικές για την κατανόηση του φαινομένου της σύγκρουσης. Σύμφωνα με την πρώτη από αυτές, για αρκετούς τύπους συγκρούσεων, η άντωση του ηπειρωτικού φλοιού ή του φλοιού του νησιωτικού τόξου, τείνει να τερματίσει την υποβύθιση στα συγκλίνοντα περιθώρια. Το αποτέλεσμα είναι είτε η μετατόπιση της ζώνης υποβύθισης, είτε μια εναλλαγή στη γεωμετρία και κινηματική των πλακών (αλλαγή της φοράς υποβύθισης). Τα διαγράμματα της Εικ. 7.3 (οι δεξιές στήλες), παρουσιάζουν την εξέλιξη που μπορούν να προκαλέσουν οι πιθανοί τύποι σύγκρουσης.

Στην περίπτωση της μιας ζώνης σύγκρουσης, η υποβύθιση σταματά όταν το παθητικό ηπειρωτικό περιθώριο εισέρχεται στη ζώνη υποβύθισης (Εικ. 7.3A και & 7.3B). Για τη σύγκρουση ηπείρου με ήπειρο (Εικ. 7.3A) η διαδικασία της σύγκλισης θα μετατεθεί σε κάποια άλλη περιοχή του συστήματος των τεκτονικών πλακών και αυτή η μετάθεση μπορεί να οδηγήσει σε μια γενικότερη αναδιοργάνωση της κινηματικής των πλακών σε παγκόσμιο επίπεδο. Στην περίπτωση της σύγκρουσης νησιωτικού τόξου με παθητικό ηπειρωτικό περιθώριο (Εικ. 3.7B), ο ωκεάνιος φλοιός μπορεί να αρχίσει να υποβυθίζεται κάτω από τη ζώνη σύγκρουσης, οδηγώντας έτσι στην αναστροφή της πολικότητας (φοράς κλίσης), της ζώνης υποβύθισης.

Στην περίπτωση των δύο παράλληλων ζωνών υποβύθισης (Εικ. 7.3C και & 7.3D), η ζώνη υποβύθισης, που παραμένει ενεργή μετά τη σύγκρουση, μπορεί να αναλάβει να διεκπεραιώσει όλη την κίνηση με την αύξηση του ρυθμού υποβύθισής της, λόγω της εξάλειψης της άλλης ζώνης.

Και στην περίπτωση των διπλών ζωνών σύγκλισης προς αντίθετες κατευθύνσεις συμβαίνει κάτι ανάλογο. Η σύγκρουση ηπείρου με ήπειρο (Εικ. 7.3E) τερματίζει τη σύγκλιση, που μετατίθεται κάπου αλλού μέσα από την πιθανή γενικότερη αναδιοργάνωση του συστήματος των πλακών σε παγκόσμιο επίπεδο. Αν ένα νησιωτικό τόξο εμπλέκεται στη διαδικασία της σύγκρουσης (Εικ. 7.3F και & 7.3G), τότε αυτή μπορεί να οδηγεί στη δημιουργία μιας νέας υποβύθισης ωκεάνιου φλοιού, κάτω από τη ζώνη σύγκρουσης.

Η δεύτερη θεμελιώδης θεώρηση αφορά στις οφιολιθικές ζώνες που βρίσκονται μέσα στις ηπείρους, αντιπροσωπεύοντας υπολείμματα ωκεάνιων λεκανών, που κάποτε χώριζαν ηπειρωτικές μάζες (εικ. 7.4). Οι οφιόλιθοι αυτοί συνήθως βρίσκονται υπέρκεινται με μεγάλη τεκτονική επαφή ιζημάτων της κρηπίδας. Σε πολλές περιοχές οι επαφές αυτές χαρακτηρίζονται από μεγάλης κλίμακας υπο-

οριζόντιες επωθήσεις, που έχουν μεταφέρει τους οφιολίθους και το υποκείμενό τους υλικό, σε πολύ μεγάλες αποστάσεις προς το εσωτερικό της ηπείρου. Η τοποθέτηση των οφιολίθων μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: i) οι περισσότεροι από αυτούς είναι τοποθετημένοι από τη σύγκρουση ενός παθητικού ηπειρωτικού περιθωρίου με μια ενδο-ωκεανική ζώνη υποβύθισης και εγκλωβίζονται μέσα στον ηπειρωτικό φλοιό από την επακόλουθη σύγκρουση ηπείρου με ήπειρο και ii) σε λιγότερες περιπτώσεις τοποθετούνται μέσα από την ενσωμάτωση ενός τμήματος της κατερχόμενης ωκεάνιας πλάκας στη ζώνη υποβύθισης. Η μεγάλη ποικιλία και ο αριθμός των οφιολιθικών ζωνών που παρατηρούνται σε παγκόσμιο επίπεδο (Εικ. 7.4), καταδεικνύουν τις πολλές συγκρούσεις που έλαβαν χώρα κατά το παρελθόν, αναδεικνύοντας το φαινόμενο αυτό ως μια πολλή σημαντική τεκτονική διαδικασία.

Με τη σπουδαιότητα που έχει το φαινόμενο αυτό, σε παγκόσμια πολλές φορές κλίμακα, και με τις πολλές διαφορετικές περιπτώσεις ζωνών σύγκρουσης με διαφορετικά γεωμετρικά και κινηματικά χαρακτηριστικά, είναι αναμενόμενο ότι η ερμηνεία των γεωλογικών δεδομένων, που συνδέονται με το φαινόμενο αυτό, θα είναι δύσκολη και πολύπλοκη.

Τα Φαινόμενα που Σχετίζονται με τη Σύγκρουση

Είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 6), ότι η ωκεανική λιθόσφαιρα που ψύχεται, με την πάροδο του χρόνου γίνεται πυκνότερη από την ασθενόσφαιρα και αρχίζει το φαινόμενο της βύθισης (subduction). Αντίθετα η ηπειρωτική λιθόσφαιρα που είναι ελαφρότερη παραμένει σε γενικές γραμμές στην επιφάνεια της γήινης σφαίρας. Ξέρουμε όμως ότι οι περισσότερες λιθοσφαιρικές πλάκες αποτελούνται από ωκεανικό αλλά και από ηπειρωτικό φλοιό. Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, κατά τη σύγκλιση των πλακών, κάποια στιγμή της γεωλογικής τους εξέλιξης, η βυθιζόμενη ωκεανική πλάκα, που μεταφέρει τον ηπειρωτικό της φλοιό, όταν φτάσει στην ωκεανική τάφρο, θα διακόψει το φαινόμενο της βύθισης και έτσι θα προκληθεί μια "σύγκρουση" (collision).

Η Τοποθέτηση των Καλυμμάτων

Όπως αναφέρθηκε, σύγκλιση των πλακών δεν σταματάει αμέσως όταν π.χ. ένα σταθερό περιθώριο έρχεται σε επαφή με ένα ενεργό ή ένα νησιωτικό τόξο. Μεσολαβεί μια σύντομη χρονική περίοδος (με την γεωλογική έννοια), μέχρι το πλήρες σταμάτημα του φαινομένου της βύθισης. Κατά την χρονική αυτή περίοδο ο ηπειρωτικός φλοιός μπορεί να χώνεται κάτω από την εφιππεύουσα πλάκα. Το φαινόμενο αυτό της "σύγκρουσης" που ακολουθεί έχει ως αποτέλεσμα την επώθηση του άκρου της εφιππεύουσας πλάκας πάνω στην άλλη πλάκα με την τοποθέτηση μεγάλου πάχους καλυμμάτων πάνω σε ένα ηπειρωτικό φλοιό (γνωστά με τον όρο basement nappes – καλύμματα υποβάθρου). Η φύση των καλυμμάτων καθορίζεται από την σύσταση της λιθόσφαιρας στο άκρο της εφιππεύουσας πλάκας.

Αν η σύσταση του φλοιού της εφιππεύουσας πλάκας έχει ωκεανικούς χαρακτήρες, τότε με την σύγκρουση θα έχουμε την τοποθέτηση οφιολιθικών καλυμμάτων (ophiolite nappes). Παλαιότερα το φαινόμενο αυτό της επώθησης του ωκεανικού φλοιού πάνω σε ένα ηπειρωτικό περιθώριο ή ενεργό νησιωτικό τόξο (με κάποιες προϋποθέσεις όπως θα αναλυθεί στα επόμενα), το ονόμαζαν με τον όρο "obduction" και θεωρούσαν ότι είναι μια συνέπεια του φαινομένου της βύθισης. Σήμερα τείνει να ξεχαστεί ο όρος και το φαινόμενο το θεωρούν ότι είναι συνέπεια της σύγκρουσης.

Αν το άκρο της εφιππεύουσας πλάκας αποτελείται από ηπειρωτικό φλοιό, το φαινόμενο της σύγκρουσης προκαλεί τον σχηματισμό των ηπειρωτικού τύπου καλυμμάτων (continental basement nappes). Τα καλύμματα αυτά αποτελούνται βασικά από υλικά του φλοιού. Πολλές φορές, όμως, βλέπουμε και πετρώματα που θεωρούνται ότι ανήκουν στο μανδύα (περιδοτίτες), να συμμετέχουν στις επωθήσεις. Είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο από τα σεισμικά δεδομένα ότι η λιθόσφαιρα φαίνεται να χωρίζεται σε δύο στρώματα από ένα κανάλι κυμάτων με μικρότερη ταχύτητα, που για ορισμένους γεωφυσικούς το κανάλι αυτό αποτελείται από μία ζώνη με σερπεντινιωμένους περιδοτίτες. Οι σερπεντινίτες είναι πετρώματα πολύ πλαστικά που αν πράγματι σχηματίζουν ένα συνεχές στρώμα, βοηθούν στην ολίσθηση και τον αποχωρισμό της ανώτερης λιθόσφαιρας από την κατώτερη. Κατά το φαινόμενο της σύγκρουσης οι εφαπτομενικές τάσεις μπορούν να δώσουν αρχικά γένεση καλυμμάτων υποβάθρου τα οποία αποτελούνται από υλικό του φλοιού και του μανδύα. Θεωρητικά μπορούμε να συναντήσουμε τρεις τύπους καλυμμάτων υποβάθρου.

Τα οφιολιθικά καλύμματα. Όταν ο ηπειρωτικός φλοιός της βυθιζόμενης πλάκας παρασύρεται μέσα στην ζώνη της βύθισης, ο ωκεανικός φλοιός και το μανδυακό στρώμα ολίσθησης, που περιβάλλουν την εφιππεύουσα πλάκα μπορούν να δημιουργήσουν καλύμματα από πρασινοπετρώματα σημαντικού πάχους, (Εικ. 7.5). Έτσι εξηγούνται τα μεγάλου πάχους οφιολιθικά καλύμματα που παρατηρούνται μέσα στις πτυχωμένες οροσειρές. Κατ' αυτή την ερμηνεία η επώθηση προηγείται από το πλήρες

σταμάτημα της λιθοσφαιρικής σύγκλισης και είναι σχεδόν σύγχρονη με το φαινόμενο της σύγκρουσης και της παροξυσμικής τεκτονικής. Σε επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται αρκετές λεπτομέρειες για τα μοντέλα τοποθέτησης των οφιολιθικών καλυμμάτων.

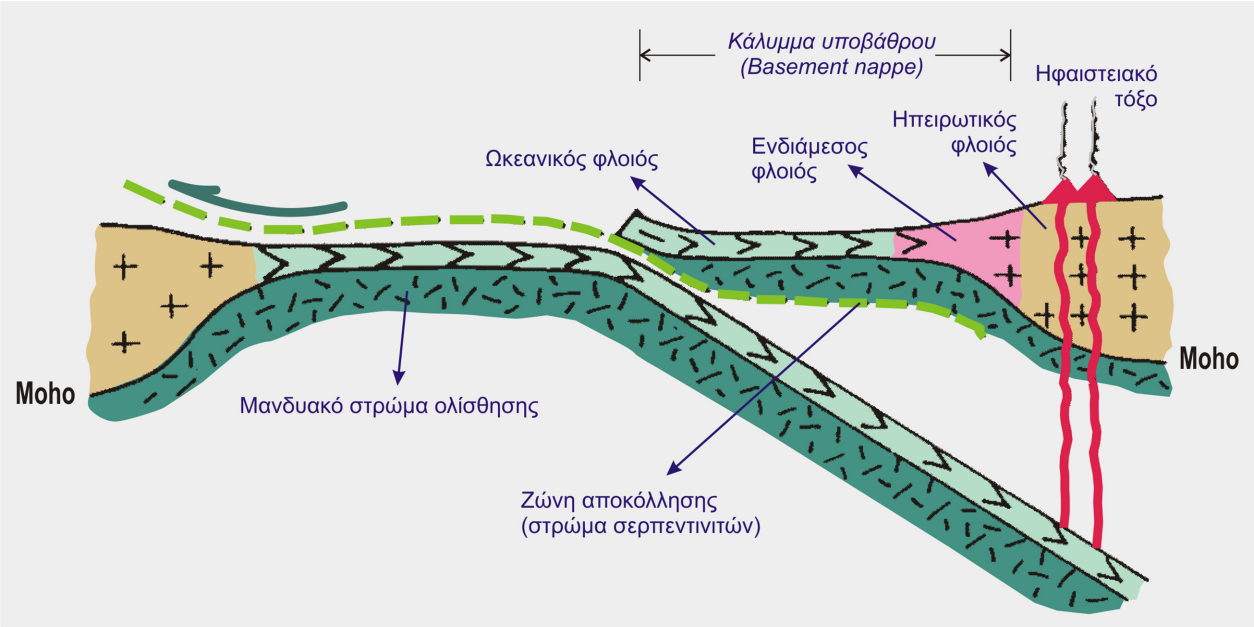
Τα καλύμματα του ενδιάμεσου φλοιού. Έχουμε προαναφέρει ότι ο ενδιάμεσος φλοιός, που σχηματίζεται κατά την μετατροπή ενός σταθερού ηπειρωτικού περιθωρίου σε ενεργό, αποτελεί τη μετάβαση μεταξύ ηπείρου και ωκεανού. Κατά την διάρκεια της βύθισης αυτός ο τύπος του φλοιού καταλαμβάνει μια παρόμοια θέση με εκείνη του ωκεανικού φλοιού του ευρισκόμενου στο άκρο της εφιππεύουσας πλάκας (Εικ. 7.5). Στην περίπτωση της σύγκρουσης, το υπόβαθρο του παλαιού σταθερού περιθωρίου και οι περιδοτίτες που αποτελούσαν την βάση του, μπορούν θεωρητικά να συμμετέχουν σε μια επώθηση του φλοιού καθ' όλα συγκρίσιμη με εκείνη του ωκεανικού φλοιού και του μανδύα.

Το πρόβλημα της φύσης του ωκεανικού φλοιού το οποίο δεν έχει ακόμα ξεκαθαριστεί, δημιουργεί προβλήματα και στην ένταξη των καλυμμάτων. Αν π.χ. ο ενδιάμεσος φλοιός έχει χαρακτήρες περισσότερο ωκεανικούς από ότι ηπειρωτικούς, τότε μερικά από τα γνωστά οφιολιθικά καλύμματα θα πρέπει να ανήκουν σε αυτόν. Αν πάλι ο ενδιάμεσος φλοιός αποτελείται περισσότερο από ηπειρωτικό φλοιό βάθους, που πλησιάζει στην επιφάνεια λόγω εφελκυστικών φαινομένων, τότε σε αυτή την περίπτωση τα καλύμματα του γρανουλιτικού υποβάθρου που περιέχουν και υπερβασικά πετρώματα και έχουν περιγραφεί στις πτυχωμένες οροσειρές όπως δυτικές Άλπεις (περιοχή Καλαβρίας, Πυρηναία κ.λ.π.) πρέπει να ανήκουν σ' αυτόν.

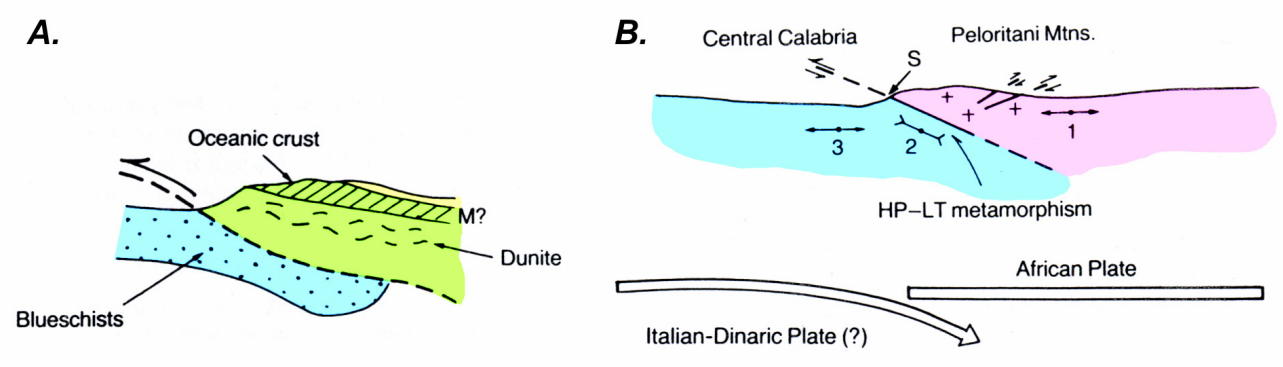
Τα *καλύμματα του τυπικού ηπειρωτικού φλοιού*. Αυτά δημιουργούνται όταν η πλάκα που κατεβαίνει εισχωρεί κάτω από έναν παχύ ηπειρωτικό φλοιό.

Η Κατανομή της Μεταμόρφωσης

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6, η εφιππεύουσα πλάκα μπορεί να υφίσταται μόνο μεταμόρφωση υψηλών θερμοκρασιών (HT), κατά τη διάρκεια της υποβύθισης. Τα καλύμματα υποβάθρου (basement nappes), που ανήκουν στην πλάκα αυτή, κατά την τοποθέτησή τους δεν μπορούν να υποστούν κυανοσχιστολιθική μεταμόρφωση HP/LT, εκτός αν αυτή περιορίζεται μόνο στο κατώτατο τμήμα της βάσης τους. Από την άλλη μεριά, ισχυρές τάσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες, λαμβάνουν χώρα στα βαθύτερα τμήματα του πρίσματος συσσώρευσης (accretionary prism), μετά την είσοδο της κατερχόμενης πλάκας κάτω από τα καλύμματα υποβάθρου. Με άλλα λόγια, στο οικοδόμημα των καλυμμάτων που δημιουργείται, μόνο το σχετικά αυτόχθονο (δηλαδή ο ηπειρωτικός φλοιός της κατερχόμενης πλάκας) και το ιζηματογενές πέλμα (sedimentary sole) των καλυμμάτων (δηλαδή τα λεπιωμένα υπολείμματα του πρίσματος συσσώρευσης), μπορούν να περιλαμβάνουν κυανοσχιστολιθικά μέλη. Σε γενικές γραμμές, η τεκτονική θέση των πετρωμάτων που είναι μεταμορφωμένα σε υψηλές πιέσεις φαίνεται στα παρα-



Εικόνα 7.5 *Σχηματική τομή της τοποθέτησης των οφιολιθικών καλυμμάτων. Στο στάδιο αυτό το οφιολιθικό κάλυμμα (που αποτελεί ένα κάλυμμα υποβάθρου – basement nappe), δεν έχει ακόμα τοποθετηθεί στην οριστική του θέση.*



Εικόνα 7.6 *Η τεκτονική θέση των κυανοσχιστολιθικών φάσεων στις ζώνες σύγκρουσης.* ***Α.*** *Επώθηση ωκεανικού φλοιού και μανδύα (οφιολιθικό κάλυμμα) στη Νέα Καληδονία και Νέα Γουϊνέα (M: Moho).* ***Β.*** *Η ζώνη συρραφής της Καλαβρίας. Στην περίπτωση αυτή το κάλυμμα υποβάθρου αποτελείται από ηπειρωτικό φλοιό (1: θέση ιουρασικού εφελκυσμού – βασάλτες, back-arc basin? 2: θέση κρητιδικής-ηωκαινικής συμπίεσης και μεταμόρφωσης HP/LT, 3: θέση ανω-κρητιδικού εφελκυσμού – αλκαλικοί βασάλτες).*

δείγματα της Εικόνας 7.6. Φυσικά η λογική και τα ερωτήματα που τέθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, για τα συγκλίνοντα όρια των πλακών, σχετίζονται άμεσα και με το τελικό αυτό στάδιο της σύγκρουσης. Σε ποιο βάθος στη ζώνη υποβύθισης φθάνουν οι κυανοσχιστόλιθοι; Το βάθος των 15 ή και περισσότερων χιλιομέτρων που υποστηρίζουν οι γεωφυσικοί είναι μια υπερβολή; Το πάχος των οφιολιθικών καλυμμάτων δεν μπορεί να υπερβεί το πάχος του ωκεάνιου φλοιού (7 km) και του μανδυακού πέλματος στη βάση του (συνήθως μερικά km). Δηλαδή ένα μέγιστο πάχος π.χ. γύρω στα 12 km. Οι κυανοσχιστολιθικές φάσεις απαντώνται στις περισσότερες περιπτώσεις κάτω από τα καλύμματα, εκεί όπου η μετατεκτονική διάβρωση επιτρέπει την αποκάλυψη και μελέτη των σχετικά αυτόχθονων πετρωμάτων. Ως εκ τούτου, λοιπόν, η μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων μπορεί να συμβεί στις ζώνες υποβύθισης σε βάθος 10 km, ή και πιο κοντά στην επιφάνεια. Φαίνεται, επίσης, ότι το ποσοστό του φλοιού που πρέπει να διαβρωθεί για την αποκάλυψη των οφιολίθων, πρέπει να είναι μικρότερο από αυτό που υποστηρίζεται από τα σύγχρονα γεωφυσικά μοντέλα.

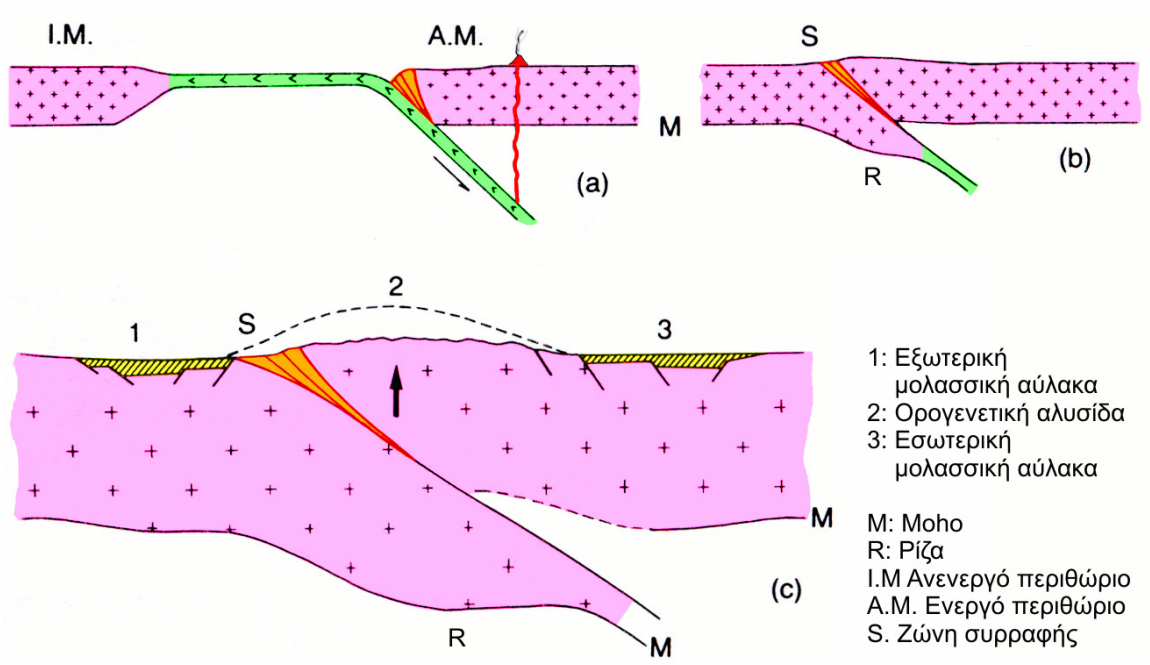
Οδόντωση και Σύνθλιψη των Ηπειρωτικών Περιθωρίων

Όταν δύο πλάκες που έχουν ηπειρωτικό φλοιό συγκλίνουν, η σύγκρουση αρχίζει στις περιοχές που πρωτοσυναντώνται οι ηπειρωτικοί φλοιοί, δηλαδή εκεί που προεξέχουν αφού τα περιθώρια παρουσιάζουν συνήθως ένα οδοντωτό σχήμα (indentation). Η προεξοχή του ενός περιθωρίου, που πρώτη προσκρούει (εμβολίζει), το άλλο αποκαλείται συνήθως indenter, με πιο δόκιμη απόδοση στα ελληνικά ως "εμβολέας". Η βύθιση αντίθετα θα συνεχίζεται εκεί που υπάρχει ακόμα ωκεάνιος φλοιός μεταξύ των περιθωρίων. Έτσι στις ζώνες της σύγκρουσης θα αναπτύσσονται πολύ ισχυρές εφαπτομενικές τάσεις, ενώ αντίθετα εκεί που συνεχίζεται η βύθιση οι τάσεις είναι κατά πολύ μικρότερες.

Αυτή η διαδικασία, που επαναλαμβάνεται κατά την διάρκεια της γεωλογικής ιστορίας, έχει τελευταία προκαλέσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών. Η ζώνη συρραφής (suture zone) μεταξύ δύο πλακών αντιστοιχεί σε μια ζώνη που χαρακτηρίζεται από μυλονίτες και τεκτονικά μίγματα (melanges) εντελώς συνθλιμμένα, όπου συναντάμε μεταμορφωμένα πετρώματα κυανοσχιστολιθικής φάσης και κομμάτια από πρασινοπετρώματα που ίσως προέρχονται από το πρίσμα παραμόρφωσης.

Ένα ενεργό περιθώριο μπορεί να συγκρουστεί με μια προεξοχή (εμβολέα, indenter), του ηπειρωτικού φλοιού. Το περιθώριο παραμορφώνεται έντονα στο σημείο της σύγκρουσης. Ένα σταθερό περιθώριο εισχωρεί κάτω από ένα ενεργό που παρουσιάζει μια προεξοχή. Τότε η προεξοχή αυτή συνθλίβεται με τη σύγκρουση στο σταθερό περιθώριο. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η εφιππεύουσα πλάκα πάντα υφίσταται την πιο έντονη παραμόρφωση στην περίπτωση της σύγκρουσης. Η βυθιζόμενη πλάκα υφίσταται και αυτή παραμορφώσεις.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η σύγκρουση πραγματοποιείται μεταξύ ενός ενεργού ηπειρωτικού περιθωρίου και ενός σταθερού, του οποίου οι προγενέστερες δομές αναζωπυρώνονται (Εικ. 7.7). Έτσι βλέπουμε τα παλαιά κανονικά ρήγματα να αναζωπυρώνονται ως ανάστροφα κατά την διάρκεια της σύγκρουσης. Τα τεμάχη του φλοιού, τα οποία έχουν βυθιστεί και μετατοπιστεί κατά τη διάρκεια της ταφροποίησης, μετατρέπονται τώρα σε τεκτονικές ενότητες που κατευθύνονται προς την εμπροσθοχώρα.



Εικόνα 7.7 *Σχηματική τομή σύγκρουσης ηπείρου με ήπειρο (παθητικό με ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο).* ***(a)****: Υποβύθιση της ωκεάνιας πλάκας στο στάδιο πριν τη σύγκρουση.* ***(b)*** *και* ***(c)****: Σύγκρουση, δημιουργία ορογενετικής αλυσίδας και ανάπτυξη μολασσικών λεκανών (εσωτερικής και εξωτερικής).*

Κατακόρυφες Κινήσεις

Κατά το φαινόμενο της σύγκρουσης (Εικ. 7.7), η τοποθέτηση των καλυμμάτων πάνω σε ένα παχύ ηπειρωτικό φλοιό έχει ως αποτέλεσμα την γρήγορη ανύψωση της περιοχής (ορογένεση). Τα ανυψωμένα ανάγλυφα προσβάλλονται από την έντονη διάβρωση που προκαλεί μια νέα ανύψωση εξαιτίας της ισοστατικής ισορροπίας και η διαδικασία αυτή θα διαρκέσει μέχρις ότου ο φλοιός ξαναεπανέλθει στο κανονικό του πάχος (30-40 km). Η νέα οροσειρά περιβάλλεται από συσσωρεύσεις ιζημάτων μεγάλου πάχους σε λεκάνες (μόλασσες), που δημιουργούνται από τα υλικά διάβρωσής τους. Ο ηπειρωτικός φλοιός της εφιππεύουσας πλάκας που διαβρώνεται συνεχώς, εμφανίζει στην επιφάνεια όλο και βαθύτερα στρώματα και έτσι βλέπουμε μεταμορφωμένα πετρώματα υψηλής πίεσης - χαμηλής θερμοκρασίας ή ακόμα και πετρώματα που προέρχονται από το μανδύα .

Οι μόλασσες σχηματίζονται σε δύο τεκτονικές τάφρους με διεύθυνση παράλληλη προς τη γραμμή της οροσειράς. Η εξωτερική μολασσική τάφρος τοποθετείται πάνω στην παλαιά βυθιζόμενη πλάκα, ενώ η εσωτερική μολασσική τάφρος πάνω στην εφιππεύουσα πλάκα, πέρα από τις ζώνες της αλληλοεπικάλυψης του φλοιού (Εικ. 7.7). Τα κανονικά ρήγματα που οριοθετούν τις τάφρους οφείλονται σε δύο αιτίες: (i) στην ανύψωση του ηπειρωτικού υποβάθρου (ισοστασία) και (ii) στην καθίζηση των μολασσικών λεκανών λόγω του βάρους των ιζημάτων τους. Είναι όμως πιθανόν ένα μεγάλο μέρος των ρηγμάτων να οφείλεται σε ένα εφελκυσμό του φλοιού, ιδιαίτερα στην εξωτερική μολασσική τάφρο, που μπορεί να πλησιάζει τις τεκτονικές τάφρους που εμφανίζονται πάνω στην πλευρά μιας περιθωριακής λεκάνης και που η βυθιζόμενη πλάκα κάμπτεται για να χωθεί κάτω από την εφιππεύουσα πλάκα.

Ορογενετικές Αλυσίδες που Σχετίζονται με τη Σύγκρουση

Παρότι η ανατομία των ορογενετικών ζωνών και η δομή των κυριότερων ορογενετικών αλυσίδων περιγράφονται με λεπτομέρεια σε επόμενα κεφάλαια (Κεφάλαια 9 και 11), στο σημείο αυτό γίνεται μια σύντομη αναφορά στους τύπους των ορογενετικών αλυσίδων που δημιουργούνται από τη σύγκρουση, δεδομένου ότι αποτελούν τις πιο εντυπωσιακές και χαρακτηριστικές περιπτώσεις. Ορογενετικές ζώνες που έχουν σχηματισθεί από σύγκρουση παρατηρούνται σε διάφορα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα, ανάλογα με το αν οι ζώνες συρραφής (suture zones) φέρνουν σε επαφή πρώην ηπειρωτικά περιθώρια ή υπολείμματα νησιωτικών τόξων.

Η σύγκρουση δύο νησιωτικών τόξων (βλπ. Εικ. 7.3D και Εικ. 7.3G), οδηγεί στη δημιουργία μιας ενδο-ωκεανικής ορογενετικής αλυσίδας (intra-oceanic fold mountain chain). Εντυπωσιακό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης αποτελεί η Molucca Sea στην Ινδονησία (ράχη Talang-Mayu).

Η σύγκρουση ανάμεσα σε ένα νησιωτικό τόξο και ένα ηπειρωτικό περιθώριο (βλπ. Εικ. 7.3B, Εικ. 7.3C και Εικ. 7.3F), οδηγεί στη δημιουργία μιας ορογενετικής αλυσίδας που αναπτύσσεται κατά μήκος του ηπειρωτικού περιθωρίου. Σε αντίστοιχη θέση δημιουργούνται και οι οροσειρές από υποβύθιση, αλλά με εντελώς διαφορετικά γεωλογικά χαρακτηριστικά. Ενδεχόμενο παράδειγμα αυτής της περίπτωσης η οροσειρά της Καλλιφόρνιας.

Τέλος η σύγκρουση ανάμεσα σε δύο ηπειρωτικά περιθώρια (δηλαδή σύγκρουση ηπείρου με ήπειρο, βλπ. Εικ. 7.3A, 7.3E και Εικ. 7.7), δημιουργεί ορογενετικές αλυσίδες που αναπτύσσονται στη ζώνη συρραφής ανάμεσα σε δύο πλάκες, που στο εφεξής συνενώθηκαν σε μια κοινή πλάκα. Οι ορογενετικές αλυσίδες που διασχίζουν τις ηπείρους, όπως τα Ιμαλάϊα και οι Άλπεις, ανήκουν σε αυτή την περίπτωση.

Μετά την παράθεση των γενικών στοιχείων για το φαινόμενο της σύγκρουσης, θα παρουσιασθούν, αρχικά, περιοχές που σήμερα το φαινόμενο αυτό βρίσκεται σε εξέλιξη και η γεωμετρία και κινηματική του συστήματος είναι σχετικά εύκολο να προσδιορισθεί από τα γεωλογικά δεδομένα. Στη συνέχεια θα γίνει μια σύντομη ανασκόπηση μοντέλων για την τεκτονική της σύγκρουσης, που θα συνοδεύονται και από γεωλογικά παραδείγματα. Θα παρουσιασθούν επίσης σημαντικά θέματα, όπως: η δημιουργία των ριζών των οροσειρών, μοντέλα για την τοποθέτηση των οφιολίθων και οι ζώνες συρραφής (suture zones), που αντιπροσωπεύουν περιοχές παλαιών ωκεανών, που η σημερινή ερμηνεία της θέσης τους προϋποθέτει την ύπαρξη παλαιών ζωνών σύγκρουσης.

7.2 Σύγρουση Τόξου–Ηπείρου και Τόξου–Τόξου. Η Περιοχή του ΝΔ Ειρηνικού

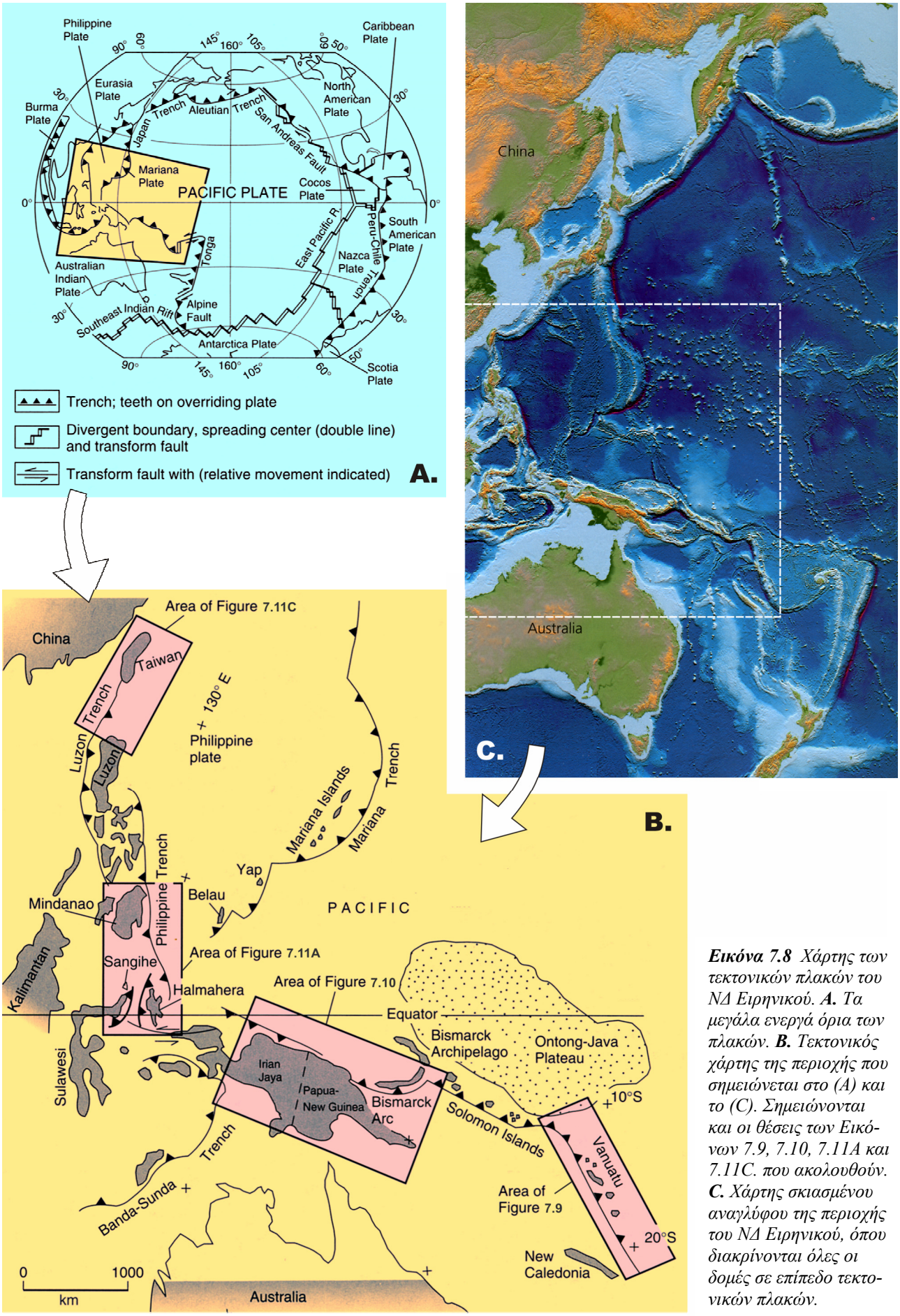
Ο ΝΔ Ειρηνικός (Εικ. 7.8), αντιπροσωπεύει μια περιοχή όπου λαμβάνει χώρα μια σύνθετη αλληλεπίδραση ανάμεσα σε τρεις μεγάλες λιθοσφαιρικές πλάκες: την πλάκα του Ειρηνικού Ωκεανού, την πλάκα Αυστραλίας-Ινδίας και την Ευρασιατική πλάκα. Αυτές οι πλάκες, σε γενικές γραμμές, χαρακτηρίζονται από αναλισκόμενα περιθώρια, κατά μήκος των κοινών περιθωρίων τους. Επιπρόσθετα, στην ίδια περιοχή υπάρχει και η ενδιαμέσου μεγέθους πλάκα των Φιλιππίνων, καθώς και αρκετές άλλες μικρότερες. Επίσης στην ίδια περιοχή εντοπίζονται δύο μεγάλα σημεία τριπλής συμβολής (triple junctions), του τύπου TTT (trench-trench-trench, τάφρος-τάφρος-τάφρος, βλπ. και Κεφ. 3.3), που εμπλέκουν το μεν ένα τα όρια ανάμεσα στις πλάκες Αυστραλίας-Ινδίας, Ειρηνικού και Ευρασίας, το δε άλλο τα όρια ανάμεσα στην Ευρασιατική πλάκα, την πλάκα των Φιλιππίνων και την πλάκα του Ειρηνικού. Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφησαν ορισμένα χαρακτηριστικά από τα συστήματα νησιωτικών τόξων που εξελίσσονται στην περιοχή. Στο κεφάλαιο αυτό, θα περιγραφεί με περισσότερη λεπτομέρεια η πολυπλοκότητα των ζωνών σύγκλισης και των διαδικασιών σύγκρουσης, που λαμβάνουν χώρα στις περιοχές αυτές.

Η τράπεζα (plateau) Ontong-Java, που βρίσκεται ΒΑ της Αυστραλίας, είναι ένα ωκεάνιο πλατώ με πάχος ηπειρωτικού φλοιού, που τώρα κάθεται πάνω στην εφιππεύουσα πλάκα του τόξου Vanuatu – Solomon Islands (Εικ. 7.8 και 7.9). Οι γεωλογικές ενδείξεις, ωστόσο, υποστηρίζουν ότι πριν από το Πλειόκαινο, η πλάκα του Ειρηνικού, μεταφέροντας το πλατώ υποβυθιζόταν προς τα ΝΔ. Το πλατώ συγκρούστηκε με την υποβυθιζόμενη ζώνη, με αποτέλεσμα την αλλαγή της πολικότητας της ζώνης υποβύθισης (βλπ. Εικ. 7.3B).

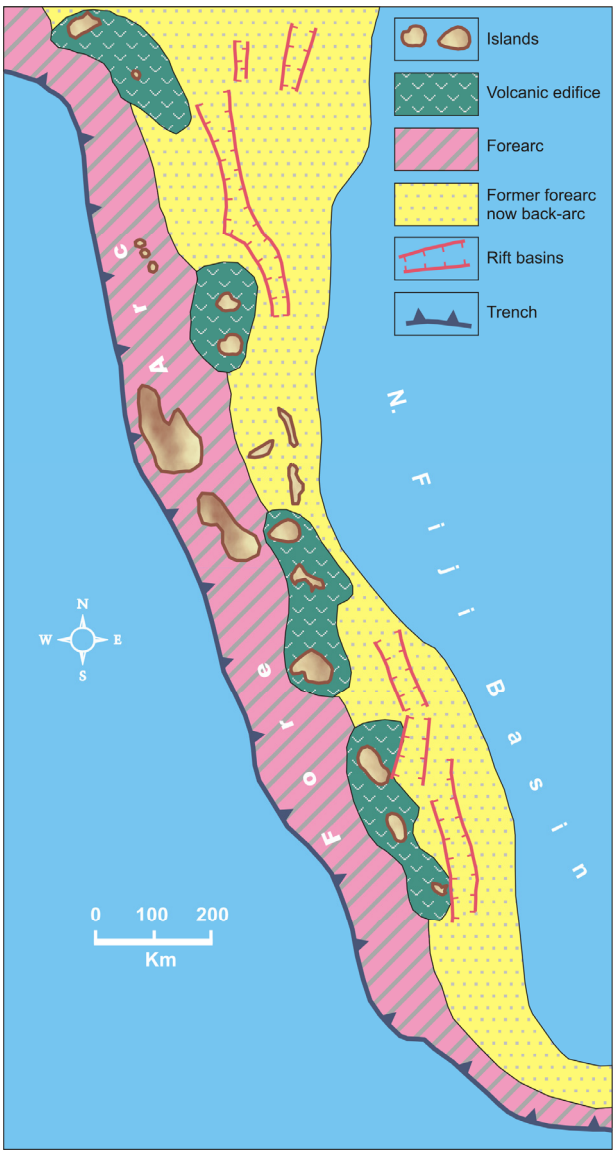
Ο χάρτης του τόξου Vanuatu (Εικ. 7.9) δείχνει ότι η περιοχή του πρώην εμπροσθο-τόξου (forearc) αντιπροσωπεύει τώρα ένα οπισθο-τόξο (back-arc) στο οποίο μικρές ρηξιγενείς λεκάνες αναπτύσσονται. Η τάφρος αναπτύσσεται προς τα δυτικά. Η σεισμικότητα κάτω από αυτό το τόξο είναι ασυνεχής, με μια βαθειά ζώνη σεισμών με κλίση προς τα ΝΔ και μια ρηχή ζώνη σεισμών με κλίση προς τα ΒΑ (βλπ. Εικ. 6.11 στο προηγούμενο Κεφάλαιο και Εικ. 7.3B).

Μια άλλη σύγκρουση λαμβάνει χώρα σήμερα κατά μήκος των βόρειων παρυφών της Αυστραλίας, στη Νέα Γουινέα, ανάμεσα στα τόξα Banda και Bismark (Εικ. 7.8 και 7.10). Στην περίπτωση αυτή, όμως, το βόρειο παθητικό περιθώριο της ηπείρου της Αυστραλίας βυθίζεται κάτω από την πλάκα του Ειρηνικού, κατά μήκος μια ζώνης υποβύθισης που κλίνει προς Βορρά. Στα δυτικά στην Irian Jaya (δυτική Νέα Γουϊνέα), η διαδικασία της υποβύθισης είναι πιο προχωρημένη και η πολικότητα της υποβύθισης έχει αλλάξει έτσι ώστε βόρεια από την Iria Jaya η κατερχόμενη πλάκα κλίνει προς Νότο (δηλαδή η ασυμμετρία της υποβύθισης είναι προς Βορρά –north-vergent–), κάτω από τη ζώνη σύγκρουσης (Εικ. 7.10 σε σύγκριση με την Εικ. 7.3B).

Κατά μήκος του ανατολικού τμήματος της ζώνης σύγκρουσης, μια ενεργή ζώνη πτυχών και επωθήσεων (fold and thrust belt) με ασυμμετρία προς Νότο (south-vergent), αναπτύσσεται προς τα νότια προς την ακτογραμμή της Αυστραλίας (Εικ. 7.10). Οι παρυφές της ηπειρωτικής μάζας της Αυστραλίας, που απαρτίζονται από μεταμορφωμένα πετρώματα και παραμορφωμένα ιζήματα παθητικού περιθωρίου, επωθούνται προς τα πίσω πάνω στην ήπειρο, με ένα σύστημα τεκτονικών λεπών

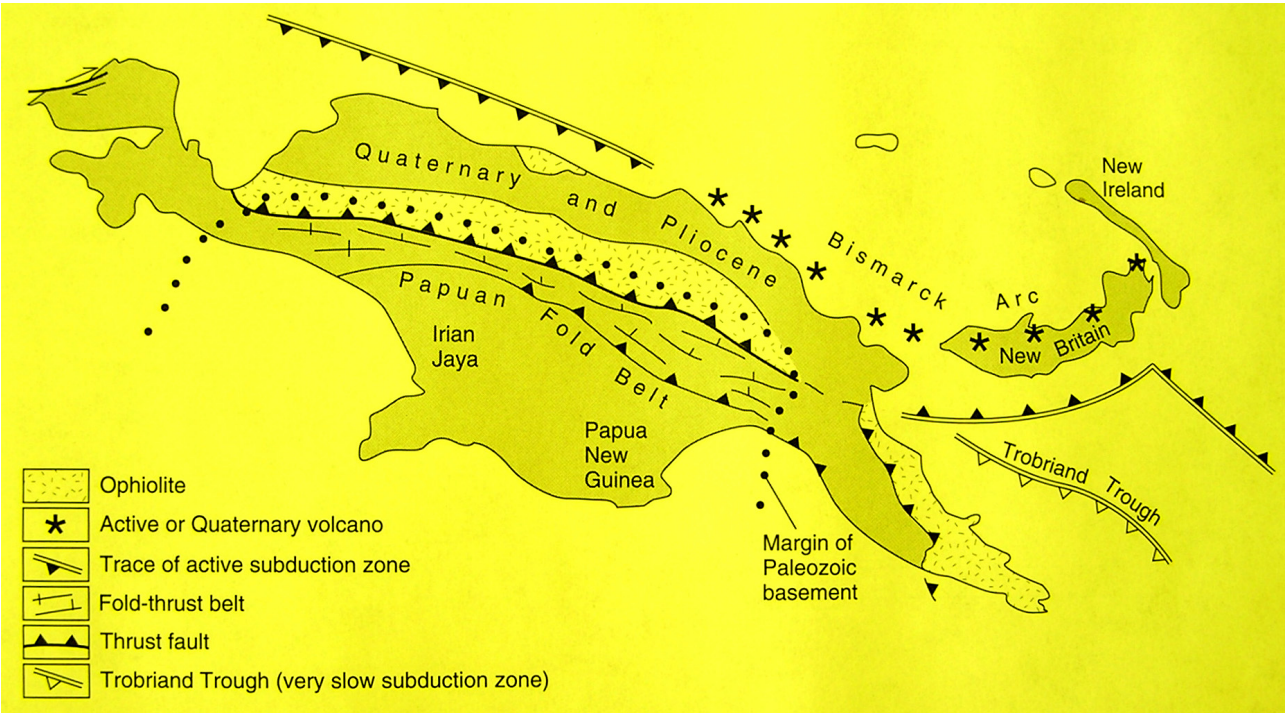


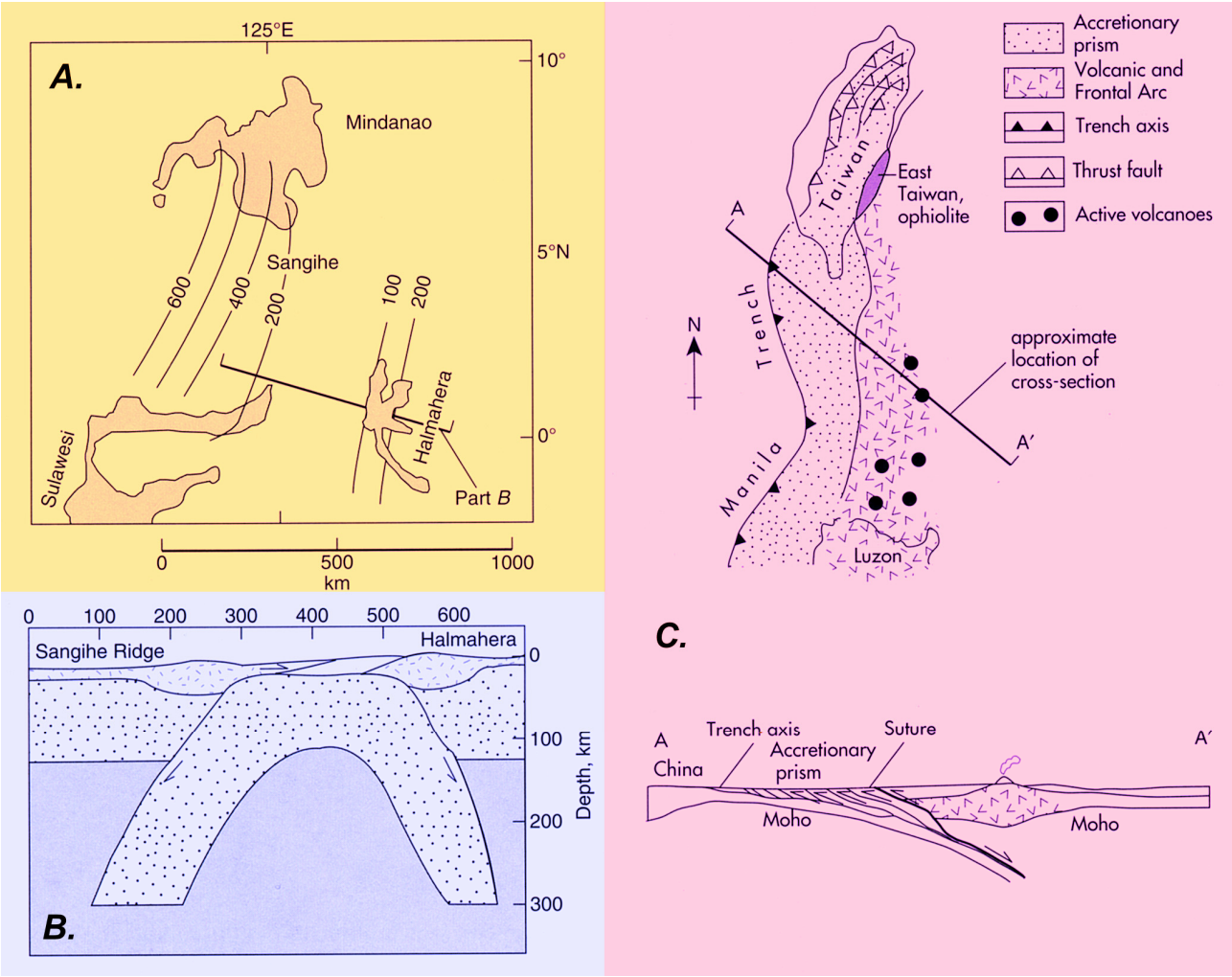
Εικόνα 7.8 *Χάρτης των τεκτονικών πλακών του ΝΔ Ειρηνικού.* ***Α.*** *Τα μεγάλα ενεργά όρια των πλακών.* ***Β.*** *Τεκτονικός χάρτης της περιοχής που σημειώνεται στο (Α) και το (C). Σημειώνονται και οι θέσεις των Εικόνων 7.9, 7.10, 7.11Α και 7.11C. που ακολουθούν.* ***C.*** *Χάρτης σκιασμένου αναγλύφου της περιοχής του ΝΔ Ειρηνικού, όπου διακρίνονται όλες οι δομές σε επίπεδο τεκτονικών πλακών.*



Εικόνα 7.9 *Απλοποιημένος τεκτονικός χάρτης του τόξου Vanuatu του νοτιοδυτικού Ειρηνικού, όπου η πολικότητα της ζώνης υποβύθισης έχει αναστραφεί.*

Εικόνα 7.10 *Απλοποιημένος τεκτονικός χάρτης της περιοχής της Νέας Γουϊνέας, όπου παρουσιάζονται τα μεγάλα όρια των πλακών, η ζώνη πτυχών Papua, το περιθώριο της Αυστραλίας, τα οφιολιθικά συμπλέγματα και τα τεταρτογενή ηφαιστειακά. Η συνεχιζόμενη σύγκρουση συνοδεύεται από μια αναστροφή στην πολικότητα της υποβύθισης. Η Νέα Γουϊνέα είναι χωρισμένη, από πολιτική άποψη, στην Irian Jaya στα δυτικά και στην Παπούα – Νέα Γουϊνέα στα ανατολικά, όπως φαίνεται στην Εικ. 7.8.*





Εικόνα 7.11 *Η σύγκρουση στην περιοχή Ινδονησίας-Φιλιππίνων.* ***Α.*** *Τεκτονικός χάρτης της περιοχής Sagihe-Halmahera της Ινδονησίας, όπου λαμβάνει χώρα σύγκρουση τόξου-τόξου και ο οποίος παρουσιάζει τις ισοβαθείς καμπύλες της σεισμικής ζώνης (που δείχνουν την αντίθετη κλίση των ζωνών υποβύθισης) και τη θέση της τομής του επόμενου σχήματος (Β).* ***Β.*** *Μοντέλο της δομής του φλοιού της ζώνης σύγκρουσης. Επισημαίνεται ότι το δυτικό τόξο επωθείται πάνω στο ανατολικό.* ***C.*** *Τεκτονικός χάρτης και τομή από την περιοχή της Ταϊβάν στην Ασία. Ο χάρτης παρουσιάζει το δυτικό μη-ηφαιστειακό τόξο και το ανατολικό ηφαιστειακό τόξο, καθώς και τα μεγάλα σύγχρονα ενεργά ρήγματα.*

και ολισθήσεων (imbrigate thrust slices), που με τη σειρά του καλύπτεται τεκτονικά από τα βόρεια από ένα σύστημα οφιολιθικών πετρωμάτων. Οι οφιόλιθοι αυτοί αποτελούσαν τμήμα του νησιωτικού τόξου που βρίσκονταν από πάνω από την, προς Βορρά κλίνουσα, ζώνη υποβύθισης και το οποίο επωθήθηκε πάνω στην Αυστραλιανή ήπειρο, όταν αυτή συγκρούσθηκε με τη ζώνη υποβύθισης. Το αρχικό τόξο είναι ακόμα ενεργό ανατολικά από τη ζώνη σύγκρουσης, στο τόξο Bismarck της Νέας Βρετανίας και Νέας Ιρλανδίας. Ως εκ τούτου λοιπόν, η ζώνη συρραφής (suture) ανάμεσα στις δύο πλάκες, κείται περίπου στη βάση των οφιολίθων.

Το τόξο Banda βρίσκεται ΝΔ από τη Νέα Γουινέα, όπου το παθητικό ηπειρωτικό περιθώριο της Αυστραλίας υποβυθίζεται κάτω από την πλάκα της Ασίας (Εικ. 7.8 σε σύγκριση με την Εικ. 7.3Β). Στις ΒΑ απολήξεις του τόξου Banda, η ενεργή ζώνη υποβύθισης καμπυλώνεται κάνοντας μια στροφή περίπου 180^0. Αυτή η μορφή μπορεί να έχει προκύψει από πτύχωση των πλακών στη ζώνη όπου εντοπίζεται αυτή η πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ τους, καθώς το ηπειρωτικό περιθώριο της Αυστραλίας συγκρούεται με τη ζώνη υποβύθισης.

Στην Ινδονησία, ανάμεσα στα νησιά Sangihe και Halmahera στον ισημερινό ΒΑ του Salawesi, δύο εμπροσθο-τόξα, που υπέρκεινται δύο ζωνών υποβύθισης με αντίθετες κλίσεις, συγκρούονται μεταξύ τους (Εικ. 7.11 σε σύγκριση με την Εικ. 7.3G). Η σύγκρουση εξαλείφει μια παρεντιθέμενη πλάκα και φέρνει δίπλα-δίπλα τις πλάκες του Ειρηνικού και της Ασίας. Η Εικόνα 7.11Α παρουσιάζει ένα χάρτη της περιοχής, καθώς και τη δομή (ισοβαθείς) των σεισμικών ζωνών. Η δυτική ζώνη

(Sangihe), κλίνει δυτικά και η ανατολική (Halmahera), ανατολικά. Η Εικόνα 7.11Β παρουσιάζει μια τομή από την ερμηνεία της δομής του φλοιού, που βασίζεται στη σεισμικότητα, τις βαρυτικές μετρήσεις και τη δειγματοληψία με βυθοκόρο. Τα μοντέλα της βαρύτητας υποστηρίζουν ότι το δυτικό εμπροσθο-τόξο έχει ξεκινήσει να επωθείται πάνω στο ανατολικό.

Στην Ταϊβάν, το παθητικό ηπειρωτικό περιθώριο της Κίνας συγκρούεται με τη ζώνη υποβύθισης της Μανίλας, που κλίνει προς τα ανατολικά. Η σύγκρουση καταδεικνύεται από την ενεργή ζώνη πτυχών και επωθήσεων (fold-and-thrust belt) της δυτικής Ταϊβάν, όπου τα ιζήματα του παθητικού ηπειρωτικού περιθωρίου της Κίνας, επωθούνται προς τα δυτικά πάνω από το προωθούμενο περιθώριο. Ένα οφιολιθικό σύμπλεγμα, που αποτελεί τμήμα του ηφαιστειακού τόξου που αναπτύσσεται πάνω από τη ζώνη υποβύθισης, έχει τοποθετηθεί τεκτονικά πάνω από τη ζώνη πτυχών και επωθήσεων στην ανατολική Ταϊβάν (Εικ. 7.11C). Σημειώνεται ότι η ζώνη συρραφής (suture), που καταδεικνύει το όριο ανάμεσα στις δύο πλάκες, βρίσκεται περίπου στη ζώνη επώθησης κάτω από τους οφιολίθους του ηφαιστειακού τόξου και όχι στο φυσικογεωγραφικό όριο του άξονα της τάφρου.

Από τη σύντομη περιγραφή των ενεργών γεωδυναμικών φαινομένων, που συνδέονται με την πολύπλοκη αλληλεπίδραση των πλακών στην περιοχή αυτή, γίνεται φανερό ότι υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι οι ζώνες πτυχών και επωθήσεων (fold-and-thrust belts), σχηματίζονται εκεί όπου ηπειρωτικά περιθώρια συγκρούονται με ζώνες υποβύθισης. Το σύστημα των επωθητικών ρηγμάτων που παρατηρείται μπορεί να ερμηνευθεί ως ένα σύστημα λεπιώσεων (imbricate set), που προκαλεί μια μεγάλη αποκόλληση, που τελικά είναι η ίδια η ζώνη υποβύθισης. Ως εκ τούτου λοιπόν όλη η γεωμετρία και ασυμμετρία των δομών αντανακλά την πολικότητα της υποβύθισης. Έχουν, επίσης, παρατηρηθεί περιπτώσεις όπου η τοποθέτηση ενός οφιολιθικού συμπλέγματος συμβαίνει όταν ένα παθητικό ηπειρωτικό περιθώριο υποβυθίζεται κάτω από ωκεάνιο φλοιό ή φλοιό νησιωτικού τόξου. Η βάση των οφιολίθων, ως εκ τούτου, πρέπει να είναι κοντά στην πραγματική ζώνη συρραφής, όπου οι δύο συγκρουόμενες πλάκες έρχονται δίπλα-δίπλα. Τα παραδείγματα που περιγράφησαν παρέχουν, επίσης, ενδείξεις ότι ο ηπειρωτικός φλοιός δεν μπορεί να υποβυθισθεί πολύ βαθειά, καθώς και ότι οι αναστροφές στην πολικότητα των ζωνών υποβύθισης αποτελούν ένα συνήθη τρόπο προσαρμογής της τεκτονικής των πλακών σε μια περίπτωση σύγκρουσης.

Επισημαίνεται, τέλος, ότι η περιοχή του ΝΔ Ειρηνικού χαρακτηρίζεται από την ακραία αυτή πολυπλοκότητα της γεωλογικής και τεκτονικής δομής, που παρατηρείται όταν λαμβάνουν χώρα πολλαπλές συγκρούσεις πλακών. Αυτή η πολυπλοκότητα μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτική για κάθε ζώνη σύγκρουσης, αποτελεί όμως ένα σημαντικό δεδομένο, που αντιτίθεται πολλές φορές σε απλουστευμένες ερμηνείες που δίνονται για παλιές ζώνες σύγκρουσης, όπου οι διαδικασίες που έχουν λάβει χώρα και σχετίζονται με τη λεπτομερή γεωλογική εικόνα της περιοχής, ούτε έχουν απόλυτα κατανοηθεί, αλλά και απέχουν σημαντικά από την πραγματικότητα.

7.3 Σύγρουση Ηπείρου με Ήπειρο. Το Σύστημα Άλπεων-Ιμαλαΐων

Το ορογενετικό σύστημα Άλπεων-Ιμαλαΐων αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες τεκτονικές δομές του πλανήτη και εκτείνεται από το Γιβραλτάρ στα δυτικά μέχρι και μετά την Ινδία στα ανατολικά (Εικ. 7.13). Στο σύστημα αυτό εμπλέκονται τέσσερις μεγάλες πλάκες σε κλίμακα ηπείρου (η Ευρασιατική, η Αφρικανική, η Αραβική και η Αυτραλο-Ινδική), τρεις μεγάλες θαλάσσιες λεκάνες με ωκεάνιο φλοιό (η ανατολική Μεσόγειος, η Μαύρη Θάλασσα και η Κασπία), τα υψηλότερα όρη του πλανήτη (Ιμαλάϊα) και αρκετά υψηλά πλατώ (Θιβέτ, Παμίρ, Τουρκο-Ιρανικό πλατώ κλπ.). Τα Ιμαλάϊα αποτελούν, όπως αναφέρθηκε, την υψηλότερη και εντυπωσιακότερη οροσειρά της Γης, γι' αυτό και αποκαλείται η "Στέγη του Κόσμου".

Στην Εικόνα 7.12 της επόμενης σελίδας παρουσιάζεται ένα δισέλιδο "αφιέρωμα" στην οροσειρά αυτή, όπου συνοπτικά περιγράφεται η σύγκρουση της Ινδίας με την Ασία και η δημιουργία των Ιμαλαΐων.

Η ενεργός τεκτονική κατά μήκος όλου του συστήματος Άλπεων-Ιμαλαΐων, παρέχει τα καλύτερα διαθέσιμα στοιχεία και δεδομένα για τη συμπεριφορά των ηπείρων που συγκρούονται. Ακόμα και οι ήπειροι που ήδη έχουν έρθει σε επαφή, συνεχίζουν να συγκλίνουν με έναν εντυπωσιακό ρυθμό, που κυμαίνεται από 1 cm/yr στα δυτικά έως 5 cm/yr στα ανατολικά, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 7.13.

Παρ' όλες τις ενδείξεις γι' αυτή τη γρήγορη σύγκλιση, πρακτικά όλα τα σεισμικά γεγονότα είναι σχετικά ρηχά. Σεισμοί σε βάθη μεγαλύτερα των 100 km, εντοπίζονται μόνο κάτω από την ανατολική Μεσόγειο, τη Ρουμανία, το Hindu-Kush και τη Βιρμανία (Burma, βλπ. Εικ. 6.11 στο προηγούμενο Κεφάλαιο 6.4). Σε αντίθεση με τις ζώνες σύγκλισης του περι-Ειρηνικού τόξου (circum-Pacific), δεν

Εικόνα 7.12

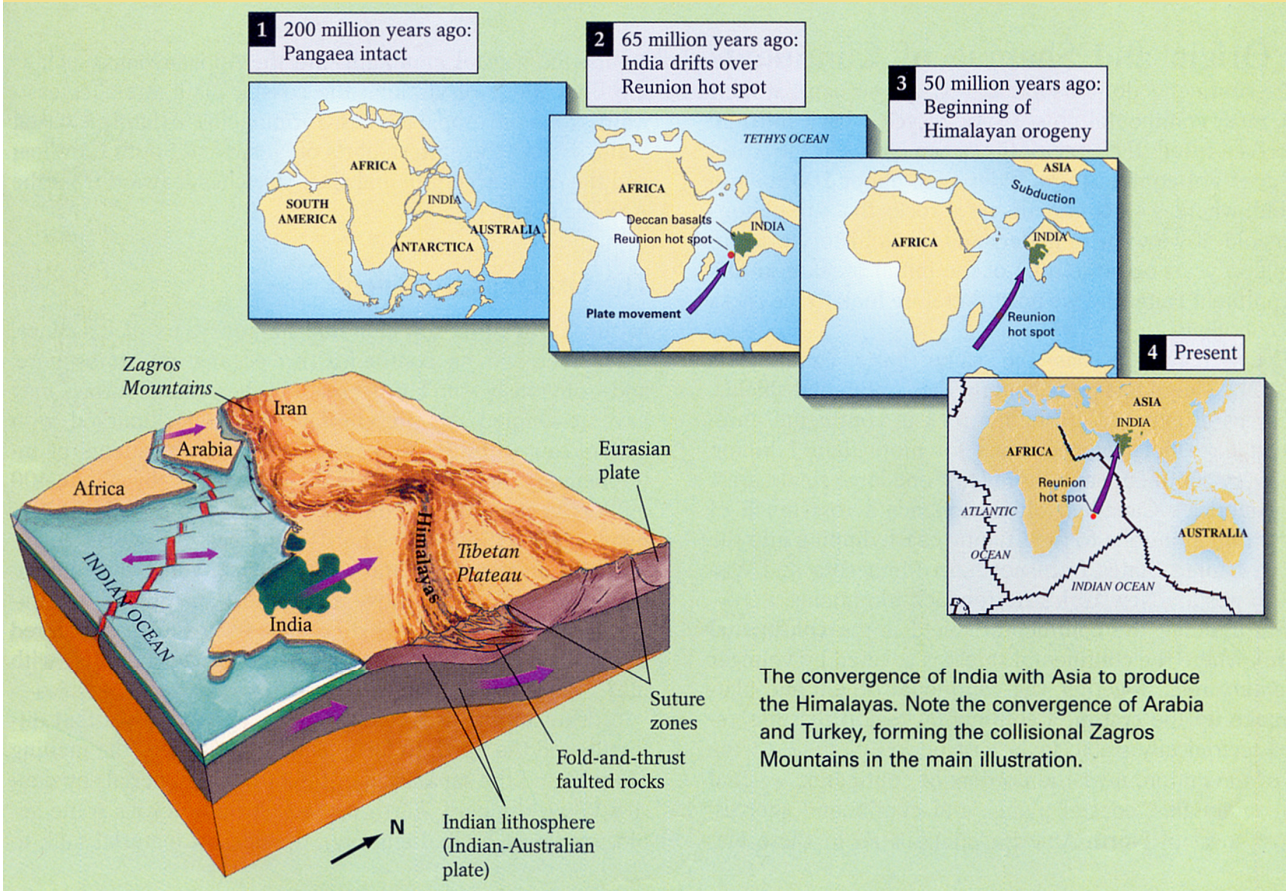
Ιμαλάϊα – Η Στέγη του Κόσμου

Η δημιουργία της οροσειράς των Ιμαλαΐων, που παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, προϋποθέτει τις διαδικασίες σύγκλισης (convergence), σύγκρουσης (collision) και συρραφής (suturing) της Ινδίας με την Ασία. Τα γεωδυναμικά αυτά φαινόμενα είχαν παγκόσμιες συνέπειες σε πολλά επίπεδα, όπως π.χ. πιστεύεται ότι πιθανά έδωσαν το έναυσμα της πιο πρόσφατης παγετώδους περιόδου. Η άνοδος και δημιουργία αυτής της οροσειράς άλλαξε με βεβαιότητα το κλίμα της Ασίας, αφού την απομόνωσε από του νότιους ωκεανούς.

Η διαδικασία που οδήγησε στην ορογένεση των Ιμαλαΐων ξεκίνησε κατά τη διάρκεια του Μεσοζωϊκού, όταν η Ινδία διαχωρίσθηκε από την υπερ-ήπειρο της Παγγαίας. Πριν από 180 εκ. έτη η Ινδία αποκόπηκε από την Παγγαία και ξεκίνησε να μετακινείται προς τα βόρεια. Ο ωκεανός της Τηθύος, που χώριζε την ήπειρο της Ινδίας από αυτήν της Ασίας, αναλισκόταν κατά μήκος μιας ζώνης υποβύθισης, νότια της Ασίας. Το πέρασμα της μετακινούμενης Ινδικής λιθόσφαιρας πάνω από τη σταθερή θερμή κηλίδα (hot spot), με την ονομασία Reunion, πριν από περίπου 65 εκ. έτη, προκάλεσε μια περίοδο έντονης ηφαιστειότητας, που σηματοδοτήθηκε από την έκχυση των εκτεταμένων βασαλτικών λαβών του Deccan. Σήμερα η θερμή κηλίδα Reunion, βρίσκεται περίπου 5.000 km ΝΔ της Ινδίας, στον Ινδικό ωκεανό.

Για τα επόμενα 15 εκ. έτη η Ινδία συνέχισε να κινείται με ταχύ ρυθμό προς τα βόρεια, καθώς η υποβύθιση κατά μήκος των νότιων παρυφών της Ασίας, συνεχιζόταν επίσης. Η σύγκρουση της Ινδίας με την Ασία ξεκίνησε περίπου 50 εκ. έτη πριν, όταν το βόρειο περιθώριο της Ινδίας συγκρούσθηκε με την μικρο-ήπειρο του Θιβέτ, αρχικά στα ΒΔ και περίπου 10 εκ. έτη αργότερα, στα ανατολικά. Κατά τα προηγούμενα 40 με 50 εκ. έτη, ιζήματα των παρυφών της πλάκας της Ινδίας και πρίσματα συσσώρευσης (accretionary wedges), ηφαιστειακά τόξα και βαθόλιθοι κατά μήκος των νότιων παρυφών της πλάκας της Ασίας, πτυχώθηκαν και επωθήθηκαν πάνω στις ηπείρους, σχηματίζοντας τη σύγχρονη ορογενετική αλυσίδα των Ιμαλαΐων.

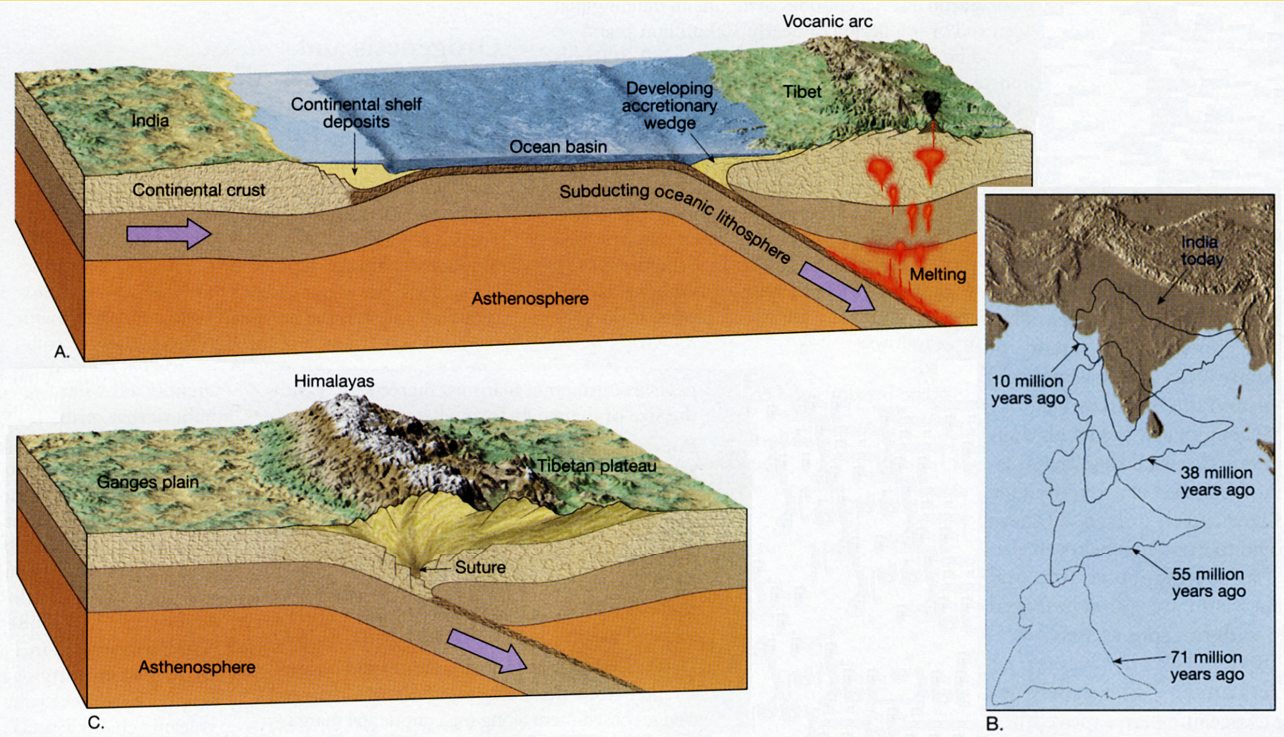
Η συνεχιζόμενη σύγκλιση της Ινδίας με την Ασία, είχε ως αποτέλεσμα επαναλαμβανόμενες επωθήσεις των παρυφών της πλάκας της Ινδίας, αυξάνοντας έτσι το πάχος του ηπειρωτικού φλοιού, ακριβώς κάτω από τα ανερχόμενα Ιμαλάϊα. Τη σημερινή μορφολογική έκφραση της αύξησης αυτής αποτελεί το υψίπεδο του Θιβέτ (Tibetan Plateau), που είναι το υψηλότερο του κόσμου. Αρκετές ζώνες συρραφής (suture zones), σηματοδοτούν το όριο ανάμεσα στις συγκρουσθείσες ηπείρους και ηπειρωτικά θραύσματα (continental fragments), που παγιδεύτηκαν ανάμεσα στη ζώνη σύγκρουσης. Η Ινδία συνεχίζει να κινείται προς την Ασία ακόμα και σήμερα με ένα ρυθμό που φθάνει τα 5 cm το χρόνο. Ένδειξη αυτής της συνεχιζόμενης σύγκλισης των πλακών αποτελούν, άλλωστε, οι συχνοί καταστροφικοί σεισμοί που πλήττουν την περιοχή αυτή.



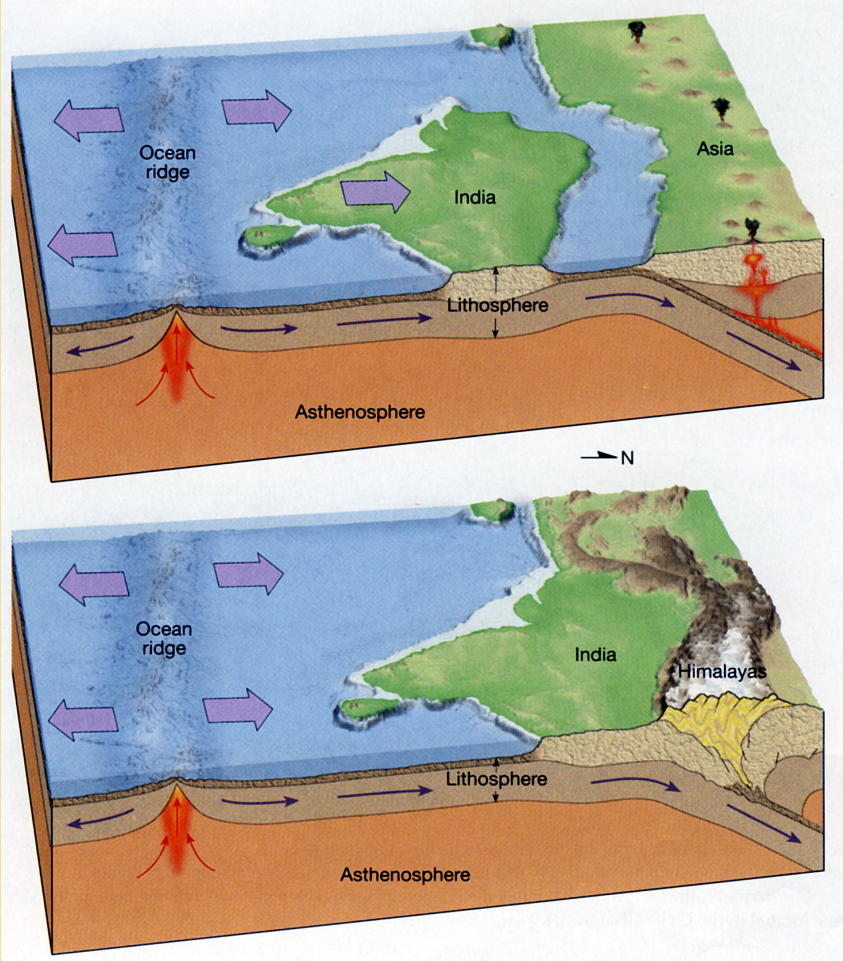
The convergence of India with Asia to produce the Himalayas. Note the convergence of Arabia and Turkey, forming the collisional Zagros Mountains in the main illustration.

…… συνέχεια από διπλανή σελίδα

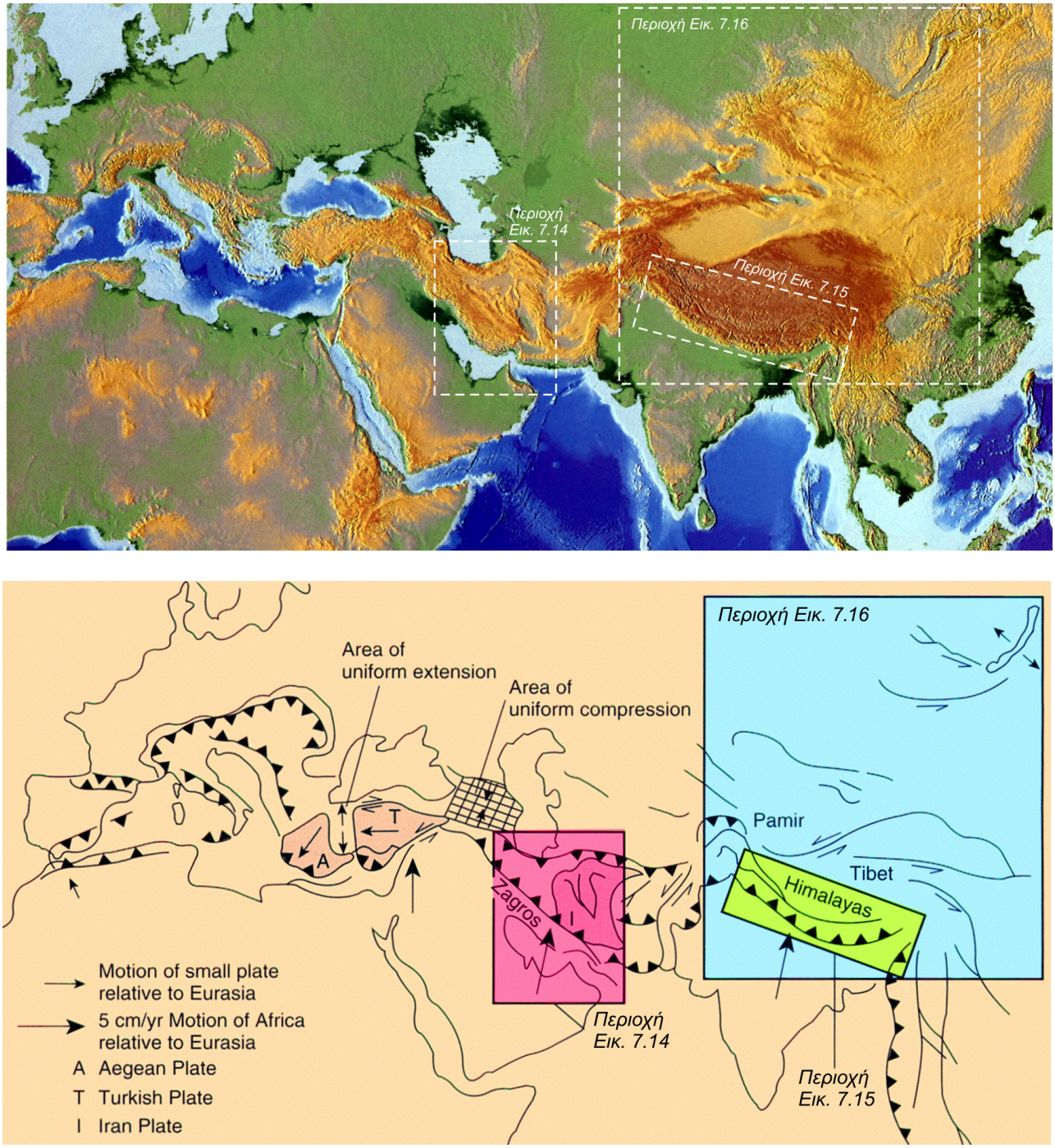
Τα Ιμαλάϊα στη Βιβλιογραφία



Σχηματικά διαγράμματα που παρουσιάζουν την προς Βορρά μετανάστευση της Ινδίας και τη σύγκρουση με την Ευρασιατική πλάκα. Α. Τα συγκλίνοντα περιθώρια δημιούργησαν μια ζώνη υποβύθισης και η μερική τήξη της υποβυθιζόμενης ωκεάνιας πλάκας ένα ηφαιστειακό τόξο. Ιζήματα που απορρίφθηκαν από την υποβυθιζόμενη πλάκα προστέθηκαν στο πρίσμα συσσώρευσης. Β. Η θέση της Ινδίας σε σχέση με την Ευρασία, σε διάφορες χρονικές περιόδους. C. Τελικά οι δύο ηπειρωτικές μάζες συγκρούσθηκαν παραμορφώνοντας και ανυψώνοντας το πρίσμα συσσώρευσης και τα ιζήματα της ηπειρωτικής κρηπίδας. Επιπρόσθετα τεμάχη του Ινδικού φλοιού, επωθήθηκαν πάνω στην πλάκα της Ινδίας.



Η διάνοιξη της μεσο-ωκεάνιας ράχης του Ινδικού ωκεανού μετακινεί προς Βορρά την Ινδία, που συγκρούεται με την Ασία δημιουργώντας τα μαγευτικά Ιμαλάϊα.



Εικόνα 7.13 *Χάρτης σκιασμένου αναγλύφου και απλοποιημένος τεκτονικός χάρτης του ορογενετικού συστήματος Άλπεων-Ιμαλαΐων όπου φαίνονται οι κύριες ζώνες των επωθήσεων και οι τρεις μικρότερες πλάκες: η πλάκα του Αιγαίου, η Ιρανική και η Τουρκική. Τα μικρά βέλη δείχνουν τη σχετική κίνηση κατά μήκος των ρηγμάτων ή την κίνηση των μικρών πλακών. Τα μεγάλα βέλη δείχνουν το συνολικό ρυθμό σύγκλισης της Ευρασίας σε σχέση με τις πλάκες της Αφρικής, της Αραβίας και της Ινδίας.*

είναι γνωστές συνεχείς σεισμικές ζώνες που να εκτείνονται από την επιφάνεια μέχρι βάθη μεγαλύτερα από 300 km.

Δύο τύποι σεισμικότητας έχουν παρατηρηθεί. Στον πρώτο τύπο τα σεισμικά γεγονότα κατανέμονται σε μια ζώνη ακριβώς κάτω από τη ζώνη σύγκρουσης ηπείρου με ήπειρο, όπως ακριβώς συμβαίνει στην περιοχή του Ζάγκρος στο Ιράν και στα Ιμαλάϊα. Στον δεύτερο τύπο τα σεισμικά γεγονότα χαρακτηρίζουν ρηχούς σεισμούς κατανεμημένους σε μια ευρεία περιοχή, όπως χαρακτηριστικά παρατηρείται στην κεντρική και ανατολική Ασία. Ακολουθεί μια σύντομη ανάλυση για κάθε μια από αυτές τις περιοχές.

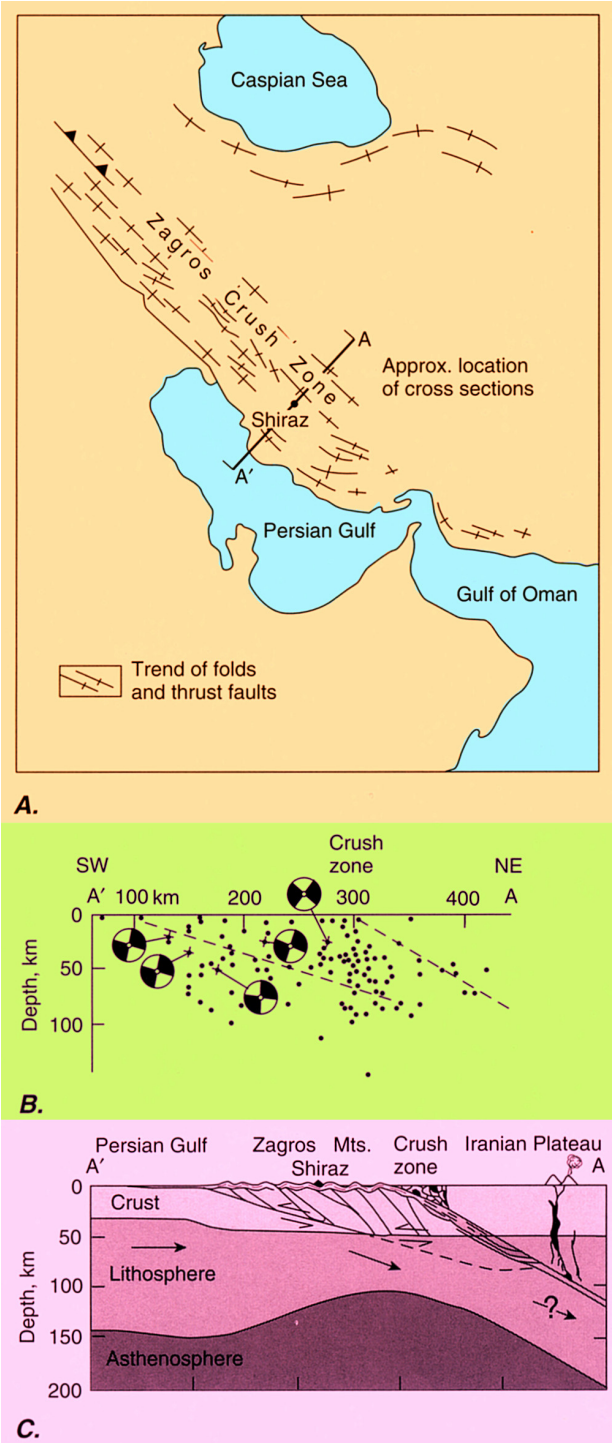
Εντοπισμένη Σεισμικότητα στις Ζώνες Σύγκρουσης: Η Περιοχή του Ζάγκρος

Στην περιοχή Ζάγκρος του ΝΔ Ιράν, το παθητικό ηπειρωτικό περιθώριο της Αραβικής πλάκας υποβυθίζεται κάτω από το ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο της πλάκας της Ασίας (Εικ. 7.14 σε σύγκριση με την Εικ. 7.3Α). Η κύρια ζώνη επώθησης, γνωστή με το όνομα Ζώνη Σύνθλιψης του Ζάγκρος (Zagros Crush Zone, Εικ. 7.14Α και 7.14Β), αποτελεί μια περιοχή έντονης παραμόρφωσης με επωθήσεις που κλίνουν προς τα ΒΑ (και άρα φορά κατάκλισης δομών προς τα ΝΔ). Στα ΝΔ της ζώνης αυτής στην εμπροσθο-χώρα (foreland), αναπτύσσεται μια πλατιά ενεργή ζώνη πτυχών και επωθήσεων (fold-and-thrust belt), με ενεργές δομές, όπως ισοκλινείς πτυχές και λεπιώσεις στα ανεστραμμένα σκέλη (folds and associated decollement-style thrusts).

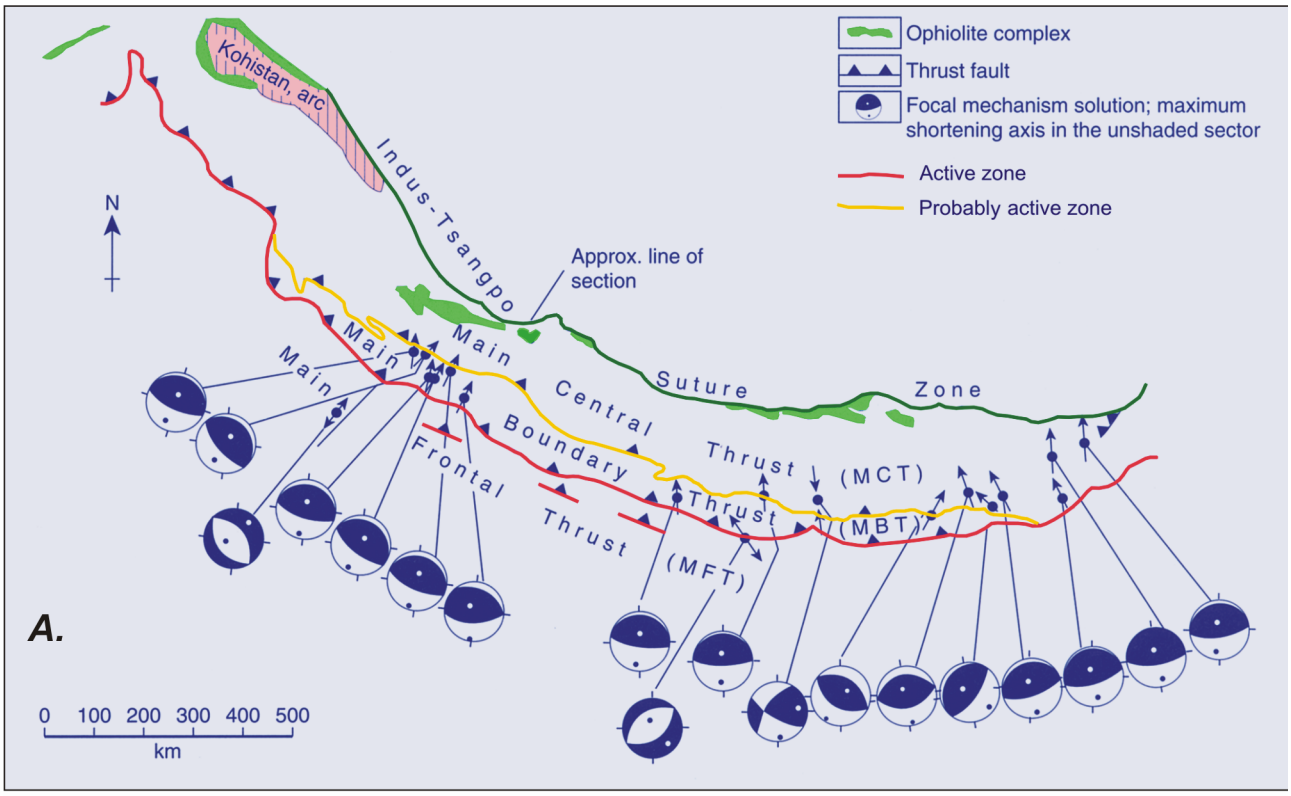
Τα σεισμικά γεγονότα είναι συγκεντρωμένα σε μια εκτεταμένη περιοχή, ακριβώς κάτω από τη ζώνη πτυχών και επωθήσεων, που περιλαμβάνει ένα σημαντικό τμήμα του μανδύα της λιθόσφαιρας (Εικ. 7.14Β). Μια καλά εκφρασμένη ζώνη Wadati-Benioff δεν υφίσταται. Η επίλυση των μηχανισμών γένεσης ενός αριθμού από αυτά τα σεισμικά γεγονότα, συμφωνεί με ανάστροφα ρήγματα (Εικ. 7.14C), δείχνοντας λέπτυνση τόσο του φλοιού, όσο και του μανδύα της λιθόσφαιρας.

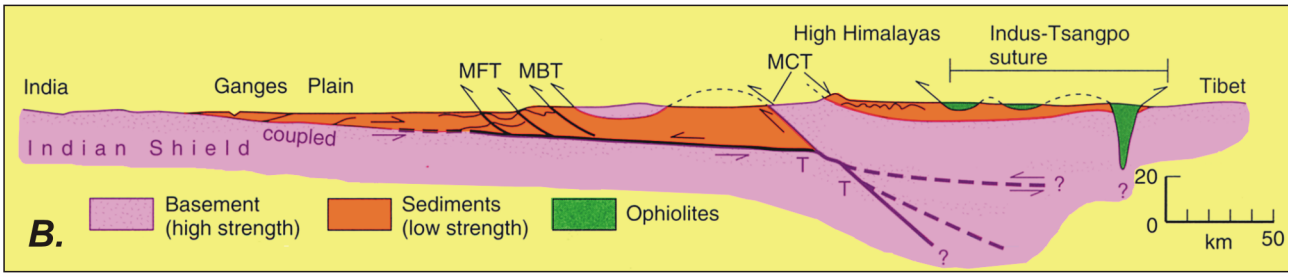
Η Σεισμικότητα των Ιμαλαΐων

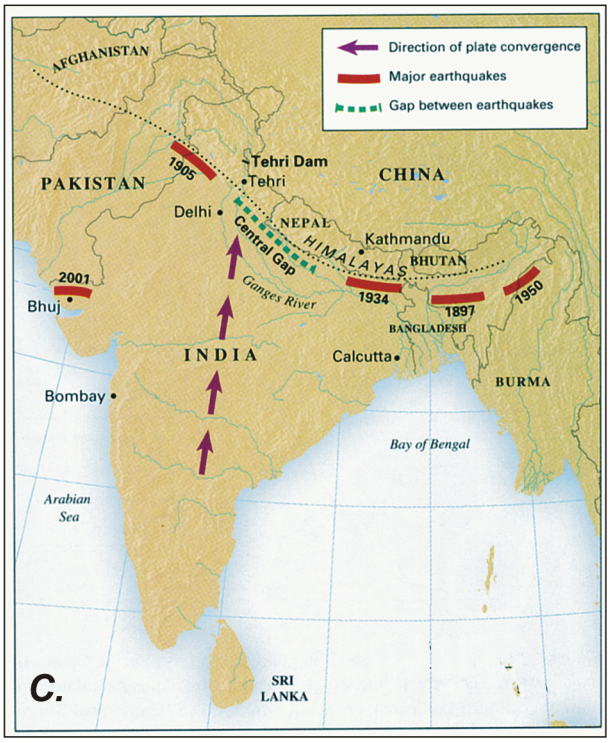
Η ορογενετική αλυσίδα των Ιμαλαΐων, η υψηλότερη του κόσμου, είναι ακόμα ενεργή και ανυψώνεται, καθώς η Ινδία συνεχίζει να κινείται προς Βορρά, κάτω από αυτή. Οι μεγάλες τεκτονικές δομές των Ιμαλαΐων περιλαμβάνουν: i) τη ζώνη συρραφής (suture zone), Indus-Tsangpo, που αντιπροσωπεύει τα υπολείμματα του ωκεανού που χώριζε την Ινδία από την Ασία, ii) την επώθηση Main Central Thrust (MCT, Εικ. 7.15Α και 7.15Β), που χαρακτηρίζεται από ασυμμετρία δομών προς Νότο και κατά μήκος της οποίας κρυσταλλικά πετρώματα από την κύρια περιοχή των υψηλών Ιμαλαΐων, τοποθετούνται τεκτονικά πάνω σε ιζηματογενείς ακολουθίες παλαιοζωϊκής και προκάμβριας ηλικίας, iii) την επώθηση Main Boundary Thrust (MBT, Εικ. 7.15Α και 7.15Β), που χαρακτηρίζεται από την ίδια ασυμμετρία δομών και κατά μήκος της οποίας ιζηματογενή πετρώματα του Παλαιοζωικού και του Προκάμβριου τοποθετούνται τεκτονικά πάνω από τα πλειο-τεταρτογενή ιζήματα του Siwalik, και iv) την Main Frontal Thrust (MFT, Εικ. 7.15Α και 7.12Β), που αντιπροσωπεύεται από μικρότερα επιμέρους επωθητικά ρήγματα, που τοποθετούν τα πλειο-τεταρτογενή ιζήματα του Siwalik πάνω στις

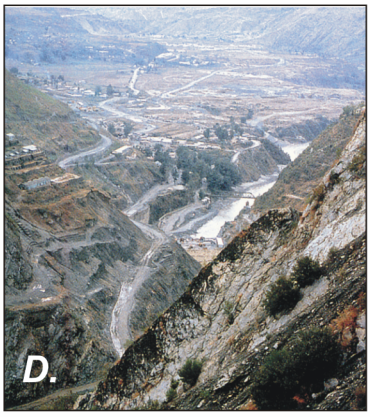


Εικόνα 7.14 *Η ζώνη σύγκρουσης του Ζάγκρος στο Ιράν.* ***Α.*** *Απλοποιημένος τεκτονικός χάρτης όπου παρουσιάζονται η κύρια ζώνη επώθησης, γνωστή ως Ζώνη Σύνθλιψης του Ζάγκρος (Zagros Crush Zone) και η πτυχωμένη και λεπιωμένη περιοχή των ορέων του Ζάγκρος.* ***Β.*** *Σεισμική τομή του νοτιοανατολικού Ιράν, όπου παρουσιάζονται η ζώνη σύνθλιψης με κλίση προς τα βορειοανατολικά, οι δευτερεύουσες επωθήσεις και οι μηχανισμοί γένεσης. Ο άξονας της μέγιστης λέπτυνσης (maximum shortening axis), διχοτομεί τα λευκά τεταρτημόρια. Τα όρια των τεταρτημορίων αποτελούν δυνητικά επίπεδα διάτμησης.* ***C.*** *Τεκτονική ερμηνεία της σεισμικής τομής.*









Εικόνα 7.15 *Τα Ιμαλάϊα.* ***Α.*** *Τεκτονικός χάρτης των Ιμαλαΐων που δείχνει τα κύρια επωθητικά ρήγματα, τη ζώνη συρραφής (suture), του Tsangpo, το νησιωτικό τόξο Kohistan ένα "παγιδευμένο" από την ορογένεση νησιωτικό τόξο, τις κύριες οφιολιθικές εμφανίσεις και τους μηχανισμούς γένεσης.* ***Β.*** *Τομή που παρουσιάζει τις περιοχές με ενεργές επωθήσεις. Η κλίση των επωθήσεων προς Βορρά είναι άγνωστη και έτσι παρουσιάζονται τρεις υποθέσεις. Η επέκταση της ζώνης Indus-Tsangpo στο βάθος είναι επίσης άγνωστη.* ***C.*** *Η περιοχή με το μεγαλύτερο σεισμικό κενό στην ενεργή ζώνη των Ιμαλαΐων, που λόγω της συνεχιζόμενης σύγκλισης μπορεί να καλυφθεί με ένα μεγάλο καταστροφικό σεισμό.* ***D.*** *Κατασκευή φράγματος στην επικίνδυνη ζώνη (φράγμα Tehri Dam, βόρεια Ινδία).*

πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις που αναπτύσσονται νοτιότερα. Η επώθηση Main Boundary Thrust είναι σήμερα ενεργή και για ορισμένους γεωλόγους επίσης ενεργή είναι και η Main Central Thrust.

Όλοι οι καταγεγραμμένοι σεισμοί ακριβώς από κάτω αλλά και στο μέτωπο των Ιμαλαΐων είναι ρηχοί, τοποθετούνται, σχεδόν στην πλειονότητά τους, μέσα στο φλοιό και οι μηχανισμοί γένεσης στη συντριπτική πλειοψηφία τους δείχνουν ανάστροφα ρήγματα (Εικ. 7.15A). Η θέση των σεισμών αυτών (τα υπόκεντρά τους) και οι εστιακοί μηχανισμοί, υποστηρίζουν ότι η Ινδία συνεχίζει να υποβυθίζεται κάτω από τα Ιμαλάϊα: i) κατά μήκος της Main Boundary Thrust, ii) κατά μήκος των ρηγμάτων της Main Frontal Thrust, iii) κατά μήκος μιας ή περισσοτέρων τυφλών επωθήσεων ακριβώς κάτω από το Ganges Plain και iv) πιθανά κατά μήκος της Main Central Thrust (Εικ. 7.15A και 7.15B). Δεδομένου ότι το σύνολο της σεισμικότητας αντιπροσωπεύεται από ρηχούς σεισμούς, η γεωμετρία των ρηγμάτων αυτών στο βάθος, προς Βορρά, δεν είναι ξεκάθαρη. Τρεις πιθανότητες παρουσιάζονται στην Εικ. 7.15B. Για τους ίδιους λόγους και η προέκταση της συρραφής Indus-Tsangpo στο βάθος δεν είναι γνωστή.

Επισημαίνεται ότι η ενεργή αυτή σεισμικότητα στην ευρύτερη περιοχή της ζώνης των Ιμαλαΐων συνδέεται με πολύ ισχυρούς καταστροφικούς σεισμούς (Εικ. 7.15C), οι οποίοι φυσικά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό όλων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων (μεγάλα τεχνικά έργα κλπ., Εικ. 7.15D).

Κατανεμημένη Σεισμικότητα στις Ζώνες Σύγκρουσης: Η Τεκτονική Δομή της Κεντρικής Ασίας και του Θιβέτ

Ο μηχανισμός των επωθήσεων, όπως αυτές που παρατηρούνται στα Ιμαλάϊα και το Ζάγκρο, θεωρείται από τους περισσότερους ως ο κύριος τύπος παραμόρφωσης στις ζώνες σύγκρουσης. Στο Θιβέτ και την κεντρική Ασία, ένα σημαντικό ποσοστό της παραμόρφωσης με επωθήσεις αντικατοπτρίζεται και από τα πολύ υψηλά υψόμετρα, κυρίως στα Ιμαλάϊα και το υψίπεδο του Θιβέτ, που με τη σειρά τους καταδεικνύουν ένα εξαιρετικά παχυμένο φλοιό (το πάχος του φλοιού μπορεί να υπολογισθεί με προσέγγιση πολλαπλασιάζοντας το υψόμετρο επί 10).

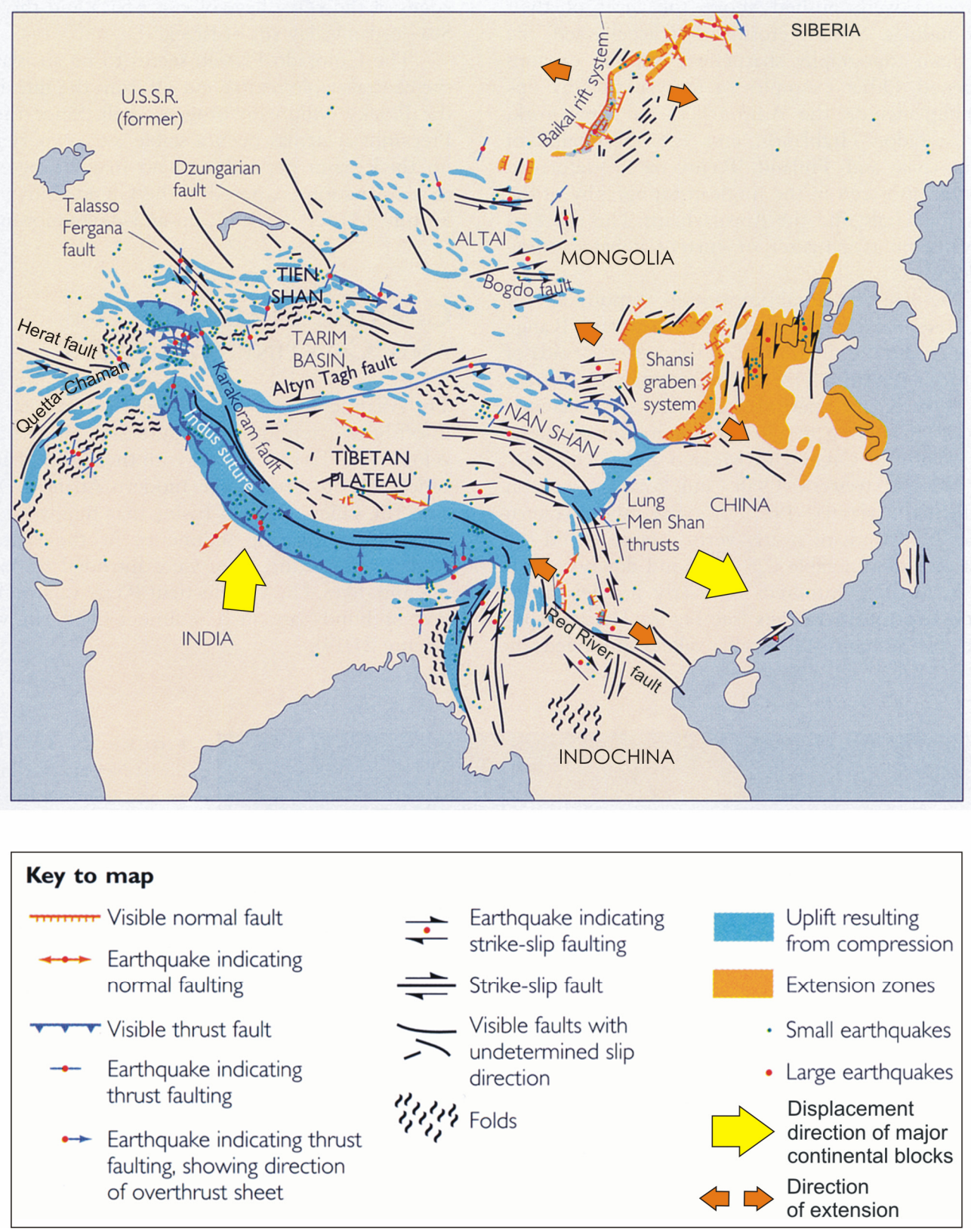
Τα δεδομένα όμως, από την περιοχή της Ασίας βόρεια από τα Ιμαλάϊα, παρουσιάζουν μια σημαντική διαφοροποίηση σχετικά με τον τύπο της παραμόρφωσης που περιγράφηκε πιο πάνω, δεδομένου ότι τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης φαίνεται να είναι πολύ πιο σημαντικά, απ' ότι μέχρι τώρα θεωρείτο για τις περισσότερες ζώνες σύγκρουσης. Στην Εικόνα 7.16 παρουσιάζεται ένας απλοποιημένος χάρτης των μεγαλύτερων τεκτονικών δομών της ανατολικής Ασίας. Η περιοχή κυριαρχείται από ένα πολύπλοκο σύστημα μεγάλης κλίμακας ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης, που διασχίζουν την ήπειρο από την περιοχή βόρεια από τα Ιμαλάϊα μέχρι τη Σιβηρία. Τα περισσότερα από τα ΒΔ-διεύθυνσης τέτοια ρήγματα στις περιοχές Tien Shan και Altai βόρεια από την Ινδία, είναι δεξιόστροφα και παρουσιάζουν μετατοπίσεις που δεν υπερβαίνουν τα 10 km. Αντίθετα, τα ανατολικής και ΝΑ-διεύθυνσης ρήγματα στην κεντρική και νότια Κίνα είναι κυρίως αριστερόστροφα και τα μεγαλύτερα από αυτά παρουσιάζουν μετακινήσεις που μπορεί να φθάνουν τις αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα. Η σημερινή κινηματική εικόνα του ρήγματος του Κόκκινου Ποταμού (Red River fault), δείχνει ότι είναι δεξιόστροφο, αν και τα δεδομένα δείχνουν ότι σχετικά πρόσφατα κυριαρχούσε η αντίθετη κίνηση, δηλαδή ήταν αριστερόστροφο.

Βόρεια και ανατολικά από την περιοχή των κυρίως Ιμαλαΐων, η σεισμική δραστηριότητα κατανέμεται για περίπου 3.000 km κατά πλάτος του Θιβέτ και της κεντρικής Ασίας (Εικ. 7.16). Οι σεισμοί δεν δείχνουν να επικρατεί κάποιος συγκεκριμένος τύπος εστιακού μηχανισμού, δεδομένου ότι αυτοί χαρακτηρίζουν τη συνύπαρξη κανονικών, ανάστροφων αλλά και οριζόντιας ολίσθησης ρηγμάτων. Παρ' όλα αυτά, σε όλες τις περιπτώσεις, ο κύριος οριζόντιος άξονας της βράχυνσης (shortening), παρουσιάζει μια αρκετά σταθερή διεύθυνση ανάμεσα στο Β-Ν και ΒΒΑ-ΝΝΔ, άσχετα με τον τύπο του ρήγματος. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι για το σύνολο της ηπείρου ο κύριος άξονα βράχυνσης είναι ομογενής κατά πλάτος μιας ζώνης αρκετών εκατοντάδων χιλιομέτρων.

Δεν υπάρχουν διακεκριμένα όρια πλακών στο μεγαλύτερο τμήμα της κεντρικής και ανατολικής Ασίας. Η ευρύτατα κατανεμημένη σεισμικότητα και η παραμόρφωση που σχετίζεται με τη σύγκρουση ηπείρου με ήπειρο, υποστηρίζουν ότι το μοντέλο της άκαμπτης κίνησης των πλακών είναι ακατάλληλο για τέτοιες περιοχές. Κάποια άλλα μοντέλα, λοιπόν, που να λαμβάνουν υπόψη τους και τη συμπεριφορά των πετρωμάτων, είναι απαραίτητα και αναπτύσσονται περιληπτικά στα επόμενα.

Οι Μικρότερες Πλάκες του Συστήματος Άλπεων-Ιμαλαΐων

Δυτικά από τα Ιμαλάϊα, το πρότυπο της κατανεμημένης σεισμικότητας, διαχωρίζεται σε αρκετές διακριτές και σεισμικά ήσυχες περιοχές, που αντιπροσωπεύονται από τις μικροπλάκες του Αιγαίου, της



Εικόνα 7.16 *Απλοποιημένος τεκτονικός χάρτης της κεντρικής και ανατολικής Ασίας, όπου παρουσιάζονται τα μεγάλα επωθητικά ρήγματα, τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και η φορά κίνησης, τα κανονικά ρήγματα, οι μικρού και μεγάλου μεγέθους σεισμοί και οι μηχανισμοί γένεσής τους, οι ζώνες συμπίεσης και εφελκυσμού (με τη διεύθυνση του εφελκυσμού) και η διεύθυνση μετακίνησης των μεγάλων ηπειρωτικών τεμαχών.*

Τουρκίας και του Ιράν. Τα δεδομένα από τους σεισμούς, στην ευρύτερη περιοχή και γύρω, από τις πλάκες του Αιγαίου και της Τουρκίας υποστηρίζουν ότι αυτές κινούνται, σε σχέση με την Ευρασία, η μεν πλάκα του Αιγαίου προς τα νοτιοδυτικά, η δε της Τουρκίας προς τα δυτικά. Ανάμεσα σε αυτές τις πλάκες, ζώνες ομοιόμορφης, Β-Ν, βράχυνσης, εντοπίζονται στον Καύκασο και ζώνες ομοιόμορφης έκτασης εντοπίζονται στην δυτική Ανατολία.

7.4 Μοντέλα της Παραμόρφωσης στις Ζώνες Σύγκρουσης

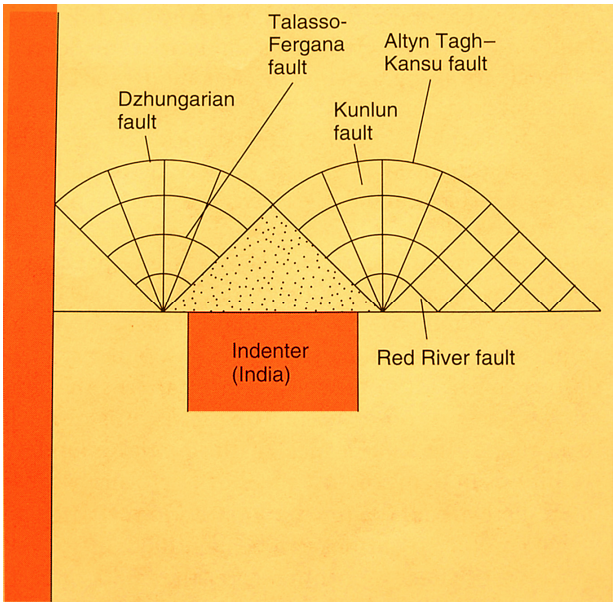
Το μοντέλο της άκαμπτης κίνησης των πλακών δεν μπορεί να εξηγήσει την κατανεμημένη παραμόρφωση που σχετίζεται με μια σύγκρουση ηπείρου με ήπειρο, και ως εκ τούτου θεωρείται ότι οι ήπειροι μπορούν να περιγραφούν ως ένα συνεχώς παραμορφωνόμενο υλικό. Για την κατανόηση της παραμόρφωσης αυτών των περιοχών, χρησιμοποιούνται η θεωρία του συνεχούς μέσου (continuum theory), μοντέλα υπό κλίμακα και αριθμητικά μοντέλα.

Στη συνέχεια θα ακολουθήσει μια απλή παράθεση κάποιων από τα μοντέλα αυτά, που σχετίζονται με τη σύγκρουση κατά μήκος τμημάτων της ζώνης Άλπεων-Ιμαλαΐων, και κυρίως της σύγκρουσης της Ινδίας με την Ασία. Δεν θα αναφερθούν λεπτομέρειες για τη θεωρία που στηρίζει τα μοντέλα αυτά, δεδομένου ότι δεν αποτελούν ύλη σε προπτυχιακό επίπεδο.

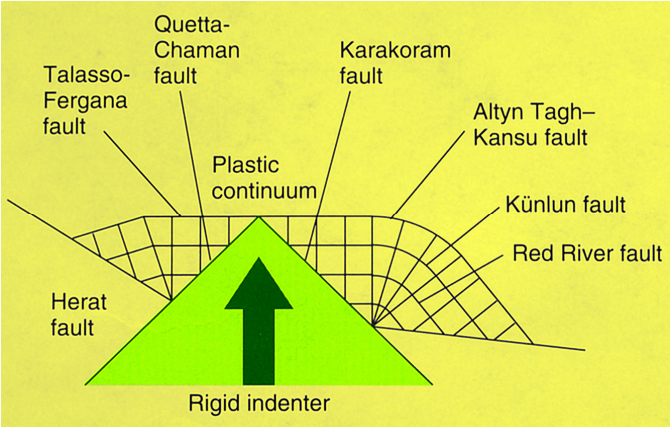
Πεδία Γραμμών Πλαστικής Ολίσθησης (Plastic Slip-Line Fields), ως Μοντέλα για την Τεκτονική της Ασίας

Η κίνηση κατά μήκος ενός ρήγματος χαρακτηρίζεται από μια ασυνέχεια στην κατανομή των ταχυτήτων εγκάρσια ως προς το ρήγμα. Συγκρίσιμες ασυνέχειες μπορούν να αναπτυχθούν σε ένα ομογενές, ισότροπο, άκαμπτο-πλαστικό υλικό, που υπόκειται σε επίπεδη παραμόρφωση και αυτός ο τύπος υλικού είναι, ως εκ τούτου κατάλληλος για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της λιθόσφαιρας της Γης. Από την ύλη της Τεκτονικής είναι γνωστό ότι οι συναρτήσεις που περιγράφουν τη άκαμπτη-πλαστική συμπεριφορά σε επίπεδη παραμόρφωση, αν συνδυασθούν με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, καταλήγουν σε μια υπερβολική διαφορική εξίσωση. Η επίλυση αυτής της εξίσωσης, προσδιορίζει δύο οικογένειες γραμμών, που καλούνται γραμμές ολίσθησης, εγκάρσια στις οποίες μπορούν να συμβούν ασυνέχειες της ταχύτητας. Τα χαρακτηριστικά, οι νόμοι και η σχέση των γραμμών αυτών με το ρυθμό παραμόρφωσης, όπως αναφέρθηκε, δεν αποτελούν στόχο της ύλης του βιβλίου αυτού.

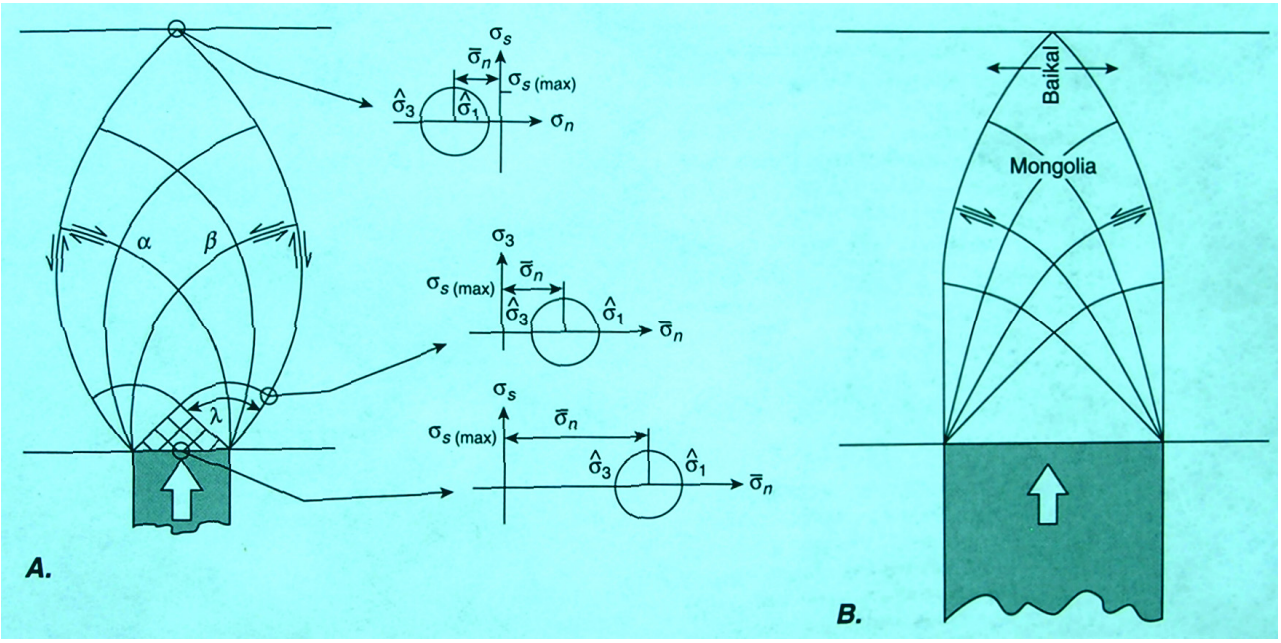
Τα ρήγματα της κεντρικής και ανατολικής Ασίας (Εικ. 7.16), θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως ένα σύστημα γραμμών ολίσθησης, που σχετίζονται με τη σύγκρουση της άκαμπτης ηπειρωτικής μάζας της Ινδίας, με την παραμορφώσιμη μάζα της νότιας Ασίας. Παρ' ότι τα πρότυπα των γραμμών ολίσθησης, στη θεωρητική έκφρασή τους, είναι συμμετρικά, τα ρήγματα στην Ασία δεν είναι σε καμία περίπτωση συμμετρικά γύρω από την Ινδία. Στην Εικόνα 7.17 απεικονίζεται ένα μοντέλο για τη νότια Ασία που περιλαμβάνει ένα συνδυασμό ενός άκαμπτου ορίου στα δυτικά, ενός απεριόριστου ορίου στα ανατολικά και ενός αχανούς έκτασης υλικού στα βόρεια. Το μοντέλο αυτό παράγει ένα πρότυπο γραμμών ολίσθησης, που θυμίζουν αρκετά κάποια από τα ρήγματα γύρω από την Ινδία, όπως τα ρήγματα: Talasso-Fergana, Dzhukgarian, Altyn Tagh-Kansu, Kunlum και red River (Εικ. 7.16). Στην Εικόνα 7.18, παρουσιάζεται ένα διαφορετικό μοντέλο, που αποτελείται από ένα γωνιώδη εμβολέα (indenter), δηλαδή ένα είδος εμβόλου που προσκρούει σε μια μη επίπεδη παρυφή μιας πλαστικής πλάκας. Το μοντέλο αυτό παράγει ένα πρότυπο γραμμών ολίσθησης, που θυμίζουν τα ρήγματα: Heart, Talasso-Fergana, Quetta-Chaman, Karakoram, Altyn Tagh-Kansu, Kunlum και red River (Εικ. 7.16).



Εικόνα 7.17 *Το πεδίο των γραμμών ολίσθησης (slip-line field), για έναν τετράγωνο εμβολέα (ή διεισδυτή – indenter), που προσκρούει στην επίπεδη επιφάνεια μιας πλαστικής πλάκας, με ένα άκαμπτο όριο που βρίσκεται σε απόσταση ίση με το μισό πλάτος του εμβόλου και μια απεριόριστου μεγέθους πλαστική πλάκα στα δεξιά. Ορισμένες από τις γραμμές ολίσθησης ονοματίζονται με τα ονόματα των ρηγμάτων της Εικόνας 7.16, με τα οποία μπορούν να συγκριθούν άμεσα.*



Εικόνα 7.18 *Πεδίο γραμμών ολίσθησης για ένα γωνιώδη εμβολέα (indenter), που προσκρούει σε ένα μη επίπεδο περιθώριο μιας πλαστικής πλάκας. Ορισμένες από τις γραμμές ολίσθησης αντιστοιχούν, πιθανά, σε κάποια από τα ρήγματα της Εικόνας 7.16.*



Εικόνα 7.19 *Το πρότυπο των γραμμών ολίσθησης όταν ο άκαμπτος εμβολέας προσκρούει σε μια πλαστική πλάκα που το πίσω όριό της είναι σταθερό και άκαμπτο και δεν υπόκειται σε διατμητικές τάσεις.* ***Α.*** *Εκτατικές τάσεις (tensile stresses) αναπτύσσονται κοντά στο πίσω σταθερό όριο. Τα όρια της πλάκας απέχουν 4,5 φορές το πλάτος του εμβολέα. Οι κύκλοι του Mohr παρουσιάζουν το μέγεθος των τάσεων σε διάφορα σημεία της πλάκας.* ***Β.*** *Τα όρια της πλάκας απέχουν λιγότερο από 2,5 φορές το πλάτος του εμβόλου. Ένας πιθανός συσχετισμός με τις τάφρους κατά μήκος της Βαϊκάλης στην κεντρική Ασία και ορισμένα ρήγματα της Μογγολίας παρουσιάζεται στο ίδιο σχήμα.*

Στη θέση της πλαστικής πλάκας με απεριόριστη έκταση, μπορεί να θεωρηθεί μια πλάκα της οποίας το πίσω όριο απέχει από τον εμβολέα, απόσταση ίση με μερικές φορές το πλάτος του εμβόλου (Εικ. 7.19). Εάν αυτό το όριο είναι σταθερό και δεν υπόκειται σε διατμητική τάση, τότε το πρότυπο του πεδίου των γραμμών ολίσθησης μεταβάλλεται αξιοσημείωτα. Πιο συγκεκριμένα, οι τάσεις κοντά στο πίσω όριο γίνονται εκτατικές (tensile), όπως φαίνεται από τους κύκλους του Mohr στην Εικόνα 7.19Α. Η περίπτωση αυτή εξηγεί την πιθανή προέλευση του συστήματος τάφρων της Βαϊκάλης στη Σιβηρία και έναν αριθμό ρηγμάτων της Μογγολίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.19Β (σε σύγκριση με την 7.13), αν και το καθεστώς που προβλέπει για το πίσω όριο το μοντέλο αυτό, δεν είναι ξεκάθαρες στην περιοχή της Βαϊκάλης.

Πέρα από τις ομοιότητες ανάμεσα στα θεωρητικά πρότυπα των γραμμών ολίσθησης και στο πρότυπο ρηγμάτων της κεντρικής και ανατολικής Ασίας, η αντιστοιχία δεν είναι φυσικά και η μοναδική. Διάφορα καθεστώτα απλών ορίων φαίνεται να ερμηνεύουν διαφορετικές πλευρές από τα παρατηρούμενα πρότυπα, αλλά το καθεστώς των πραγματικών ορίων πρέπει να είναι πιο σύνθετο από αυτό των μοντέλων που συζητήθηκαν. Συγκεκριμέ-

να, η θεωρία του πεδίου γραμμών πλαστικής ολίσθησης (plastic slip-line field theory), προϋποθέτει επίπεδη παραμόρφωση. Στην πράξη, δηλαδή, οι γραμμές ολίσθησης δεν είναι ένα χαρακτηριστικό της πλαστικής παραμόρφωσης στις τρεις διαστάσεις. Ως εκ τούτου λοιπόν η θεωρία αυτή δεν μπορεί να εξηγήσει την πάχυνση του φλοιού στο σύνολό της. Ακόμα περισσότερο, τα θεωρητικά μοντέλα έχουν εφαρμογή μόνο για την πρώτη μικρή επαύξηση της παραμόρφωσης. Μετά την παραμόρφωση του ορίου του πλαστικού στρώματος, το καθεστώς των ορίων που χρησιμοποιούνται από τη θεωρία δεν έχει πλέον εφαρμογή. Άρα λοιπόν η εξέλιξη του πεδίου των γραμμών ολίσθησης, για μια πεπερασμένη (τελική) παραμόρφωση (finite deformation), όπως αυτή που έχει συμβεί στην Ασία, δεν μπορεί να προσδιορισθεί μέσα από αυτή την προσέγγιση. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπερασθεί με τη χρήση πειραματικών μοντέλων ή τη χρήση αριθμητικών μοντέλων.

Ένα Μοντέλο από Πλαστελίνη για την Τεκτονική της Ασίας

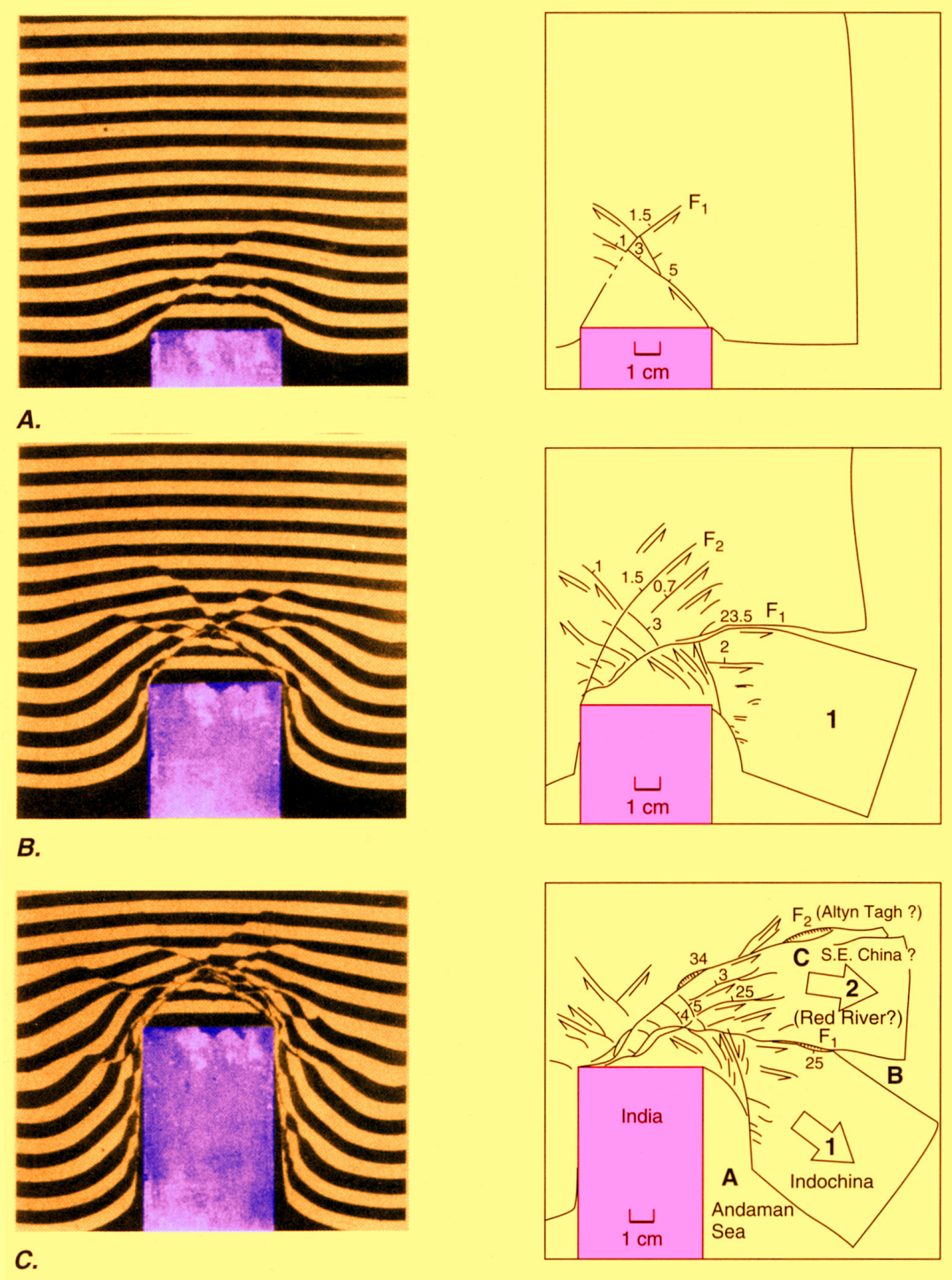
Η τεκτονική της κεντρικής και ανατολικής Ασίας, έχει επίσης μελετηθεί με τη χρήση πειραματικών μοντέλων υπό κλίμακα από πλαστελίνη, μια κατά προσέγγιση πλαστική ύλη. Το καθεστώς των ορίων περιλαμβάνει ένα άκαμπτο όριο στα αριστερά (δυτικά), ένα απεριόριστο όριο στα δεξιά (ανατολικά) και την επίδραση επίπεδης παραμόρφωσης (plain-strain deformation), που επιβάλλεται με τη χρήση λιπασμένων πλακών πάνω και κάτω από το στρώμα της πλαστελίνης. Το έμβολο προωθήθηκε σε αρκετή απόσταση μέσα στο στρώμα, ώστε να εξομοιωθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η πεπερασμένη (τελική) παραμόρφωση (finite deformation, Εικ. 7.20). Τα μικρορήγματα που αναπτύχθηκαν κατά το πείραμα αυτό, τόσο δεξιά όσο και αριστερά της κεντρικής διαχωριστικής γραμμής του εμβολέα, θυμίζουν τις διάφορες ομάδες των γραμμών ολίσθησης (slip-lines), των προηγούμενων μοντέλων. Μοναδική εξαίρεση στο πείραμα αποτελεί το γεγονός ότι ορισμένες γραμμές ολίσθησης στα δεξιά του εμβολέα, διατέμνουν μάλλον το απεριόριστο όριο παρά τις παρυφές του κάτω ορίου στο οποίο προσέκρουσε το έμβολο (σύγκριση Εικ. 7.17, 7.18 & 7.19 με την Εικ. 7.20).

Η ιστορία της ανάπτυξης των ρηγμάτων στην πλαστελίνη, καταδεικνύεται από τα τρία πλαίσια της Εικόνας 7.20, που αντιπροσωπεύουν τρία διαφορετικά στάδια του πειράματος. Το ρήγμα F_1, ξεκίνησε από την ασυνέχεια στην μετακίνηση της αριστερής γωνίας του εμβόλου (Εικ. 7.20Α). Ο περιορισμός που εξασκείται από τη μία μόνο μεριά (του άκαμπτου ορίου), και η πλαστική παραμόρφωση του στρώματος, οδηγούν σε περιστροφή και πλάτυνση (flattening) του ρήγματος, μέχρι ο προσανατολισμός του να γίνει τέτοιος που να μη μπορεί να λειτουργήσει (ολισθήσει) πλέον, οπότε και ένα νέο ρήγμα F_2 να δημιουργηθεί, ξεκινώντας από την αριστερή γωνία του εμβόλου (Εικ. 7.20Β). Θα μπορούσε κανείς να προμαντεύσει ότι αν η παραμόρφωση συνεχιζόταν, το ρήγμα F_2 θα είχε αντίστοιχη εξέλιξη με το F_1, μέχρι ένα τρίτο ρήγμα να δημιουργηθεί, ξεκινώντας και αυτό από την αριστερή γωνία του εμβολέα (indenter), για να προσαρμόσει όλο το σύστημα στη συνεχιζόμενη εξώθηση της πλαστελίνης από το μέτωπο του προελαύνοντος εμβόλου.

Το πεδίο γραμμών ολίσθησης (slip-line field), της Εικόνας 7.20, παρουσιάζει εντυπωσιακές ομοιότητες με το πρότυπο της τεκτονικής παραμόρφωσης της Ασίας. Μπορούν να γίνουν αρκετές αντιστοιχίσεις ανάμεσα στις δομές του πειραματικού μοντέλου και σε αυτές του χάρτη της Εικόνας 7.16. Τα ρήγματα F1 και F2 συσχετίζονται με τα ρήγματα Red River και Altyn Tag αντίστοιχα. Τα τεμάχη 1 και 2 του πειράματος αντιστοιχούν στα τεκτονικά τεμάχη της Ινδοκίνας και της ΝΑ Κίνας αντίστοιχα. Τα διάκενα που άνοιξαν στο πειραματικό μοντέλο στις Εικόνες 7.20Α, 7.20Β και 7.20C, αντιστοιχούν στις εφελκυστικές τεκτονικές δομές της θάλασσας του Adaman δυτικά της Ινδοκίνας, της θάλασσας της Νότιας Κίνας ανάμεσα στην Ινδοκίνα και την ΝΑ Κίνα και του Shansi στη ΒΑ Κίνα.

Η αντιστοίχηση της γεωμετρίας των δομών ανάμεσα στο μοντέλο και το πρωτότυπο είναι εντυπωσιακή, αλλά πάντα τίθεται το ερώτημα κατά πόσο ένα μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει τη συμπεριφορά της Γης. Γενικά έχει αποδειχθεί ότι τα μοντέλα υπό κλίμακα, από κινηματική, αλλά και πιθανώς από δυναμική άποψη, μπορούν να προσφέρουν μια ικανοποιητική προσομοίωση της Γης. Τα μοντέλα μπορούν να κάνουν πολύ συγκεκριμένες προβλέψεις σχετικά με το χρόνο, την εξέλιξη και τη συνολική μετακίνηση των ρηγμάτων και έτσι προβάλουν στοιχεία για περεταίρω γεωλογική έρευνα.

Αν και τα διαθέσιμα γεωλογικά στοιχεία είναι γενικά συσχετίσημα με το μοντέλο αυτό της πλαστελίνης, δεν μπορούν να απαντηθούν όλα τα ερωτήματα που τίθενται. Πρώτον, το μοντέλο αυτό θεωρεί την παραμόρφωση σε δύο διαστάσεις. Το μεγαλύτερο μέρος όμως της σύγχρονης παραμόρφωσης στην περιοχή των Ιμαλαΐων προϋποθέτει επωθητικά ρήγματα που ερμηνεύουν και την πάχυνση του φλοιού από τα Ιμαλάϊα και προς τα βόρεια. Αυτή η παραμόρφωση όμως δεν μπορεί να ερμηνευθεί από το οριζόντιο και επίπεδης παραμόρφωσης (plane-strain), καθεστώς που επιβάλλει το μοντέλο. Δεύτερον, δεν είναι ξεκάθαρο γιατί η μία ήπειρος



Εικόνα 7.20 *Πειραματική ανάπτυξη πεδίου γραμμών ολίσθησης (slip-line field), που παρουσιάζεται σε μια πλάκα από ταινιωτή πλαστελίνη, η οποία οριοθετείται από ένα άκαμπτο όριο μόνο στην αριστερή πλευρά, ένα ελεύθερο όριο στη δεξιά και παραμορφώνεται από έναν άκαμπτο εμβολέα (indenter). Η όλη διαδικασία χαρακτηρίζεται από επίπεδη παραμόρφωση (plain-strain deformation), που επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση, εκατέρωθεν του στρώματος πλαστελίνης, δύο λιπασμένων πλακών. Τα σχήματα στη δεξιά στήλη παρουσιάζουν τα ρήγματα που αναπτύσσονται στην πλαστελίνη.* ***A.*** *Το ρήγμα F_1 διαδίδεται προς τα έξω από την γωνία του εμβόλου.* ***B.*** *Το ρηξιτέμαχος 1 εξωθείται προς τα δεξιά του ρήγματος F_1. Η προώθηση του εμβόλου περιστρέφει το ρήγμα F_1, μέχρι η γεωμετρία του να μην του επιτρέπει περεταίρω ολίσθηση και έτσι δημιουργείται το ρήγμα F_2, που αναπτύσσεται και αυτό από τη γωνία του εμβόλου και προς τα έξω.* ***C.*** *Το ρηξιτέμαχος 2 εξωθείται από το μέτωπο του εμβόλου, με ολίσθηση κατά μήκος του ρήγματος F_2. Οι δομές του πειράματος είναι άμεσα συγκρίσιμες με την Εικόνα 7.16. Τα ρήγματα F_1 και F_2 αντιστοιχούν αντίστοιχα στα ρήγματα Red River fault και Altyn Tagh fault. Επισημαίνονται οι λεκάνες πλάγιας απομάκρυνσης κοντά στα ρήγματα F_1 και F_2.*

συμπεριφέρεται ως άκαμπτο έμβολο (εμβολέας) και η άλλη ως καμπτόμενη πλαστική ύλη. Η απάντηση μπορεί να είναι ότι το ηπειρωτικό περιθώριο που χαρακτηρίζεται από ένα αναλισκόμενο όριο πλάκας (consuming plate boundary, βλπ. Ασία), είναι θερμότερο και ως εκ τούτου πιο αδύναμο (μικρότερης αντοχής).

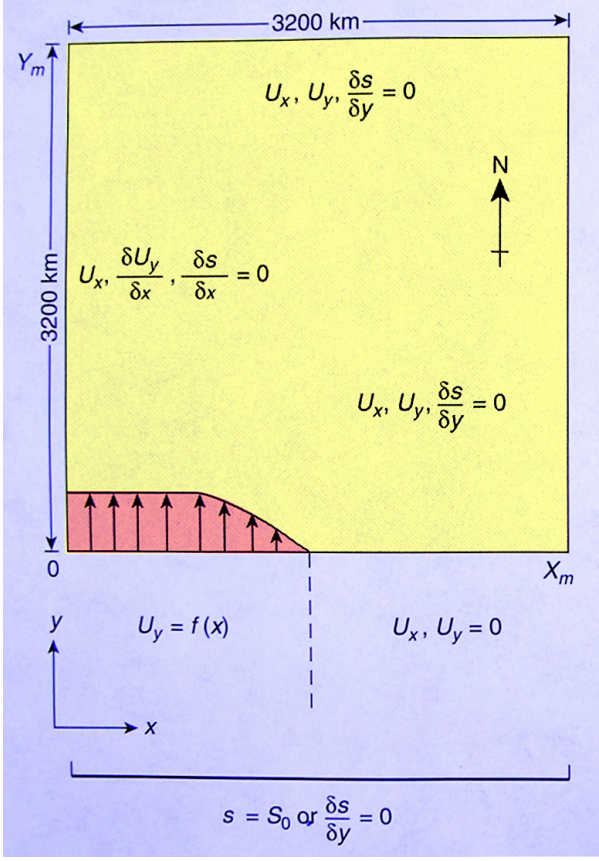
Ένα Αριθμητικό Μοντέλο για την Τεκτονική της Ασίας

Μια άλλη προσέγγιση της μοντελοποίησης της παραμόρφωσης της ηπειρωτικής σύγκρουσης στην Ασία, χρησιμοποιεί τον αριθμητικό υπολογισμό της παραμόρφωσης, που θεωρεί ότι η λιθόσφαιρα παραμορφώνεται σύμφωνα με μια αρχή, ένα καταστατικό νόμο δυνάμεως (δηλαδή ένα νόμο δυνάμεως της ρεολογίας –power low rheology), όπως ο:

$$\left| {}_{s}\dot{e} \right| = A_D \sigma^n \qquad (7.1)$$

ο οποίος χρησιμοποιεί μια μεταβλητή τάση, τον εκθέτη n. Στην περίπτωση αυτή το $\left| {}_{s}\dot{e} \right|$ είναι η απόλυτη τιμή του ρυθμού εφελκυσμού σε σταθερό καθεστώς (steady-state extension rate), το A μια σταθερά της ύλης που εξαρτάται εκθετικά από τη θερμοκρασία και το ${}_D\sigma$ η αποκλίνουσα τάση (δηλαδή η μέγιστη μείον την ελάχιστη κύρια τάση). Το καθεστώς του ορίου καθορίζεται από τους όρους ότι η παραμόρφωση λαμβάνει χώρα σε ένα καθορισμένο τετράγωνο παραλληλεπίπεδο και το υλικό εισέρχεται στον κύβο κατά μήκος του μισού τμήματος της μιας πλευράς του και με ένα πρότυπο ταχυτήτων που παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.21. Το υλικό που εισέρχεται στον κύβο είναι άμεσα συσχετίσιμο με τον εμβολέα, των πλαστικών μοντέλων, που περιγράφησαν στα προηγούμενα.

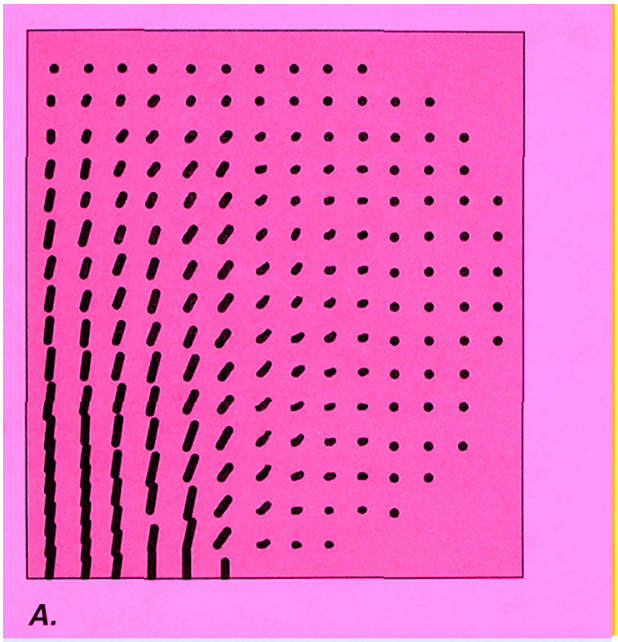
Οι οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας υπολογίζονται από τις ρεολογικές εξισώσεις, οι οποίες χρειάζονται τιμές για τις σταθερές που καθορίζουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Προφανώς η λιθόσφαιρα της Γης παρουσιάζει μια πολύπλοκη στρωμάτωση, αλλά για τις ανάγκες μιας πρώτης τάξης υπολογισμών, οι ιδιότητες του υλικού μπορούν να ληφθούν ως ο μέσος ο όρος των ιδιοτήτων όλου του πάχους της λιθόσφαιρας. Ο ρυθμός της κατακόρυφης παραμόρφωσης (vertical strain rate), υπολογίζεται από το ρυθμό της οριζόντιας παραμόρφωσης με την παραδοχή ότι έχουμε σταθερής έντασης παραμόρφωση. Η κάθετη παραμόρφωση δημιουργεί δυνάμεις άντωσης στον παχυμένο φλοιό που περιλαμβάνονται στις κινητήριες δυνάμεις της παραμόρφωσης. Ως εκ τούτου λοιπόν, αν το πραγματικό ιξώδες της λιθόσφαιρας είναι αρκετά χαμηλό, η βαρυτική κατάρρευση ενός υπερπαχυμένου φλοιού, συνεισφέρει σημαντικά στην παραμόρφωση.

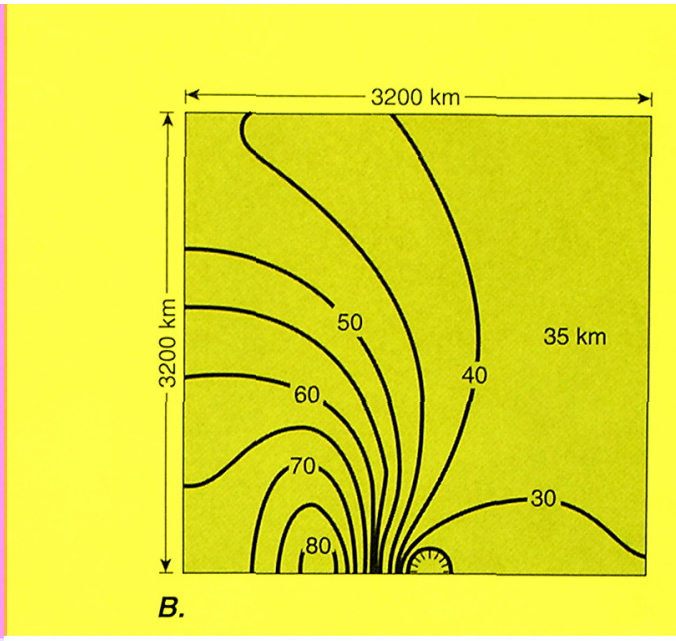


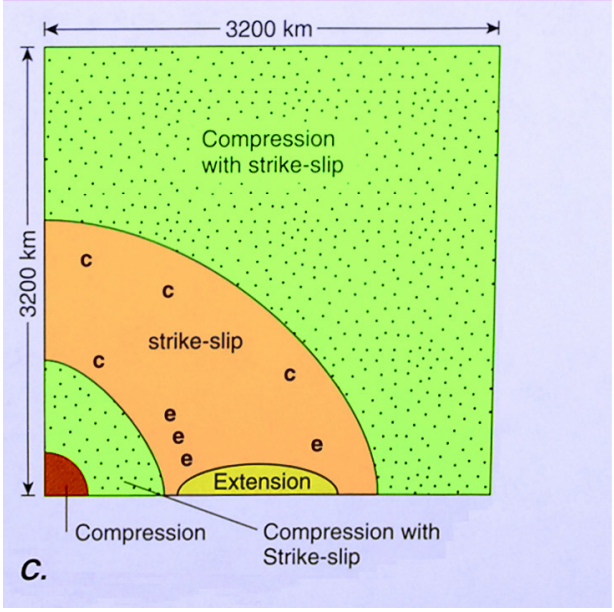
Εικόνα 7.21 *Οι συνθήκες των ορίων για ένα αριθμητικό μοντέλο μιας πλάκας από υλικό που χαρακτηρίζεται από νόμους δυνάμεως της ρεολογίας (power low rheology) και οριοθετείται μέσα σε ένα άκαμπτο τετράγωνο παραλληλεπίπεδο, με εισροή υλικού στο αριστερό τμήμα του κάτω μέρους. Για σύγκριση με την Ασία, το παραλληλεπίπεδο μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει μήκος πλευράς 3.200 km.* U_X, U_Y*: οι ταχύτητες στις διευθύνσεις x και y.* s, S_0*: το πάχος του στρώματος και το πραγματικό πάχος (35 km).*

Το μοντέλο αυτό δε έχει σκοπό να αναπαραστήσει την τεκτονική της Ασίας, εκτός από ένα πολύ γενικό τρόπο. Στην Εικόνα 7.22, παρουσιάζεται ένα τέτοιο μοντέλο που τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του είναι συγκρίσιμα με αυτά της τεκτονικής της Ασίας. Στο μοντέλο αυτό ο εκθέτης της τάσης n = 3 και η ρεολογία της λιθόσφαιρας έχει ληφθεί έτσι ώστε η βαρυτική κατάρρευση του υπερπαχυμένου φλοιού να συνεισφέρει σημαντικά στην παραμόρφωση. Η Εικόνα 7.22A παρουσιάζει το πεδίο ταχυτήτων της παραμόρφωσης, η Εικόνα 7.22B παρουσιάζει το πάχος του φλοιού και η Εικόνα 7.22C παρουσιάζει το γενικό πλαίσιο της παραμόρφωσης.

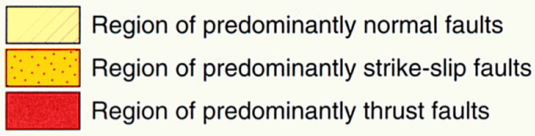
Το πεδίο των ταχυτήτων (Εικ. 7.22A), παρουσιάζει μια γενική ροή υλικού προς τα ανατολικά, μακριά από το σημείο της εισροής (σύγκριση με τις Εικόνες 7.16 και 7.20). Η περιοχή της μέγιστης πάχυνσης (Εικ. 7.22B), είναι παρακείμενη του

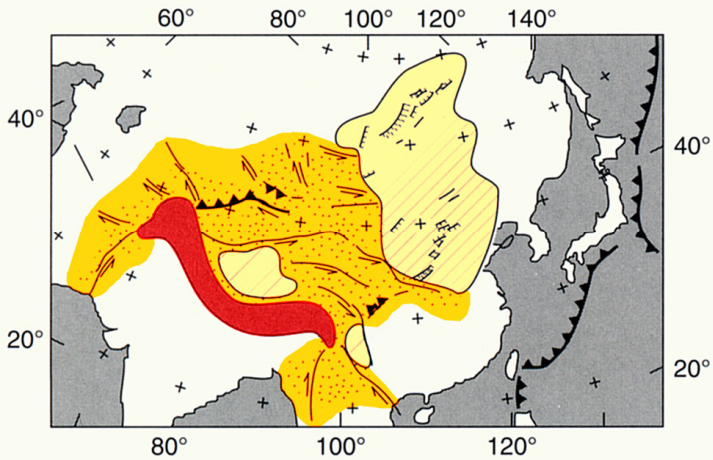






Εικόνα 7.22 *Τα αποτελέσματα από ένα μαθηματικό υπολογισμό της παραμόρφωσης του στρώματος της Εικ. 7.18. Θεωρείται ότι ο εκθέτης της τάσης n = 3 (βλπ. εξίσωση 7.1) και ότι η λιθόσφαιρα έχει μια αρκετά χαμηλή αντοχή, που οι δυνάμεις της άντωσης προξένησαν με την πάχυνση του φλοιού, οδηγώντας σε ένα σημαντικό ποσό παραμόρφωσης.* ***A.*** *Το πεδίο ταχυτήτων της παραμόρφωσης. Σημειώνεται ότι ο γενικός τύπος του πεδίου είναι συγκρίσιμος με την πλαστική εξώθηση που παρατηρήθηκε στο πείραμα με την πλαστελίνη (Εικ. 7.20).* ***B.*** *Το πάχος του φλοιού, με αρχικό πάχος εκκίνησης τα 35 km. Το πάχος είναι μεγαλύτερο κοντά στην περιοχή εισροής υλικού και περίπου κανονικό στην δεξιά μεριά του στρώματος (γεγονός που είναι συγκρίσιμο με τα πάχη στην ευρύτερη περιοχή των Ιμαλαΐων).* ***C.*** *Η κατανομή των κυρίαρχων τύπων παραμόρφωσης περιλαμβάνει συμπίεση, εφελκυσμό, συμπίεση με σημαντική συνιστώσα οριζόντιας ολίσθησης, και οριζόντια ολίσθηση με συνιστώσες συμπίεσης (c) και εφελκυσμού (e).*





Εικόνα 7.23 *Τεκτονικός χάρτης της Ασίας όπου παρουσιάζονται οι κύριοι τύποι παραμόρφωσης. Επισημαίνονται οι περιοχές με κανονικά ρήγματα, που βρίσκονται μέσα σε περιοχές που κυριαρχούνται από ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης (βλπ. και Εικ. 7.16).*

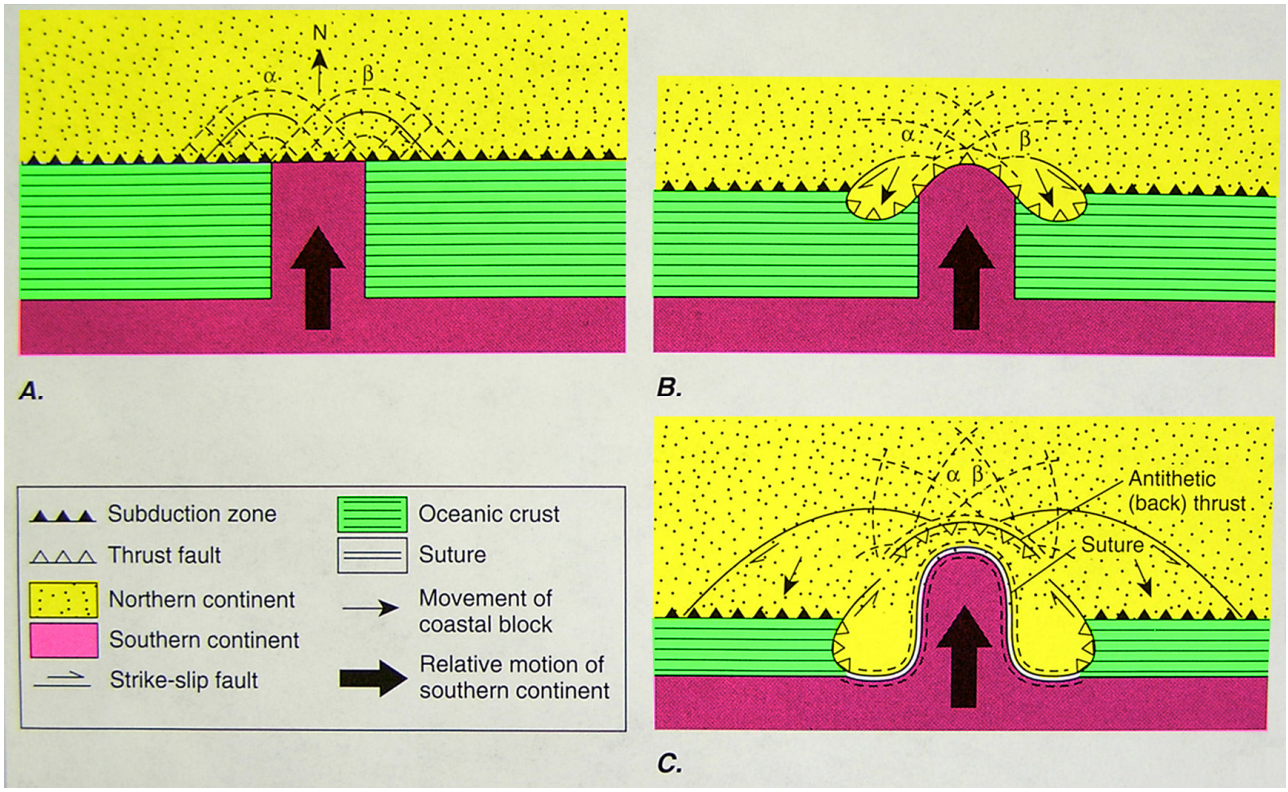
μετώπου της εισροής του υλικού και γίνεται μηδενική προς τα ανατολικά, μια γενική εικόνα, δηλαδή, που συμφωνεί με το πάχος του φλοιού στην ευρύτερη περιοχή των Ιμαλαΐων. Το πλαίσιο της παραμόρφωσης (Εικ. 7.22C), που προσδιορίζεται από τα μεγέθη του ρυθμού της κύριας οριζόντιας παραμόρφωσης, περιλαμβάνει ζώνες συμπίεσης, εφελκυσμού, συμπίεσης με σημαντική συνιστώσα οριζόντιας ολίσθησης, και ζώνες με κυρίαρχη παραμόρφωση με οριζόντια ολίσθηση με συνιστώσες συμπίεσης (c) και εφελκυσμού (e). Η σύγκριση με την Εικόνα 7.23 (αλλά και την Εικόνα 7.16), δείχνει ότι ομοειδείς ζώνες υπάρχουν και στην Ασία.

Ένα πλεονέκτημα των αριθμητικών μοντέλων είναι ότι λαμβάνουν υπόψη το πάχος του φλοιού και την τοπογραφία. Εξ' αιτίας όμως των συγκεκριμένων ρεολογικών εξισώσεων που χρησιμοποιούν και της παραμόρφωσης στις τρεις διαστάσεις, δεν προβλέπουν με ακρίβεια τα ρήγματα και τα καθεστώτα των ορίων αποτελούν μόνο απλοϊκές προσεγγίσεις των πραγματικών καθεστώτων στα περιθώρια της Ασίας. Ως εκ τούτου, λοιπόν, τα πρότυπα παραμόρφωσης των μοντέλων αυτών δεν αναπαριστούν πιστά τα παρατηρούμενα γεωλογικά πρότυπα (συγκρίνατε τις Εικόνες 7.22C και 7.23).

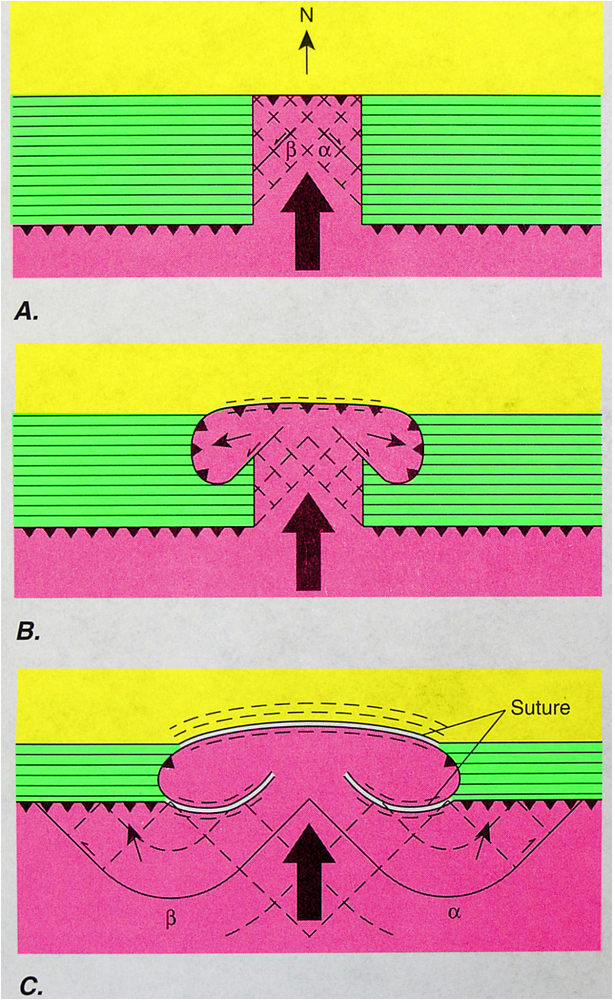
Μοντέλα Γραμμών Ολίσθησης της Αλπικής Σύγκρουσης

Ένα ενδιαφέρον και ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της τεκτονικής δομής του Αλπικού τμήματος του ορογενετικού συστήματος Άλπεων-Ιμαλαΐων, αποτελούν οι μεγάλοι λοβοί βόρεια και ΒΑ από την Ιταλία (βλπ. Εικ. 7.13), που σηματοδοτούν τα τόξα των δυτικών Άλπεων και των Καρπαθίων. Οι Εικόνες 7.24 και 7.25 παρουσιάζουν δύο ποιοτικά μοντέλα γραμμών ολίσθησης, που προσπαθούν να ερμηνεύσουν αυτές τις χαρακτηριστικές δομές. Και τα δύο μοντέλα θεωρούν ότι η σύγκρουση έλαβε χώρα ανάμεσα σε ένα μεγάλο ακρωτήριο που σχημάτιζε το περιθώριο της νότιας ηπείρου, που αντιπροσώπευε την Απουλία και μια ήπειρο στα βόρεια, που αντιπροσώπευε την Ευρώπη.

Το πρώτο μοντέλο προϋποθέτει μια ζώνη υποβύθισης που κλίνει προς Βορρά, κάτω από τη βόρεια ήπειρο, έτσι ώστε η βόρεια ήπειρος να είναι



Εικόνα 7.24 *Σχηματικό μοντέλο πλαστικών γραμμών ολίσθησης για την εξέλιξη των Άλπεων, που προϋποθέτει μια ζώνη υποβύθισης που βυθίζεται βόρεια και ένα δύσκαμπτο ακρωτήριο (η Απουλία) της νότιας ηπείρου (Αφρική), που συγκρούεται με μια θερμότερη, και άρα πιο εύκολα παραμορφώσιμη, βόρεια ήπειρο (Ευρώπη).* ***Α.*** *Η διάταξη των ηπείρων κατά την έναρξη της σύγκρουσης.* ***Β.*** *Εξώθηση του φλοιού τα βόρειας ηπείρου γύρω από το εμβάλλον "ακρωτήριο" (εμβολέας), κατά μήκος συγκεκριμένων γραμμών ολίσθησης (slip lines). Η απόληξη του εμβόλου παραμορφώνεται και η ζώνη υποβύθισης προσαρμόζεται με τη στρογγυλευμένη απόληξη.* ***C.*** *Συρραφή των ηπειρωτικών τεμαχών και δεύτερη φάση εξώθησης.*



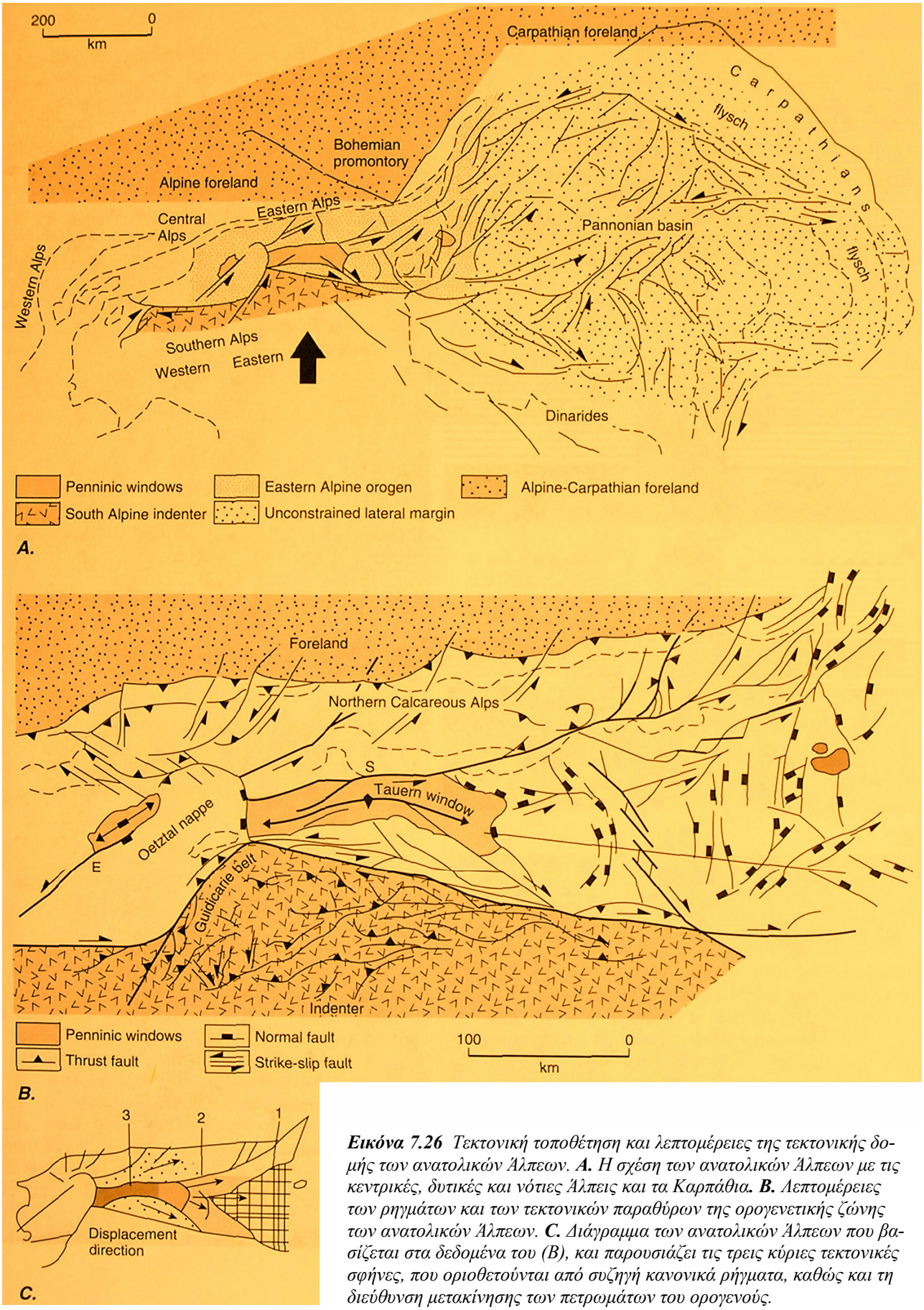
Εικόνα 7.25 *Σχηματικό μοντέλο πλαστικών γραμμών ολίσθησης για την εξέλιξη των Άλπεων, που προϋποθέτει: μια ζώνη υποβύθισης που βυθίζεται νότια κάτω από μια θερμότερη και άρα πιο εύκολα παραμορφώσιμη νότια ήπειρο (Αφρική), μια βόρεια ήπειρο (Ευρώπη), που συγκρούεται με το εύκολα παραμορφώσιμο ακρωτήριο (Απουλία) της νότιας ηπείρου (Αφρική).* ***Α.*** *Η έναρξη της σύγκρουσης.* ***Β.*** *Το ακρωτήριο παραμορφώνεται κατά μήκος συγκεκριμένων γραμμών ολίσθησης, σχηματίζοντας λοβούς και στις δύο πλευρές.* ***C.*** *Το παραμορφωμένο ακρωτήριο εγκλωβίζεται ανάμεσα στις δύο ηπειρωτικές μάζες και η ασθενέστερη νότια ήπειρος παραμορφώνεται κατά μήκος συστημάτων γραμμών ολίσθησης.*

θερμή και με μικρότερη αντοχή και το ακρωτήριο της νότιας ηπείρου ψυχρό και δύσκαμπτο (Εικ. 7.24). Η γεωμετρία είναι αντίστοιχη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο από πλαστελίνη για τη σύγκρουση της Ινδίας με την Ασία (βλπ. Εικ. 7.20), με την εξαίρεση ότι η πλαστική βόρεια ήπειρος δεν έχει ένα απεριόριστο όριο στα ανατολικά, αλλά ούτε και ένα άκαμπτο όριο στα δυτικά. Καθώς ο εμβολέας, διεισδύει στην πλαστική βόρεια ήπειρο, την εξωθεί στο μέτωπο του εμβόλου κατά μήκος των γραμμών ολίσθησης, σχηματίζοντας δύο λοβούς κατά μήκος κάθε πλευράς του εμβόλου (Εικ. 7.24Β). Οι βόρειες παρυφές του εμβόλου τροποποιούνται επίσης από την παραμόρφωση. Καθώς η σύγκρουση εξελίσσεται και ολοκληρώνεται, οι πλευρικοί λοβοί της βόρειας ηπείρου συγκρούονται με τις παρυφές της νότιας ηπείρου, σχηματίζοντας μια μεγάλη ζώνη σύγκρουσης (Εικ. 7.24C). Νέα ρήγματα μπορεί να σχηματισθούν στην προηγουμένως απαραμόρφωτη περιοχή και μια πλατιά ζώνη ενδοηπειρωτικής παραμόρφωσης μπορεί να αναπτυχθεί. Η πάχυνση του φλοιού μπροστά από τον έμβολέα μπορεί να οδηγήσει σε αντίθετη πτύχωση (back folding) την κύρια επώθηση και να αντιστρέψει την ασυμμετρία (φορά κατάκλισης – vergence), των επωθήσεων (Εικ. 7.24C).

Το δεύτερο μοντέλο προϋποθέτει ότι το αναλισκόμενο περιθώριο (consuming margin), κλίνει νότια, κάτω από το ακρωτήριο της νότιας ηπείρου (Εικ. 7.25). Σε αυτή την περίπτωση, η νότια ήπειρος αντιπροσωπεύει τη θερμότερη και πιο αδύναμη πλάκα, και η πλαστική παραμόρφωση συγκεντρώνεται στο ακρωτήριο. Καθώς η σύγκλιση των πλακών προχωρά, μια πλατιά μετωπική ζώνη σύγκρουσης σχηματίζεται από την εξώθηση των βόρειων τμημάτων του ακρωτηρίου στις πλευρές, ώστε να σχηματισθούν δύο λοβοί. Τελικά το παραμορφωμένο ακρωτήριο εγκλωβίζεται ανάμεσα στις παρυφές της σχετικά άκαμπτης βόρειας ηπείρου και της πλαστικής νότιας και το κύριο περιθώριο της νότιας ηπείρου αρχίζει να διαρρηγνύεται κατά μήκος πλαστικών γραμμών ολίσθησης.

Το τελικό αποτέλεσμα των δύο μοντέλων είναι εντελώς διαφορετικό. Στο μοντέλο του άκαμπτου εμβολέα, οι λοβοί σχηματίζονται από τη βόρεια ήπειρο. Αντίθετα στο μοντέλο του πλαστικού ακρωτηρίου, σχηματίζονται από το ίδιο το ακρωτήριο. Επιπλέον η ζώνη της ηπειρωτικής παραμόρφωσης συγκεντρώνεται στην πλαστική πλάκα, που είναι η βόρεια ήπειρος στο πρώτο μοντέλο (Εικ. 7.24) και η νότια στο δεύτερο (Εικ. 7.25). Αυτά τα μοντέλα, λοιπόν, μπορούν να αντιπροσωπεύουν μόνο το τμήμα εκείνο της αλπικής σύγκρουσης πριν από περίπου 80 Ma (βλπ. και Κεφάλαιο 11.4), όταν η διεύθυνση της σύγκλισης ανάμεσα στην Αφρική-Απουλία και την Ευρώπη ήταν περίπου κάθετη στη ζώνη υποβύθισης. Ως εκ τούτου λοιπόν δεν μπορούν να εξηγήσουν τις μεταγενέστερες επωθήσεις και καλύμματα, που σχετίζονται με την έντονα πλάγια φάση σύγκρουσης. Μια λεπτομερής ανάλυση των τεκτονικών δομών των ανατολικών Άλπεων και ένα πιο προσεκτικά κατασκευασμένο σύνολο πειραματικών μοντέλων, αποκάλυψε αρκετά περισσότερα στοιχεία για την τεκτονική αυτού του τμήματος της ορογενετικής αλυσίδας.

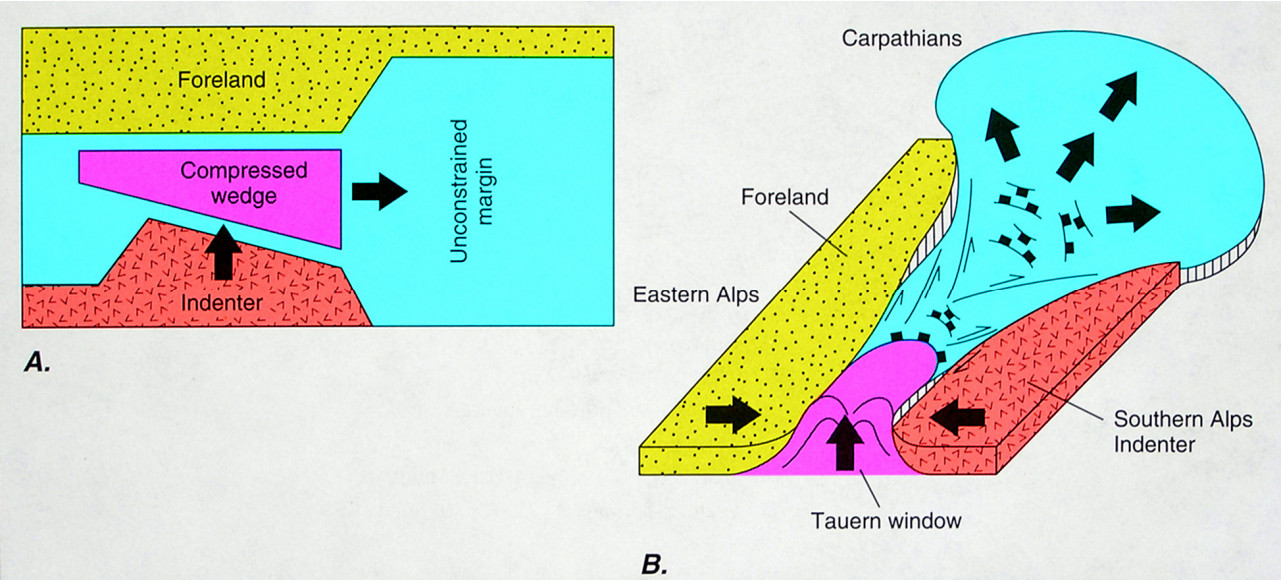
Τα τεκτονικά δεδομένα από τις ανατολικές



Εικόνα 7.26 *Τεκτονική τοποθέτηση και λεπτομέρειες της τεκτονικής δομής των ανατολικών Άλπεων.* ***Α.*** *Η σχέση των ανατολικών Άλπεων με τις κεντρικές, δυτικές και νότιες Άλπεις και τα Καρπάθια.* ***Β.*** *Λεπτομέρειες των ρηγμάτων και των τεκτονικών παραθύρων της ορογενετικής ζώνης των ανατολικών Άλπεων.* ***C.*** *Διάγραμμα των ανατολικών Άλπεων που βασίζεται στα δεδομένα του (Β), και παρουσιάζει τις τρεις κύριες τεκτονικές σφήνες, που οριοθετούνται από συζηγή κανονικά ρήγματα, καθώς και τη διεύθυνση μετακίνησης των πετρωμάτων του ορογενούς.*

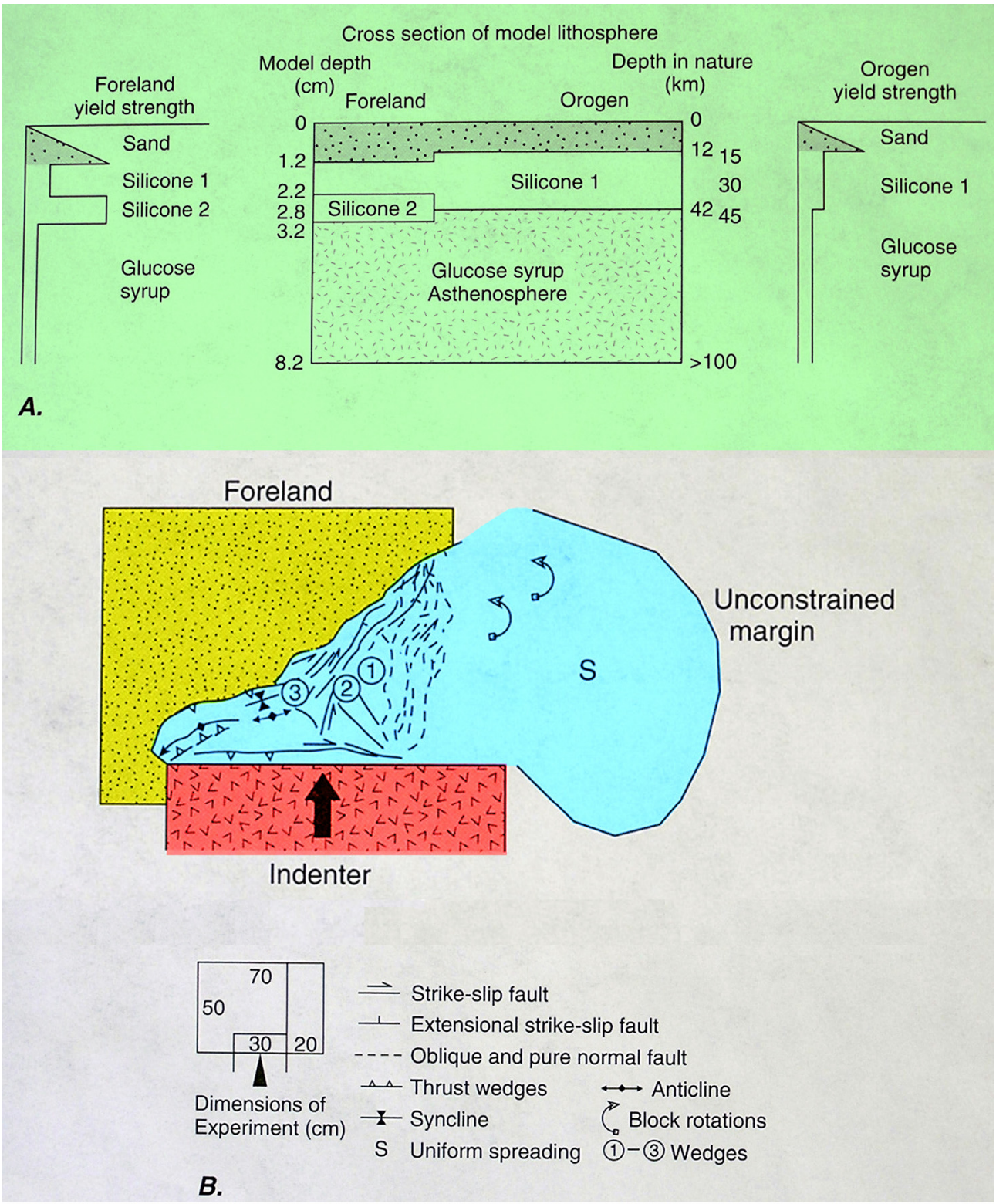
Άλπεις (Εικ. 7.26Α), δείχνουν ότι κατά την περίοδο Αν. Ολιγοκαίνου – Μειοκαίνου (περίπου 25 – 10 Ma), κυριαρχούσε η Β-Ν σύγκλιση κατά μήκος μιας, προς Νότο κλίνουσας, ζώνης υποβύθισης. Η εμπροσθοχώρα (foreland), των Άλπεων-Καρπαθίων της Ευρωπαϊκής ηπείρου στο Βορρά, δρούσε σαν άκαμπτο αντιστήριγμα. Οι νότιες Άλπεις δρούσαν σαν ένα έμβολο (indenter), που, από άποψη αντοχής, ήταν πιο αδύναμο από την εμπροσθοχώρα, αλλά πιο δυνατό από τα πετρώματα της ορογενετικής ζώνης που εγκλωβίστηκε στο μέσον. Η ορογενετική ζώνη (Εικ. 7.26Β), αποτελείτο από μια τεκτονική στοίβα από ηπειρωτικό φλοιό καλυμμένο από το Πεννινικό κάλυμμα και το Αυστροαλπικό κάλυμμα (Penninic and Austroalpine nappes), που τοποθετήθηκαν κατά τη διάρκεια του Κρητιδικού. Καθώς οι ισόθερμες, που συμπιέσθηκαν από την τοποθέτηση των καλυμμάτων, πήραν κυκλική μορφή, η αύξηση της θερμοκρασίας έκανε πιο ασθενή (από άποψη αντοχής) τα πετρώματα της τεκτονικής στοίβας.

Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι νότιες Άλπεις προσέκρουσαν στην ορογενετική ζώνη, οδηγώντας σε: λέπτυνση, άνοδο του τεκτονικού παραθύρου του Tauern και εκδίωξη των πετρωμάτων προς τα ανατολικά, κατά μήκος συζυγούς συστήματος ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης, που είναι όμοια με τις γραμμές ολίσθησης που δημιουργούνται σε πλαστική ύλη (Εικ. 7.27 σε σύγκριση με 7.14). Η βαρυτική κατάρρευση, λόγω της ανόδου του ορογενούς, οδήγησε σε Α-Δ εφελκυσμό, που εκτονώθηκε με τη δημιουργία ενός πολύπλοκου συστήματος κανονικών ρηγμάτων με διεύθυνση Β-Ν, ορισμένα από τα οποία αποκάλυψαν το παράθυρο του Tauren (βλπ. Εικ. 7.26Β, 7.26C, 7.27). Η κατάρρευση αυτή συνέβαλλε στην περεταίρω εξώθηση του υλικού. Η ικανότητα των ορογενετικών πετρωμάτων να μετακινηθούν προς τα ανατολικά, υποδηλώνει ότι το ανατολικό όριο, που αντιπροσωπεύεται από τις λεκάνες των Καρπαθίων, έδρασε ουσιαστικά ως ένα απεριόριστο παριθώριο.



Εικόνα 7.27 *Μοντέλο για.την Ολιγοκαινική – Μειοκαινική παραμόρφωση των ανατολικών Άλπεων.* ***Α.*** *Η συμπιεσμένη σφήνα αντιπροσωπεύει τα πετρώματα του ορογενούς των ανατολικών Άλπεων, που παγιδεύτηκαν ανάμεσα στην προεξοχή (εσοχέα, ακρωτήριο), της νότιας ηπείρου και την εμπροσθοχώρα των Άλπεων-Καρπαθίων.* ***Β.*** *Τρισδιάστατο σκίτσο που παρουσιάζει την ανύψωση του τεκτονικού παραθύρου του Tauren. Η εξώθησή του πραγματοποιείται με μικρής γωνίας κανονικά ρήγματα (low-angle normal faults), που συνδέονται με τη βαρυτική κατάρρευση του ανυψωμένου παραθύρου του Tauren. Η όλη διαδικασία συμπληρώνεται από την ταυτόχρονη τεκτονική εκδίωξη των πετρωμάτων προς τα ανατολικά, μέσα από ένα συζυγές σύστημα ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης.*

Η Εικόνα 7.28 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του πιο πετυχημένου από ένα ικανό αριθμό πειραματικών μοντέλων. Το μοντέλο αυτό κατασκευάσθηκε από στρώματα που αποτελούνταν από άμμο, σιλικόνη και σιρόπι γλυκόζης, ώστε να προσεγγισθούν υπό κλίμακα οι μηχανικές ιδιότητες και η πυκνότητα της λιθόσφαιρας. Το μοντέλο με επιτυχία αναπαρήγαγε: τη λέπτυνση και την άνοδο στις δυτικές περιοχές, τις σφήνες της ύλης που κινήθηκε



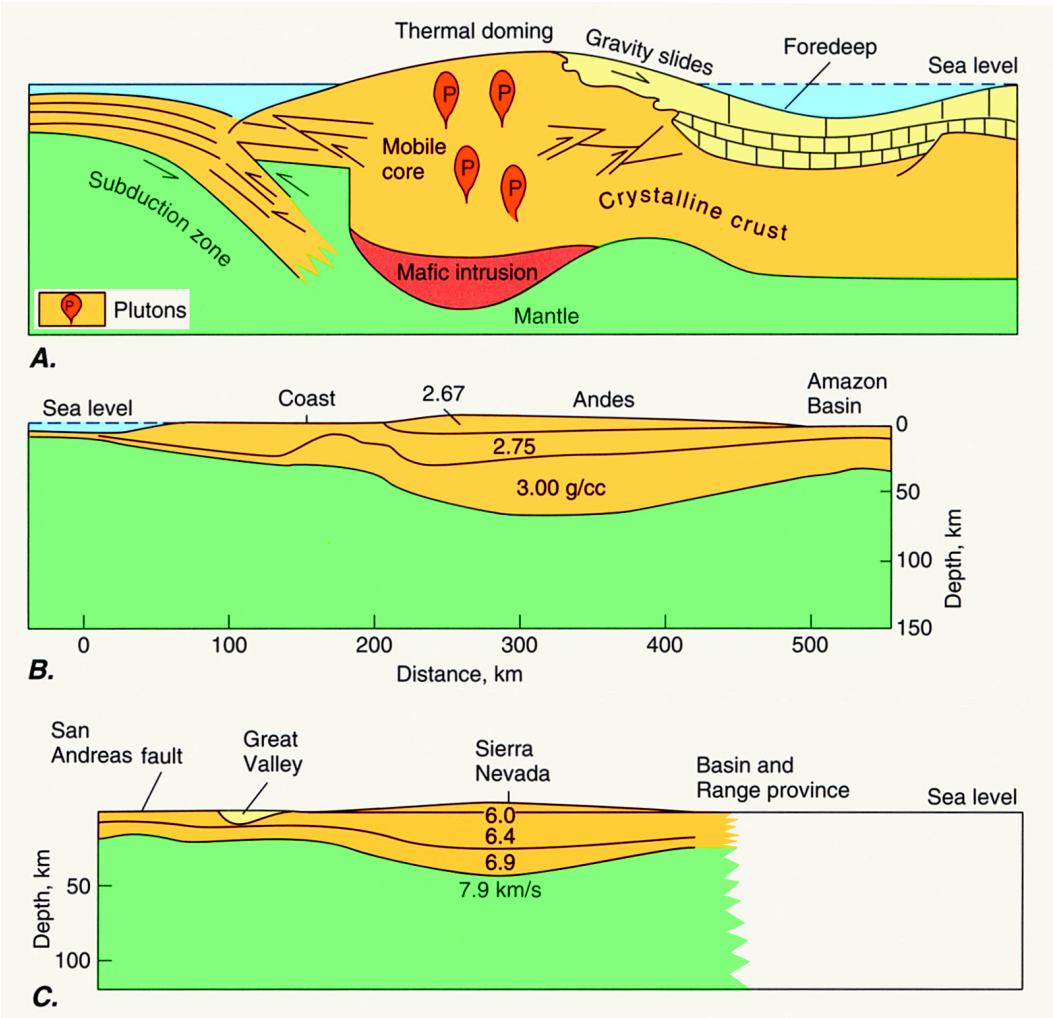
Εικόνα 7.28 *Πειραματικό μοντέλο υπό κλίμακα που αναπαράγει τις μεγάλες τεκτονικές δομές από το ορογενές των ανατολικών Άλπεων, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.26.* ***Α.*** *Κατακόρυφη τομή της κατασκευής του μοντέλου που παρουσιάζει τα στρώματα άμμου, σιλικόνης και σιροπιού γλυκόζης, που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της λιθόσφαιρας της εμπροσθοχώρας (αριστερά) και του ορογενούς (δεξιά). Τα γραφήματα σε κάθε πλευρά καταδεικνύουν τις μεταβολές της αντοχής με το βάθος.* ***Β.*** *Κάτοψη που παρουσιάζει τα αποτελέσματα ενός εμβολέα (indenter), που προωθήθηκε από τα δεξιά προς τα αριστερά στην τομή του (Α). Η επακόλουθη ανύψωση, τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και τα κανονικά ρήγματα, παρουσιάζουν στενές ομοιότητες με την τεκτονική δομή των ανατολικών Άλπεων (βλπ. Εικ. 7.26).*

προς τα ανατολικά και οριοθετήθηκε από ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και τα κατά προσέγγιση Β-Ν κανονικά ρήγματα. Αυτού του τύπου τα πειράματα προβλέπουν με επιτυχία τις μηχανικές ιδιότητες και τα καθεστώτα των περιθωρίων, που ελέγχουν το σχηματισμό ενός ορογενούς.

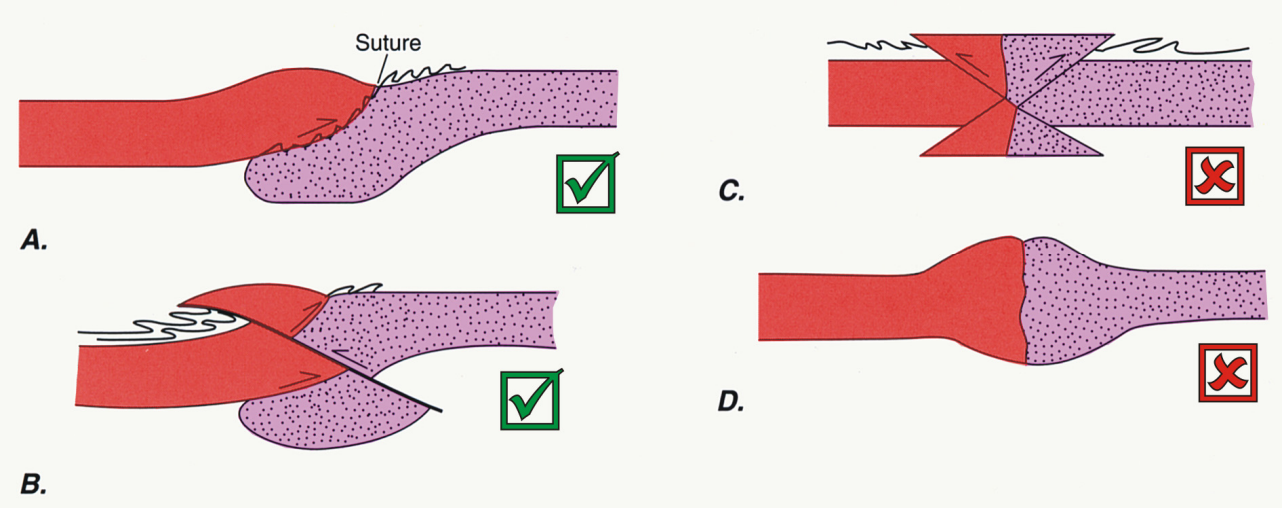
7.5 Ο Σχηματισμός των Ριζών των Οροσειρών

Οι ρίζες των οροσειρών αποτελούν περιοχές όπου τα πάχος του φλοιού είναι σημαντικά μεγαλύτερο απ' ότι το κανονικό και αποτελούν το υπόβαθρο σε όλες σχεδόν τις ορογενετικές αλυσίδες του κόσμου. Είναι γεγονός ότι η υψηλή τοπογραφία των ορέων υπάρχει εξ' αιτίας της ισοστατικής ανύψωσης, που προξενείται από τον παχυμένο φλοιό που "επιπλέει" στον υψηλότερης πυκνότητας μανδύα.

Δύο υποθέσεις έχουν προταθεί για την ερμηνεία του σχηματισμού των ριζών των ορέων. Η μία σχετίζεται με τις διαδικασίες υποβύθισης και η άλλη με τις διαδικασίες σύγκρουσης. Η υπόθεση που σχετίζεται με την υποβύθιση καλείται επίσης και "υπόθεση τύπου Κορδιλιέρας" (Cordilleran hypothesis) και υποστηρίζει ότι οι ρίζες των οροσειρών σχηματίζονται ακριβώς κάτω από ένα ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο, λόγω της ανόδου βασικού μάγματος από την κατερχόμενη πλάκα και διείσδυση του μάγματος στον κατώτερο φλοιό (Εικ. 7.29Α). Η ψύξη και η κρυστάλλωση αυτών των μαγματικών σωμάτων, θερμαίνουν τα περιβάλλοντα πετρώματα του φλοιού και σχηματίζουν έναν



Εικόνα 7.29 *Οι ρίζες των οροσειρών στις περιοχές των ηπειρωτικών τόξων (continental arc).* ***Α.*** *Υποθετική ανάπτυξη παχυμένου φλοιού με ρίζα σε περιοχή ηπειρωτικού τόξου. Επισημαίνεται η διαφορά στη γεωμετρία των δομών από τα μοντέλα πραγματικής κλίμακας.* ***Β.*** *Τομή που παρουσιάζει ένα πραγματικής κλίμακας μοντέλο των στρωμάτων του φλοιού στην περιοχή των κεντρικών Άνδεων, βασισμένο σε βαρυτικές μετρήσεις.* ***C.*** *Τομή που παρουσιάζει ένα πραγματικής κλίμακας μοντέλο των στρωμάτων του φλοιού στην περιοχή της Sierra Nevada, που βασίζεται σε μεθόδους σεισμικής ανάκλασης. Οι αριθμοί αντιπροσωπεύουν την ταχύτητα των P-κυμάτων.*



Εικόνα 7.30 *Διαγράμματα που παρουσιάζουν την ανάπτυξη των ριζών των οροσειρών σε περιβάλλον σύγκρουσης.* ***A.*** *Ανάπτυξη μιας απλής επώθησης ενός ηπειρωτικού περιθωρίου σε ένα άλλο, όπως στην οροσειρά του Ζάγκρος.* ***B.*** *Τροποποίηση του (A) με επώθηση και στην αντίθετη κατεύθυνση, που αντιπροσωπεύει μια πιο σύνθετη δομή, όπως στις Άλπεις.* ***C.*** *Σχηματισμός ρίζας από συμμετρικές αντιθετικές επωθήσεις και στις δύο ηπείρους ταυτόχρονα. Δεν υπάρχουν πραγματικές τέτοιες περιπτώσεις.* ***D.*** *Σχηματισμός ρίζας από ομοιογενή πλαστική παραμόρφωση της περιοχής σύγκρουσης. Ούτε από αυτή την περίπτωση υπάρχουν αληθινά παραδείγματα.*

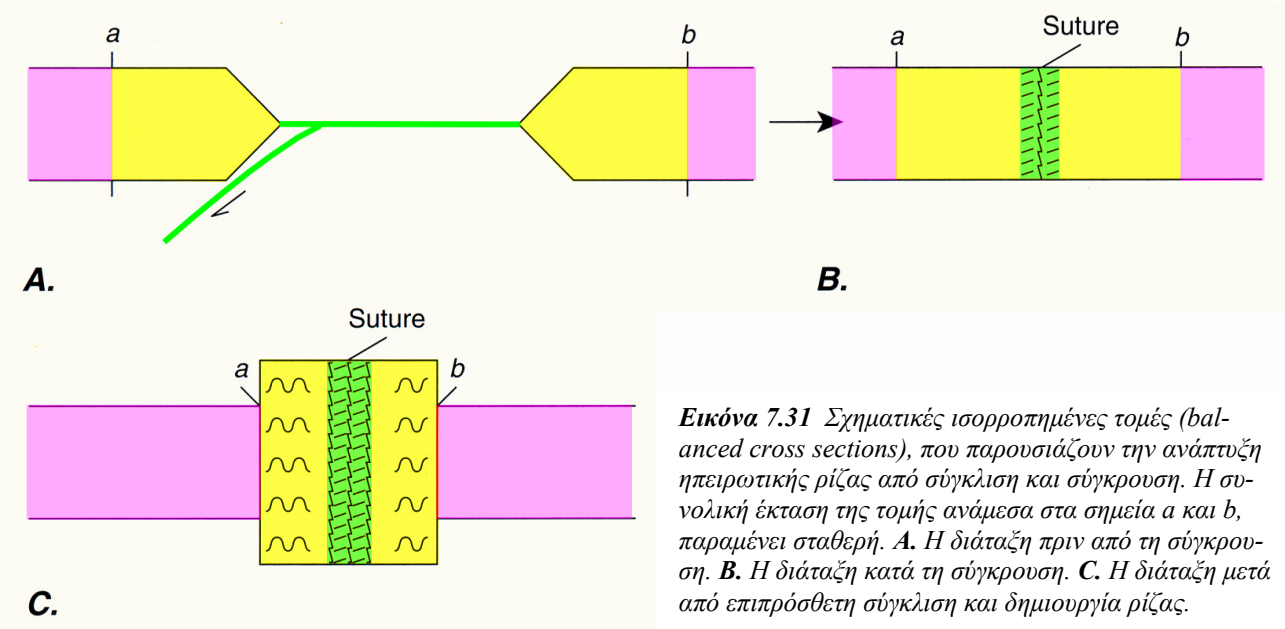
ευκίνητο πυρήνα, που περιέχει γρανιτικό μάγμα. Η πάχυνση του φλοιού δημιουργεί μια ισοστατική ανύψωση της επιφάνειας του φλοιού. Η επακόλουθη βαρυτική κατάρρευση, του παχυμένου και ευκίνητου φλοιού φλοιού, δημιουργεί επωθήσεις προς τη μεριά της εμπροσθο-χώρας (foreland), αλλά και αντιθετικές προς τη ζώνη υποβύθισης.

Δύο είναι οι πιο αντιπροσωπευτικές περιοχές όπου έχει εφαρμογή αυτή η υπόθεση: η κεντρική και νότια Sierra Nevada της Καλιφόρνια και οι κεντρικές Άνδεις (Εικ. 7.29B και 7.29C). Σε αυτές τις περιοχές η βαθολιθική δραστηριότητα είναι περισσότερο ή λιγότερο συγκεντρωμένη σε περιοχές που τώρα χαρακτηρίζονται από τέτοιες ρίζες. Τα παρόντα ενεργά ρήγματα στην ανατολική πλευρά των Άνδεων (Εικ. 7.29A), μπορεί να αντιστοιχούν σε επωθητικά ρήγματα της εμπροσθο-χώρας (foreland), που προέκυψαν από τη βαρυτική κατάρρευση του παχυμένου και θερμού ηπειρωτικού φλοιού.

Το μοντέλο που συσχετίζει τις ρίζες των οροσειρών με τις διαδικασίες της σύγκρουσης, θεωρεί ότι αυτές προέρχονται από την συμπιεστική πάχυνση των ίδιων των πετρωμάτων του φλοιού. Μια τέτοια ρίζα μπορεί να σχηματισθεί από την επώθηση μιας ηπείρου σε μια άλλη (Εικ. 7.30A), όπως για την περίπτωση της οροσειράς του Ζάγκρος που παρουσιάσθηκε στο Κεφάλαιο 7.3. Η επώθηση αυτή πιθανά συνοδεύεται και από την εκδήλωση αντιθετικών επωθήσεων προς την άλλη κατεύθυνση (Εικ. 7.30B). Μπορεί επίσης να σχηματισθεί από συμμετρικά επωθητικά ρήγματα που εκδηλώνονται στις παρυφές των δύο συγκρουόμενων ηπειρωτικών τεμαχών (Εικ. 7.30C), αλλά και από απλή ομοιόμορφη πλαστική πάχυνση της ζώνης σύγκρουσης (Εικ. 7.30D).

Η υπόθεση που συσχετίζει τις ρίζες των οροσειρών με τα φαινόμενα της σύγκρουσης φαίνεται να αντιπροσωπεύει την καλύτερη ερμηνεία στις περισσότερες περιπτώσεις, σε σχέση με την υπόθεση της μαγματικής διείσδυσης. Ούτε οι Άνδεις, αλλά ούτε και η Sierra Nevada, παρουσιάζουν πειστικές ενδείξεις για μαγματικής προέλευσης πάχυνση του φλοιού σε όλο τους το μήκος. Και οι δυο αυτές ορογενετικές αλυσίδες παρουσιάζουν καθαρές ενδείξεις για φαινόμενα σύγκρουσης που έχουν εκδηλωθεί τουλάχιστον σε κάποια επιμέρους τμήματά τους. Τα περισσότερα ηπειρωτικά τόξα, όπως παρουσιάσθηκαν στο Κεφάλαιο 6, δεν παρουσιάζουν ενδείξεις για την ύπαρξη ρίζας κάτω από την ηφαιστειακή αλυσίδα. Για παράδειγμα, η Ιαπωνία αποτελούσε τμήμα της ανατολικής Ασίας μέχρι το Νεογενές, όταν η διάνοιξη της Θάλασσας της Ιαπωνίας, την απέσπασε από την ηπειρωτική χώρα. Είναι γνωστό όμως, ότι η ανατολική Ασία (περιλαμβανομένης της Ιαπωνίας), έχει μια ενεργή ζώνη υποβύθισης, που κατά περιόδους, λειτουργεί από το Άνω Παλαιοζωϊκό. Έτσι η Ιαπωνία παρουσιάζει μικρές μόνο ενδείξεις για την ύπαρξη μιας τέτοιας ρίζας, που συνδέεται με δομές και διαδικασίες που παρουσιάσθηκαν στην περίπτωση της Εικ. 7.29A.

Στις νέες ορογενετικές αλυσίδες, το πάχος της ρίζας αντανακλά, κατά προσέγγιση, το ποσοστό της

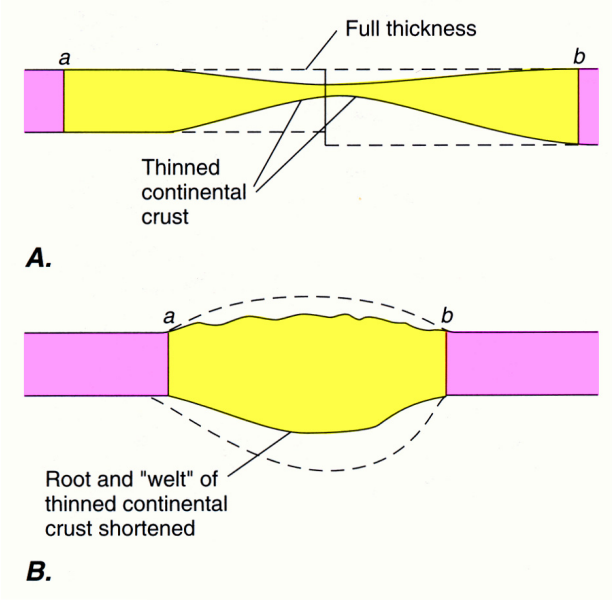


Εικόνα 7.31 *Σχηματικές ισορροπημένες τομές (balanced cross sections), που παρουσιάζουν την ανάπτυξη ηπειρωτικής ρίζας από σύγκλιση και σύγκρουση. Η συνολική έκταση της τομής ανάμεσα στα σημεία a και b, παραμένει σταθερή.* ***A.*** *Η διάταξη πριν από τη σύγκρουση.* ***B.*** *Η διάταξη κατά τη σύγκρουση.* ***C.*** *Η διάταξη μετά από επιπρόσθετη σύγκλιση και δημιουργία ρίζας.*

βράχυνσης που έλαβε χώρα, όπως σχηματικά παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.31. Η συνολική έκταση του φλοιού ανάμεσα στα σημεία a και b, παραμένει η ίδια. Η Εικόνα 7.31A παρουσιάζει δύο ηπείρους να συγκλίνουν. Η Εικόνα 7.31B παρουσιάζει την έναρξη της σύγκρουσης και η 7.31C, το στάδιο μετά την ολοκλήρωση της σύγκρουσης, με τον παχυμένο φλοιό να σχηματίζει μια κατερχόμενη ρίζα και μια ανυψωμένη επιφάνεια. Για να σχηματισθεί μια ρίζα ο ρυθμός πάχυνσης ή σύγκλισης πρέπει να είναι γρήγορος, σε σύγκριση με τον ρυθμό που λαμβάνει χώρα η διάβρωση ή η πλαστική κατάρρευση. Βεβαίως κάθε πραγματική περιοχή με παχυμένο φλοιό, ρίζα που εισέρχεται στον μανδύα και τοπογραφική ανύψωση, πρέπει να είναι ομαλότερη από αυτή της Εικόνας 7.31C, εξ' αιτίας: της διάβρωσης του ανυψωμένου τμήματος, των επωθήσεων και στις δύο πλευρές της ανύψωσης (με φορά προς τα εξω), αλλά και την πλαστική παραμόρφωση στα βαθύτερα τμήματα. Επιπρόσθετα, αν η όλη διαδικασία της σύγκρουσης συνοδεύεται και από σημαντικά φαινόμενα δράσης ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης (όπως π.χ. στην κεντρική Ασία), μπορεί να μετακινείται υλικό πλευρικά και ως εκ τούτου η πάχυνση του φλοιού θα αντιστοιχεί σε έναν μίνιμουμ υπολογισμό της βράχυνσης.

Σε ορισμένες οροσειρές, όπως στις Άλπεις, το ποσό της βράχυνσης που έχει υπολογισθεί από ισορροπημένες τομές (balanced cross sections), υπερβαίνει αυτό που υπολογίζεται από μια τομή στην περιοχή της ρίζας της οροσειράς. Με άλλα λόγια, το πάχος του φλοιού δεν είναι τόσο μεγάλο όσο θα έπρεπε να είναι, αν ένας ηπειρωτικός φλοιός με κανονικό πάχος βραχυνόταν με το ποσοστό που καταδεικνύεται από τα ιζήματα. Η κίνηση κατά μήκος ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης, που μεταφέρει υλικό προς τα έξω, μπορεί να είναι η αιτία αυτής της ανακολουθίας.

Μια εναλλακτική εξήγηση για την ανακολου-



Εικόνα 7.32 *Σχηματικές ισορροπημένες τομές που αναπαριστούν συγκριτικά το φαινόμενο της δημιουργίας ρίζας, λόγω της σύγκρουσης δύο εκλεπτυσμένων ηπειρωτικών περιθωρίων (συνεχής γραμμή), ή δύο κανονικού πάχους περιθωρίων (διακεκομμένη γραμμή). Κατακόρυφη κλίμακα χωρίς παραμόρφωση. Το προφίλ των περιθωρίων πάρθηκε από αυτά της Ερυθράς Θάλασσας (Εικ. 4.17).* ***A.*** *Το στάδιο κατά τη σύγκρουση.* ***B.*** *Το στάδιο μετά τη σύγκρουση και τη δημιουργία ρίζας. Η συνολική έκταση του φλοιού ανάμεσα στα σημεία a και b, παραμένει σταθερή.*

θία αυτή, αποτελεί και η περίπτωση όπου τα συγκρουόμενα ηπειρωτικά περιθώρια μπορεί να είναι λεπτότερα από το κανονικό. Μπορεί η εκλέπτυνση αυτή να έχει τεκτονικά αίτια (πιθανά από λιστρικά, κανονικά ρήγματα), που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της ηπειρωτικής ταφρογένεσης. Η Εικόνα 7.32 της προηγούμενης σελίδας, παρουσιάζει σχηματικά αυτή την περίπτωση. Με διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζεται η πάχυνση του φλοιού λόγω της βράχυνσης στην περίπτωση που τα ηπειρωτικά περιθώρια είχαν το κανονικό πάχος και με συνεχή, όταν αυτά είναι εκλεπτυσμένα.

7.6 Μοντέλα για την Τοποθέτηση των Οφιολίθων

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 7.1, οι ζώνες των οφιολίθων θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν συρραφές (sutures) από σύγκρουση, όπου πρώην ωκεάνιες λεκάνες υποβυθίζονται και υπολείμματα του ωκεάνιου φλοιού επωθούνται στον κατερχόμενο ηπειρωτικό φλοιό. Το γεγονός ότι αυτές οι ζώνες είναι αρκετά διαδεδομένες (βλπ. Εικ. 7.4), καταδεικνύει, όπως αναφέρθηκε, ότι ένας μεγάλος αριθμός συγκρούσεων έχει λάβει χώρα κατά το παρελθόν και άρα το φαινόμενο της σύγκρουσης αποτελεί μια πρώτης τάξης γεωτεκτονική διαδικασία. Οι οφιόλιθοι παρουσιάζονται είτε με διατηρημένη την πλήρη ακολουθία τους και τη σχέση ανάμεσα σους διάφορους τύπους των πετρωμάτων που τους απαρτίζουν (Εικ. 7.33), είτε ως διαμελισμένες λιθολογικές ακολουθίες σε συμπλέγματα υποβύθισης. Τα καλά διατηρημένα οφιολιθικά συμπλέγματα δεν περιλαμβάνουν πάντα την πλήρη ακολουθία πετρωμάτων, χαρακτηριστικό που μπορεί να αντανακλά είτε τεκτονικό διαμελισμό, είτε πρωτογενείς λιθολογικές διαφοροποιήσεις που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της δημιουργίας του συμπλέγματος.

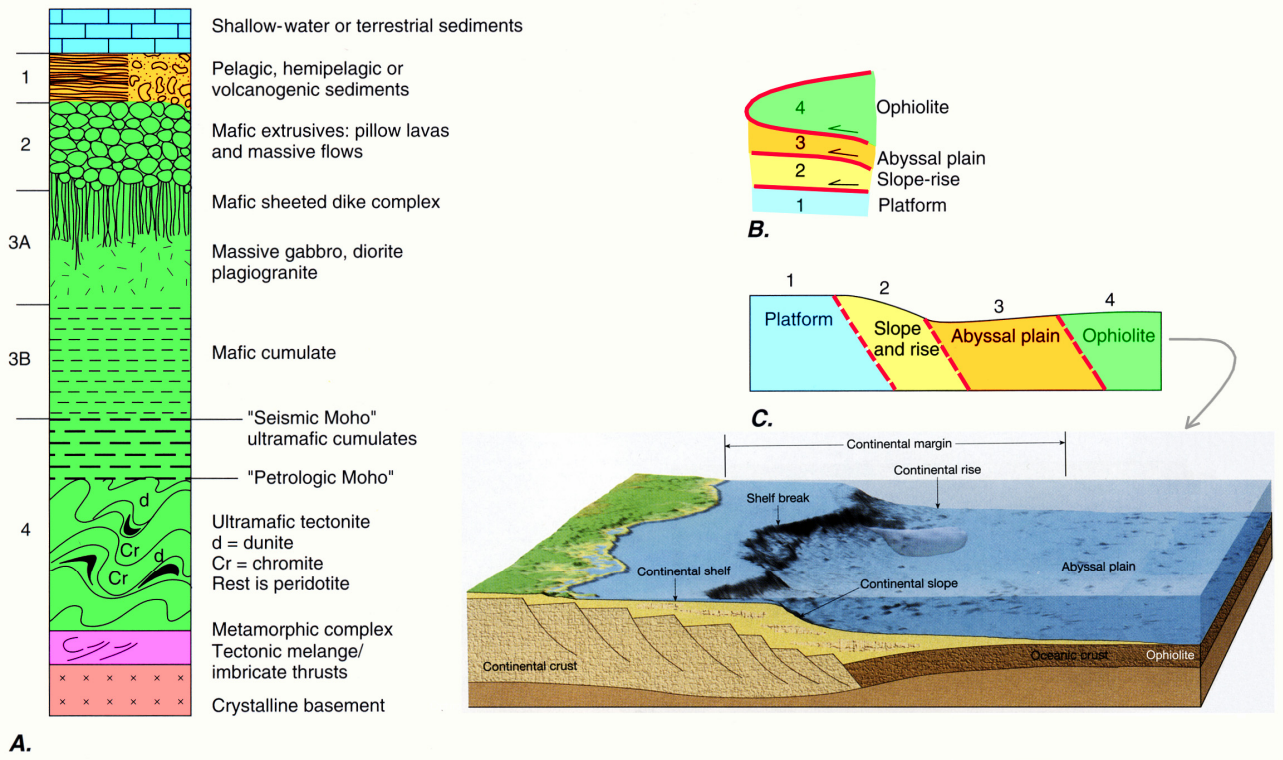
Οι διαδικασίες και οι μηχανισμοί τοποθέτησης των οφιολίθων αποτελούν ένα σημαντικό ζήτημα στην τεκτονική. Οι διαμελισμένες λιθολογίες των οφιολιθικών συμπλεγμάτων στις ζώνες υποβύθισης, προφανώς είναι τοποθετημένες ως τεκτονικά λέπη (tectonic slices) ή τεκτονικά μίγματα (mélanges), κατά τη διάρκεια της υποβύθισης της ωκεανκής λιθόσφαιρας. Η τοποθέτηση, όμως, καλά διατηρημένων συμπλεγμάτων, που περιλαμβάνουν το σύνολο σχεδόν της οφιολιθικής ακολουθίας, αποτελεί ένα τεκτονικό πρόβλημα μεγάλης σημασίας, που βρίσκεται υπό συζήτηση.

Πολλοί οφιόλιθοι είναι τεκτονικά τοποθετημένοι πάνω σε φλοιό νησιωτικού τόξου ή σε ηπειρωτικό φλοιό, με τη χαρακτηριστική παρουσία ενός λεπτού στρώματος από αμφιβολίτες στη βάση τους. Τα συμπλέγματα που σχετίζονται με ηπειρωτικό φλοιό είναι τεκτονικά τοποθετημένα πάνω από πετρώματα της κρηπίδας και των κλιτύων, κατά μήκος μικρής γωνίας ρηγμάτων με κατάκλιση προς το εσωτερικό της ηπείρου (Εικ. 7.33B και 7.33C). Στον ωκεάνιο πυθμένα τα ιζήματα αυτά της κρηπίδας και των κλιτύων έχουν την διευθέτηση που παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.33C. Ακριβώς κάτω από τα συμπλέγματα των οφιολίθων, τα ιζήματα αυτά σχηματίζουν μια τεκτονική στοίβα από τεκτονικά λέπη, όπου οι φάσεις των βαθιών ιζημάτων είναι επωθημένες πάνω σε αυτές των ρηχών (Εικ. 7.33B). Επίσης, πολλά οφιολιθικά συμπλέγματα καλύπτονται με ασυμφωνία από ιζήματα ρηχής θάλασσας ή χερσαία ιζήματα (Εικ. 7.33A). Στην ιδανική περίπτωση, η στρωματογραφία που σχετίζεται με τα οφιολιθικά συμπλέγματα, μπορεί να δώσει το χρονικό πλαίσιο της τεκτονικής τοποθέτησής τους, διότι αυτή πρέπει να έχει λάβει χώρα μετά από την ηλικία των νεώτερων ιζημάτων που εμπλέκονται στο σύστημα τεκτονικών λεπών της βάσης και πριν από την απόθεση των ασύμφωνων, ρηχής θάλασσας ή χερσαίων, ιζημάτων στην κορυφή του συμπλέγματος.

Πολλές επιστημονικές διαμάχες υπάρχουν σχετικά με τους μηχανισμούς που διέπουν την τοποθέτηση των οφιολίθων στον ηπειρωτικό φλοιό. Τέσσερα μοντέλα έχουν προταθεί για το λόγο αυτό.

Το πρώτο μοντέλο υποστηρίζει ότι οι οφιόλιθοι τοποθετούνται τεκτονικά σε ένα παθητικό ηπειρωτικό περιθώριο, κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης του παθητικού ηπειρωτικού περιθωρίου με μια ζώνη υποβύθισης. Μια ζώνη υποβύθισης που βρίσκεται στα αρχικά στάδια δεν θα έχει δώσει ακόμα τόξο, σε αντίθεση από μια ώριμη ζώνη που θα χαρακτηρίζεται από ένα υπαρκτό νησιωτικό τόξο, αναπτυγμένο πάνω από αυτή (Εικ. 7.34). Σε κάθε περίπτωση η διαδικασία της υποβύθισης συνεχίζεται μέχρι η ήπειρος να προσεγγίσει τη ζώνη υποβύθισης. Το παθητικό περιθώριο της ηπείρου αρχίζει να υποβυθίζεται μέχρι η άντωση του ηπειρωτικού φλοιού να αναστείλει την υποβύθιση (Εικ. 7.34A). Τότε λαμβάνει χώρα ισοστατική επανόρθωση και η ήπειρος (μαζί με το περιθώριο) επανέρχεται προς τα πάνω ανυψωνόμενη παίρνοντας μαζί της και ένα τμήμα από την επωθούμενη πλάκα, δηλαδή την οφιολιθική ακολουθία (Εικ. 7.34B).

Το δεύτερο μοντέλο προτείνει ότι μια οφιολιθική ακολουθία τοποθετείται τεκτονικά σε ένα ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο, κάτω από το οποίο ο ωκεάνιος φλοιός υποβυθίζεται (Εικ. 7.35), με μια διαδικασία που είναι γνωστή με το όνομα obduction (ένα είδος αντίθετης επώθησης). Στο μοντέλο αυτό ένα τμήμα της κατερχόμενης ωκεάνιας πλάκας αποκολλάται (Εικ. 7.35A), προφανώς κατά μήκος μιας προϋπάρχουσας ασυνέχειας όπως ένα

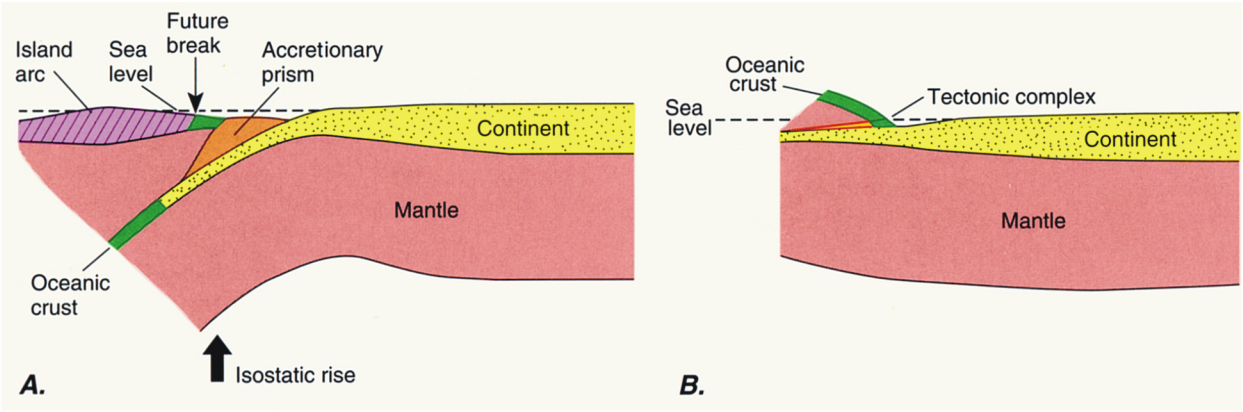


Εικόνα 7.33 *Το γεωδυναμικό περιβάλλον μιας οφιολιθικής ακολουθίας.* ***Α.*** *Ένα οφιολιθικό σύμπλεγμα σε πλήρη ανάπτυξη (1 έως 4), που στη βάση περιλαμβάνει ένα κρυσταλλικό υπόβαθρο με ιζήματα πλατφόρμας, μια παραμορφωμένη ιζηματογενή ακολουθία, ένα τεκτονικό mélange και μεταμορφωμένα πετρώματα, ενώ στην οροφή με ασυμφωνία κάθονται ιζήματα ρηχής θάλασσας. Παρουσιάζονται επίσης η σεισμολογική και πετρολογική Moho (βλπ. Κεφ. 4.5, Εικ. 4.31).* ***Β.*** *Τυπική τεκτονική στοίβα τεκτονικών σφηνών και λεπών από διαφορετικούς παλαιογεωγραφικούς χώρους, κάτω από ένα οφιλιθικό σύμπλεγμα.* ***C.*** *Η αρχική διάταξη των παλαιογεωγραφικών περιβαλλόντων που δημιουργούν την τεκτονική στοίβα.*

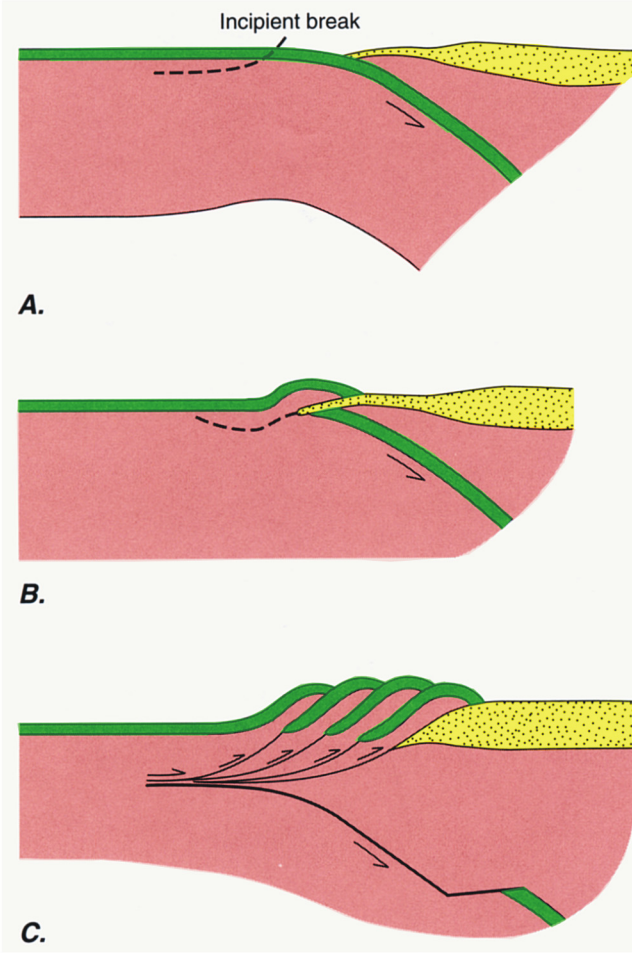
ρήγμα, ή κατά μήκος του άξονα μιας ράχης, και επωθείται πάνω στο ηπειρωτικό περιθώριο, κατά τη διάρκεια που το υπόλοιπο τμήμα της ωκεάνιας πλάκας συνεχίζει να υποβυθίζεται (Εικ. 7.35Β). Δηλαδή με άλλα λόγια, το ηπειρωτικό περιθώριο επωθείται πάνω στον ωκεάνιο φλοιό της υποβυθιζόμενης πλάκας (Εικ. 7.35Α), ένα τμήμα του οποίου (ωκεάνιου φλοιού) αποκολλάται και με αντίθετη επώθηση (obduction), τοποθετείται πάνω στο ηπειρωτικό περιθώριο (Εικ. 7.35Β). Η επιφάνεια συνέχειας, το ρήγμα δηλαδή, που γίνεται αυτή η κίνηση, είτε πρέπει να κάμπτεται και να βγαίνει στην επιφάνεια του θαλάσσιου πυθμένα (Εικ. 7.35Β), είτε τεκτονικές οφιολιθικές σφήνες συναθροίζονται σε μια στοίβα από τεκτονικά λέπη (Εικ. 7.35C).

Το τρίτο και τέταρτο μοντέλο υποθέτουν την τοποθέτηση των οφιολιθικών συμπλεγμάτων σε ενεργά συγκλίνοντα ηπειρωτικά περιθώρια με δύο διαφορετικές διαδικασίες βαρυτικής ολίσθησης, καμία από τις οποίες, όμως, δε φαίνεται ικανή να ερμηνεύσει την τοποθέτηση των καλά διατηρημένων οφιολιθικών ακολουθιών (Εικ. 7.36). Η Εικόνα 7.36Α παρουσιάζει ένα πιθανό μοντέλο όπου ένα τμήμα του φλοιού της κατερχόμενης πλάκας αποκολλάται από την εξωτερικότερη περιοχή όπου αυτή είναι διογκωμένη (αναθολωμένη) και ολισθαίνει προς την τάφρο αλλά και το ηπειρωτικό περιθώριο. Το εναλλακτικό μοντέλο (Εικ. 7.36Β) προτείνει την ανάπτυξη μιας ανύψωσης (αναθόλωσης), κατά μήκος των παρυφών της εφιππεύουσας πλάκας, πιθανά λόγω διαπειρικής δραστηριότητας. Η επακόλουθη βαρυτική κατάρρευση της αναθόλωσης αυτής αποσπά ένα τμήμα ωκεάνιου φλοιού και το μετακινεί πάνω στο ηπειρωτικό περιθώριο.

Όλα αυτά τα μοντέλα της τοποθέτησης των οφιολιθικών ακολουθιών, παρουσιάζουν εκ διαμέτρου αντίθετες τεκτονικές εκδοχές. Το μοντέλο της σύγκρουσης θεωρεί ότι, επειδή η υποβύθιση διακόπτεται από τη σύγκρουση, αυτό έχει ως επακόλουθο και μια μεγάλης κλίμακας αναδιοργάνωση στην κίνηση των πλακών. Τα άλλα τρία μοντέλα, όμως, δεν προϋποθέτουν τόσο μεγάλης κλίμακας αλλαγές. Δεν είναι ξεκάθαρο ωστόσο, ότι η τοποθέτηση με βαρυτική μετακίνηση, μπορεί να ωθήσει τμήματα του ωκεάνιου φλοιού τόσο μακριά μέσα στην ήπειρο. Ένα τέτοιο μοντέλο βαρυτικής ολίσθησης μπορεί να είναι πειστικό, μόνο όταν η ανύψωση (αναθόλωση), είναι αρκετά μεγάλη και συνοδεύεται

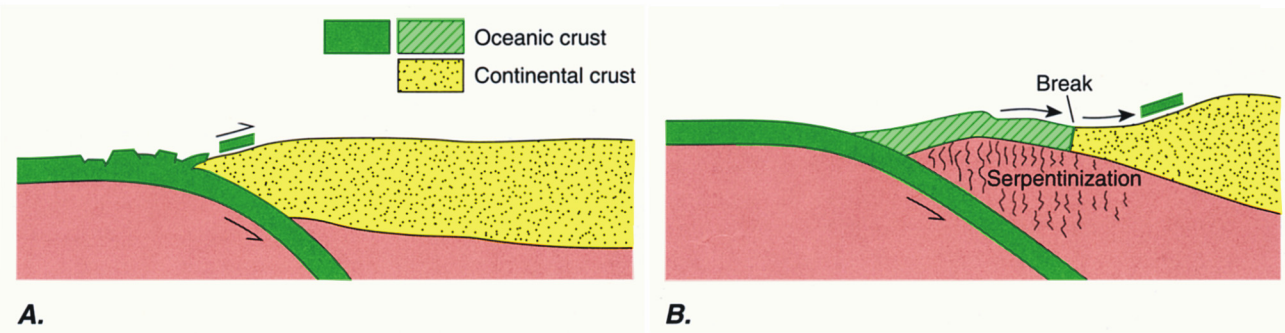


Εικόνα 7.34 *Τομές που παρουσιάζουν την τοποθέτηση οφιολίθων από σύγκρουση ηπειρωτικού περιθωρίου με ζώνη υποβύθισης (σύγκριση με Εικ. 7.3Α).* ***Α.*** *Το ηπειρωτικό περιθώριο με το που αρχίζει να υποβυθίζεται διακόπτει τη διαδικασία και στη συνέχεια ανυψώνεται ισοστατικά.* ***Β.*** *Διαχωρισμένα τμήματα της ωκεανικής λιθόσφαιρας παρουσιάζονται ως οφιολιθικό σύμπλεγμα. Τα υπολείμματα του πρίσματος συσσώρευσης αποτελούν ένα τεκτονικό σύμπλεγμα (tectonic complex).*



Εικόνα 7.35 *Τομές που παρουσιάζουν την τοποθέτηση οφιολίθων με obduction, σε ένα ηπειρωτικό περιθώριο μιας εφιππεύουσας πλάκας.* ***Α.*** *Η αρχική διαμόρφωση.* ***Β.*** *Τοποθέτηση με obduction αν το ρήγμα κάμπτεται και ξαναβγαίνει στην επιφάνεια.* ***C.*** *Ακολουθία επωθήσεων και τοποθέτηση με στοίβα τεκτονικών λεπών, στην περίπτωση που το ρήγμα κλίνει προς τον μανδύα.*

Εικόνα 7.36 *Δύο μοντέλα που υποστηρίζουν την τοποθέτηση των οφιολίθων με βαρυτική ολίσθηση.* ***Α.*** *Ολίσθηση πάνω στο ηπειρωτικό περιθώριο από μία εξωτερικότερη διόγκωση (αναθόλωση) του ωκεάνιου φλοιού.* ***Β.*** *Βαρυτική κατάρρευση ενός τοπογραφικού εξογκώματος, που προκλήθηκε από διαπειρική ανύψωση πάνω από τη ζώνη υποβύθισης. Επισημαίνεται το παράδοξο ότι οι οφιόλιθοι πρέπει να ολισθήσουν σε υψόμετρο που υπερβαίνει το υψόμετρο της περιοχής προέλευσής τους.*



από μια επαρκή κλίση των κλιτύων προς τη μεριά της ηπείρου, ώστε να μπορούν να λειτουργήσουν οι επωθητικές κινήσεις. Πολλά οφιολιθικά συμπλέγματα παρουσιάζουν πάχος της τάξης των 10 km και περιλαμβάνουν μη σερπεντινιωμένο, μανδυακής προέλευσης, περιδοτίτη. Ως εκ τούτου λοιπόν είναι δύσκολο να έχουν τοποθετηθεί με απλή βαρυτική κατάρρευση. Και τα δύο σχήματα της Εικόνας 7.36 υποστηρίζουν την παθητική (βαρυτική), επώθηση προς το εσωτερικό της ηπείρου σε κλιτείς, που σε υψόμετρο υπερβαίνουν αυτό του ανυψωμένου τμήματος του ωκεάνιου φλοιού, απ' όπου αποσπάσθηκαν, κάτι το οποίο φαίνεται αδύνατο.

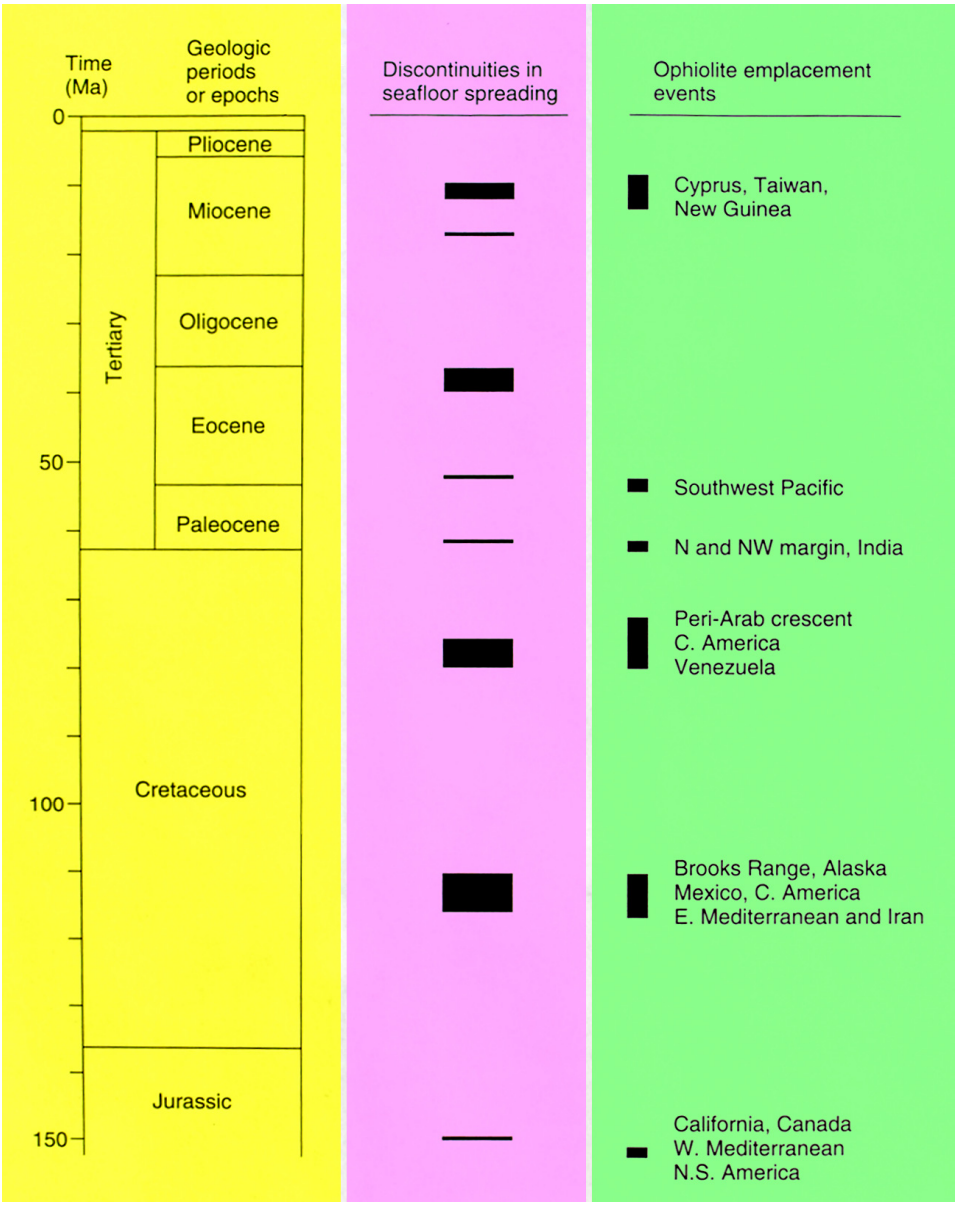
Το μοντέλο που ερμηνεύει την τοποθέτηση των οφιολίθων βασιζόμενο στο φαινόμενο της σύγκρουσης, παρουσιάζει τα πιο καλά τεκμηριωμένα σύγχρονα ανάλογα. Όλες οι περιπτώσεις του ΝΔ Ειρηνικού και της ανατολικής Μεσογείου, που συζητήθηκαν στα Κεφάλαια 7.2 και, 4.5 και 5.2 αντίστοιχα –Νέα Γουινέα, Ταϊβάν, Salawesi, Sangihe-Halmahera, Κύπρος– αποτελούν περιπτώσεις όπου ωκεάνιος φλοιός έχει τοποθετηθεί, ή μόλις αρχίζει να τοποθετείται, πάνω σε ένα ηπειρωτικό περιθώριο, λόγω της σύγκρουσης του περιθωρίου με μια ζώνη υποβύθισης. Σε αυτές τις περιπτώσεις και η χημεία των οφιολιθικών πετρωμάτων υποστηρίζει την προέλευση από μια θέση που βρίσκεται πάνω από μια ζώνη υποβύθισης.

Το μοντέλο που υποστηρίζει την τοποθέτηση λόγω obduction, μπορεί να ισχύει όταν προϋπάρχοντα ρήγματα στον ωκεάνιο φλοιό της κατερχόμενης πλάκας, μετατρέπονται σε επωθητικά ρήγματα καθώς η πλάκα πλησιάζει την τάφρο. Οι οφιόλιθοι που έχουν τοποθετηθεί με αυτό τον τρόπο πρέπει να έχουν μια χημική σύσταση που να καταδεικνύει προέλευση από μεσο-ωκεάνια ράχη. Ξεκάθαρα παραδείγματα τοποθέτησης οφιολίθων με αυτό το μηχανισμό είναι πολύ λίγα και σε περιορισμένη έκταση. Στην πραγματικότητα είναι γνωστά μόνο δύο τέτοια παραδείγματα και πιο συγκεκριμένα οι πλειοκαινικοί οφιόλιθοι Taitao στη Νότια Χιλή και οι τριτογενείς οφιόλιθοι του Resurrection Bay στην Αλάσκα, που δείχνουν να έχουν τοποθετηθεί με αυτό το μηχανισμό. Άρα λοιπόν, με βάση τα όσο έχουν γίνει γνωστά μέχρι σήμερα, η τοποθέτηση των οφιολίθων λόγω σύγκρουσης, φαίνεται να είναι ο πιο συνήθης μηχανισμός.

Το μοντέλο της σύγκρουσης προϋποθέτει ότι η κύρια επώθηση της βάσης των οφιολίθων, πρέπει να αντιπροσωπεύει μια απολιθωμένη ζώνη υποβύθισης. Εάν όντως συμβαίνει αυτό, τα μεταμορφωμένα πετρώματα που παρατηρούνται στη βάση πολλών οφιλιθικών συμπλεγμάτων, πρέπει να αντιπροσωπεύουν πετρώματα που έχουν σχηματισθεί ή και διατηρηθεί σε ένα σύμπλεγμα υποβύθισης. Άρα λοιπόν, οι κύριες επωθήσεις της βάσης των οφιλιθικών συμπλεγμάτων αποτελούν σημαντική τεκτονική δομή σε όλες τις παραμορφωμένες ορογενετικές ζώνες. Οι μετατοπίσεις τους πρέπει να είναι πολύ μεγάλες, αλλά δυστυχώς δύσκολα προσδιορίσιμες, διότι δεν είναι γνωστό πόσο διήρκεσε η υποιβύθιση πριν λάβει χώρα η σύγκρουση. Επιπρόσθετα, εξ' αιτίας μιας υπαρκτής, αλλά απροσδιόριστης, ποσότητας της κατερχόμενης πλάκας, που, μαζί με τα υπερκείμενά της ιζήματα, έχει εξαφανισθεί βαθειά στη ζώνη υποβύθισης, οι βασικές αυτές οφιλιθικές επωθήσεις είναι αδύνατο να εκτιμηθούν και να ισορροπηθούν (balanced), πίσω στην αρχική τους θέση.

Συγκρούσεις που οδηγούν στην τοποθέτηση οφιολίθων μπορούν να συμβούν και ανάμεσα σε ένα νησιωτικό τόξο και μια ζώνη υποβύθισης (βλπ. Εικ. 7.3D), ή ανάμεσα σε ένα ηπειρωτικό περιθώριο και μια ζώνη υποβύθισης (βλπ. Εικ. 7.3B). Αυτές οι ζώνες υποβύθισης μπορεί να βρίσκονται στο μέσον του ωκεανού και μακριά από το περιθώριο κάποιας άλλης ηπείρου. Ως εκ τούτου λοιπόν, αυτές οι συγκρούσεις σε γενικές γραμμές λαμβάνουν χώρα πριν από την τελική σύγκρουση ηπείρου με ήπειρο, που σφραγίζει και το οριστικό κλείσιμο της ωκεάνιας λεκάνης. Οι σύγχρονες συγκρούσεις των περιθωρίων της Κίνας και της Αυστραλίας με ζώνες υποβύθισης, δεν προϋποθέτουν σύγκρουση ηπείρου με ήπειρο. Με άλλα λόγια, οι διαδικασίες τοποθέτησης οφιολίθων σε μια δεδομένη ορογενετική ζώνη, μπορεί να παρέχουν ενδείξεις για αλληλεπίδραση των πλακών, πριν από την τελική σύγκρουση ηπείρου με ήπειρο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, όλες οι τοποθετήσεις οφιολίθων έχουν ένα τμήμα της ιστορίας τους που σχετίζεται με δραστηριότητα τόξου, η έκταση της οποίας διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση και εξαρτάται από το ποσοστό της υποβύθισης πριν από τη σύγκρουση.

Το βασικό ερώτημα που τίθεται είναι "τι επιπτώσεις έχουν στο ευρύτερο καθεστώς της τεκτονικής των πλακών, τα τεκτονικά γεγονότα τοποθέτησης των οφιολιθικών ακολουθιών;" Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, μια από τις κυρίαρχες δυνάμεις για την κίνηση των πλακών φαίνεται ότι είναι η βύθιση της κατερχόμενης πλάκας. Αν η τοποθέτηση των οφιολίθων είναι το αποτέλεσμα της σύγκρουσης μη υποβυθιζόμενων ηπειρωτικών περιθωρίων με ζώνες υποβύθισης, τέτοια γεγονότα μπορεί να διακόπτουν την ομαλή κίνηση των πλακών. Άρα λοιπόν, οι περίοδοι που λαμβάνουν χώρα μεγάλες τοποθετήσεις οφιολίθων, μπορεί να αντιστοιχούν σε περιόδους μεταβολής της συμπεριφοράς των πλακών σε παγκόσμια κλίμακα. Στην Εικόνα 7.37, παρουσιάζεται ένας συσχετισμός ανάμεσα σε μεγάλα τεκτονικά γεγονότα τοποθέτησης οφιολίθων και σε περιόδους μεταβολής του ρυθμού της ωκεανικής διάνοιξης, όπως αυτή αντανακλάται



Εικόνα 7.37 *Διάγραμμα που παρουσιάζει το χρονικό συσχετισμό ανάμεσα στις κύριες περιόδους τεκτονικής τοποθέτησης οφιολιθικών συμπλεγμάτων και τις ασυνέχειες στο ρυθμό διάνοιξης του θαλάσσιου πυθμένα, όπως προκύπτουν από τη μελέτη των μαγνητικών ανωμαλιών. Σε μια πρώτη προσέγγιση και παρότι τα δεδομένα της χρονικής τοποθέτησης των οφιολίθων είναι ελλιπή και ανακριβή, ένας συσχετισμός φαίνεται ότι υπάρχει.*

στις μαγνητικές ανωμαλίες. Σε μια πρώτη προσέγγιση φαίνεται ότι υπάρχει ένας συσχετισμός ανάμεσα σε αυτά τα δύο φαινόμενα. Τα δεδομένα όμως για τη χρονική τοποθέτηση των οφιολίθων είναι ακόμα ελλιπή και ανακριβή, γεγονός που κάνει δύσκολη τη διατύπωση βέβαιων συμπερασμάτων από αυτή τη φανερή συσχέτιση.

7.7 Ζώνες Συρραφής (Suture Zones): Ένδειξη για Παλαιά Όρια Πλακών

Οι ζώνες συρραφής (sutures), αντιπροσωπεύουν όρια ανάμεσα σε μεγάλης κλίμακας ρηξιτεμάχη του φλοιού, που ανήκαν σε δύο διαφορετικές τεκτονικές πλάκες και ήρθαν σε επαφή λόγω των κινήσεων των πλακών. Η αναγνώριση των ζωνών συρραφής από τα γεωλογικά δεδομένα στις ηπείρους, είναι στοιχείο που σχετίζεται με τη δυνατότητα ανακατασκευής της τεκτονικής ιστορίας της γήινης σφαίρας, για χρονικές περιόδους παλαιότερες από την ηλικία των ωκεάνιων λεκανών.

Σε γενικές γραμμές μια ζώνη συρραφής (suture), δεν αντιπροσωπεύεται από ένα μοναδικό ρήγμα ή επίπεδο, αλλά αποτελεί μια σύνθετη ζώνη παραμόρφωσης, με πλάτος αρκετών χιλιομέτρων, που χωρίζει δύο τεμάχη του φλοιού. Μια ζώνη συρραφής από σύγκρουση (collisional suture), σηματοδοτεί τη θέση μιας ωκεάνιας λεκάνης που υποβυθίστηκε και η οποία χώριζε τα δύο τεμάχη του φλοιού πριν από τη σύγκρουση. Ο φλοιός και από τις δύο πλευρές μιας τέτοιας ζώνης συρραφής μπορεί να προέρχεται από οποιοδήποτε από τα ζεύγη συγκρουσθέντων περιθωρίων (ηπειρωτικών ή νη-

σιωτικού τόξου), που παρουσιάσθηκαν στην Εικόνα 7.3. Τα επωθητικά ρήγματα είναι κυρίαρχα σε μια ζώνη συρραφής από σύγκρουση. Μια ζώνη συρραφής μετασχηματισμού (transform suture), αντιπροσωπεύεται από ένα απολιθωμένο ρήγμα μετασχηματισμού (fossil transform fault, βλπ. Κεφ. 5), κατά μήκος του οποίου διαφορετικά ρηξιτεμάχη του γήινου φλοιού έχουν έλθει σε επαφή. Ορισμένες ζώνες συρραφής χαρακτηρίζονται από μικτούς κινηματικούς χαρακτήρες, περιλαμβάνοντας και επωθητικές κινήσεις αλλά και κινήσεις οριζόντιας ολίσθησης.

Οι ζώνες συρραφής (sutures), μπορούν να αναγνωρισθούν είτε από τα γεωτεκτονικά χαρακτηριστικά των ίδιων των ορίων τους, είτε από την ύπαρξη μιας μεγάλης κλίμακας ασυνέχειας, εγκάρσια ως προς την οποία παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές στη λιθολογία, τη γεωλογική εξέλιξη, το στυλ της παραμόρφωσης, τα ανύσματα του παλαιομαγνητισμού ή την παρατηρούμενη πανίδα. Φυσικά, όσο πιο πολλές από αυτές τις αλλαγές παρατηρούνται ταυτόχρονα, τόσο πιο ισχυρές γίνονται και οι ενδείξεις για την ύπαρξη της ζώνης συρραφής.

Εγγενή Χαρακτηριστικά

Η ανάπτυξη μιας οφιολιθικής ζώνης ανάμεσα σε δύο ηπειρωτικά τεμάχη του φλοιού, αποτελεί τα υπολείμματα μιας πρώην ωκεάνιας λεκάνης που χώριζε τα δύο αυτά τεμάχη και αποτελεί την πιο άμεση ένδειξη για την ύπαρξη μιας ζώνης συρραφής από σύγκρουση (collisional suture, βλπ. Κεφ. 7.6). Άρα λοιπόν, όπως προαναφέρθηκε, οι οφιλιθικές ζώνες που παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.4, αντιπροσωπεύουν μεγάλες ζώνες συρραφής.

Μια ζώνη συρραφής που διασχίζει μια ήπειρο, ορισμένες φορές χαρακτηρίζεται από μια ζώνη τεκτονικού μίγματος (tectonic mélange), που μπορεί να αποτελεί τμήμα μιας ευρύτερης ζώνης παραμόρφωσης. Όπως συζητήθηκε στο Κεφάλαιο 6, η διάκριση ανάμεσα σε ένα melange τεκτονικής προέλευσης και σε ένα ιζηματογενούς προέλευσης, ορισμένες φορές είναι πολύ δύσκολη. Αν το melange είναι αποκλειστικά ιζηματογενές, θα έχει αναπτυχθεί από καθαρά ιζηματογενείς διαδικασίες, όπως το slumping, και ως εκ τούτου δεν θα έχει δημιουργηθεί σε μια ζώνη συρραφής.

Ορισμένες ζώνες melange, οφιολιθικές ή όχι, περιλαμβάνουν ιζήματα που δεν έχουν σχέση με καμιά από τις δύο πλευρές της ζώνης. Αυτά τα ιζήματα, προφανώς, έχουν δημιουργηθεί σε περιοχές μακριά από τα πετρώματα και των δύο πλευρών της ζώνης του melange και αποτελούν αποκολλημένα υπολείμματα που παγιδεύτηκαν στη ζώνη της σύγκρουσης. Άρα λοιπόν, τα ιζήματα αυτά υποδηλώνουν την εξαφάνιση μιας πλατιάς ωκεανικής περιοχής και καταδεικνύουν μια ζώνη συρραφής.

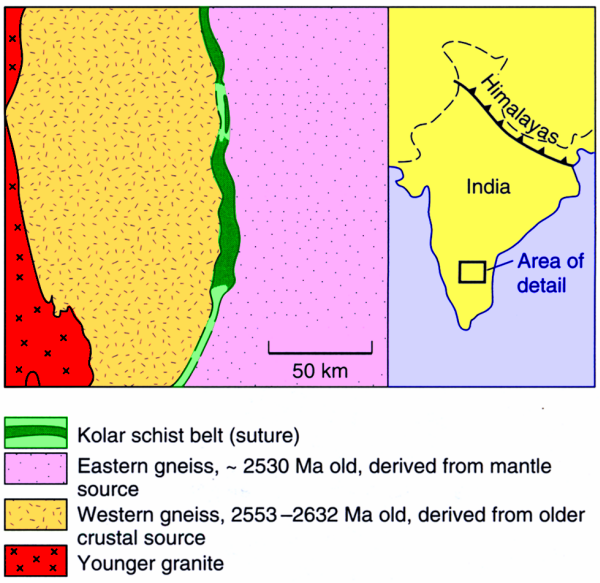
Ορισμένες ζώνες συρραφής χαρακτηρίζονται από μυλονιτικές ή όλκιμες ζώνες διάτμησης (mylonitic or ductile shear zones), αν και χωρίς την παρουσία και άλλων ενδείξεων, μια τέτοια ζώνη διάτμησης δεν υποδηλώνει υποχρεωτικά και την παρουσία μιας ζώνης συρραφής.

Η ζώνη συρραφής Indus-Tsangpo στην Ασία, αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τέτοιας ζώνης. Εκτείνεται σε μήκος 2.500 km κατά μήκος του βόρειου περιθωρίου των υψηλών Ιμαλαΐων και διαχωρίζει τα πετρώματα που ανήκουν στην Ινδική υποήπειρο από τα πετρώματα του Θιβέτ (Ασία, βλπ. Εικ. 7.15). Η ζώνη χαρακτηρίζεται από ένα τεκτονικό melange που περιλαμβάνει έναν αριθμό οφιολιθικών μεγα-τεμαχών, το μεγαλύτερο από τα οποία καταλαμβάνει μια έκταση 3.500 m^2, περίπου και αποτελείται από μια παχιά ακολουθία ωκεανικών ηφαιστειακών πετρωμάτων, που καλύπτονται από πελαγικά ιζήματα. Κατά μήκος της δυτικής απόληξής της, η ζώνη συρραφής διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους ζώνες, που περικλείουν μια εξωτική ακολουθία νησιωτικού τόξου, το Kohistan arc, που παγιδεύτηκε στη ζώνη σύγκρουσης της Ευρασίας με την Ινδία. Σημειώνεται ότι η ζώνη συρραφής είναι κατά τα φαινόμενα πτυχωμένη, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.15.

Γεωλογικές Ασυνέχειες

Αν τα τεμάχη του φλοιού διαχωρίζονται από ένα όριο εγκάρσια ως προς το οποίο παρατηρείται μια αξιοσημείωτη διαφορά στην στρωματογραφική ή τεκτονική εξέλιξη, ή μια ασυνέχεια στον προσανατολισμό ή το στυλ των τεκτονικών δομών, το όριο αυτό μπορεί να αντιπροσωπεύει μια ζώνη συρραφής, ιδίως αν αυτό χαρακτηρίζεται από υψηλή διάτμηση.

Για παράδειγμα, η ζώνη σχιστολίθων του Kolar στη νότια Ινδία (Εικ. 7.38), διαχωρίζει δύο προκάμβριες περιοχές με τελείως διαφορετικές ηλικίες αλλά και εντελώς διαφορετικά δεδομένα από τη μελέτη των ιχνοστοιχείων και των ισοτοπικών δεδομένων. Η ίδια η ζώνη του Kolar, αποτελεί μια ζώνη υψηλής παραμόρφωσης, με πολλαπλές φάσεις πτύχωσης, που αντανακλούν τόσο κινήσεις σύγκλησης όσο και οριζόντιας ολίσθησης. Τα διαφορετικά γεωχημικά χαρακτηριστικά των αμφιβολιτών και γνευσίων που αναπτύσσονται εκατέρωθεν της ζώνης αυτής, υποστηρίζουν την διαφορετική προέλευσή τους. Τα πετρώματα που αναπτύσσονται ανατολικά της ζώνης, μπορεί να προέρχονται από μανδυακής προέλευσης ανδεσίτες με υψηλή περιεκτικότητα σε Mg, σε αντίθεση με αυτά στα δυτικά που μπορεί να προέρχονται από μερική τήξη παλαιότερων πετρωμάτων του φλοιού. Άρα λοιπόν

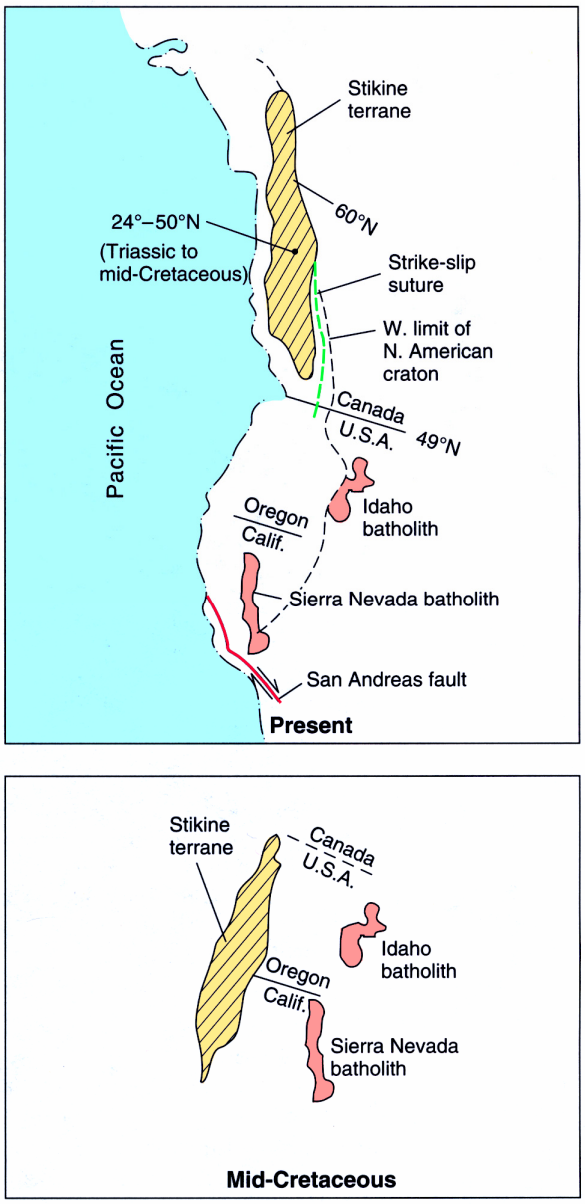


Εικόνα 7.38 *Απλοποιημένος χάρτης ενός τμήματος της Ινδικής ασπίδας, όπου παρουσιάζεται η ζώνη σχιστολίθων του Kolar, μια πιθανή ζώνη συρραφής, ανάμεσα σε δύο ενότητες γνευσίων. Οι ανατολικοί γνεύσιοι έχουν μια ηλικία 2.500 m.y. και μανδυακή προέλευση, σε αντίθεση με τους δυτικούς γνεύσιους, που είναι 2.553-2.632 ετών και προέρχονται από μερική τήξη ενός παλαιότερου ηπειρωτικού φλοιού.*

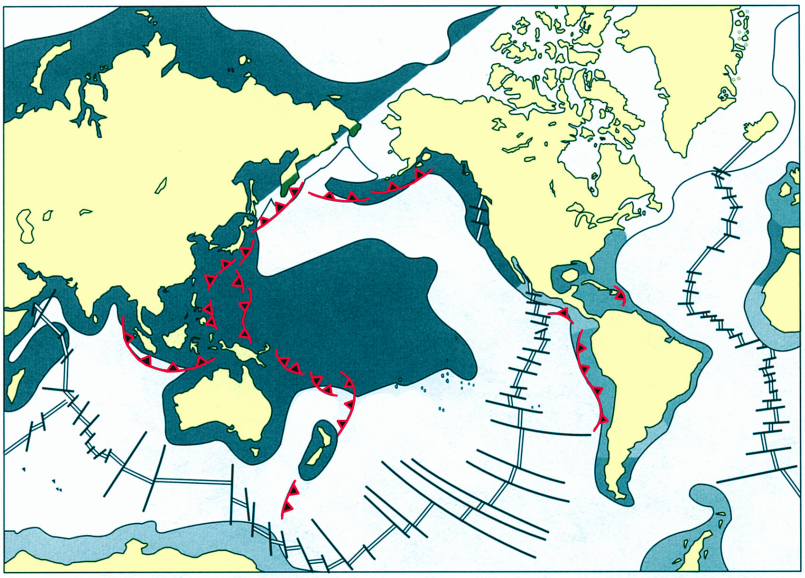
η ζώνη του Kolar μπορεί να αντιπροσωπεύει μια ζώνη συρραφής.

Οι ασύμφωνοι προσανατολισμοί των μαγνητικών αξόνων που προσδιορίζονται σε πετρώματα ίδιας ηλικίας, εγκάρσια σε μια ζώνη διάτμησης, μπορεί να καταδεικνύουν ότι τα τεμάχη του φλοιού ανήκαν σε πολύ απομακρυσμένες περιοχές και μεταγενέστερα ήλθαν σε επαφή κατά μήκος μιας ζώνης συρραφής. Το τεκτονοστρωματογραφικό πεδίο Stikine (Stikine terrane, βλπ. και Κεφ. 8), του δυτικού Καναδά, αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης (Εικ. 7.39). Παλαιομαγνητικές μετρήσεις σε μεσοζωϊκής ηλικίας πετρώματα του Stikine δείχνουν ότι πρωτογενώς αυτά αποτέθηκαν σε ένα γεωγραφικό πλάτος 1.300 km νοτιότερα από τη σημερινή τους θέση. Η προς Βορρά κίνηση, μπορεί να έλαβε χώρα κατά μήκος μιας σειράς ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης, που διαχώριζαν το Stikine terrane από τη Βόρεια Αμερική. Ως εκ τούτου λοιπόν το όριο ανάμεσα στο Stikine terrane και τη Βόρεια Αμερική πρέπει να αντιπροσωπεύει μια ζώνη συρραφής μετασχηματισμού (transform suture).

Σε ορισμένες περιπτώσεις οι ζώνες συρραφής μπορούν να επιβεβαιωθούν και από τις διαφορετικές συγκεντρώσεις απολιθωμάτων εκατέρωθεν ενός ορίου. Αυτό το κριτήριο, όμως, πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή, διότι πολλές διαφορές στην πανίδα ή την χλωρίδα προέρχονται αποκλειστικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τον πιο χρήσιμο τύπο πανίδας γι' αυτού του τύπου την ανάλυση, αποτελούν οι βενθονικοί τύποι της κρηπίδας, που παρουσιάζουν περιορισμένη κινητικότητα τόσο κατά το πρώιμο στάδιο όσο και κατά το στάδιο ενηλικίωσης. Χρησιμοποιώντας αυτό τον τύπο της



Εικόνα 7.39 *Η σχέση ανάμεσα στο τεκτονοστρωματογραφικό πεδίο του Stikine (Stikine terrane) του δυτικού Καναδά και το κρατονικό τέμαχος της Βόρειας Αμερικής. Τα γεωγραφικά πλάτη του Stikine terrane κατά το Μεσοζωικό βρίσκονται σε έντονη ασυμφωνία με αυτά της Βόρειας Αμερικής, καταδεικνύοντας ότι η θέση κατά το Μέσο Κρητιδικό βρισκόταν 1.300 km νοτιότερα της σημερινής. Επισημαίνεται ότι δεν έχουν ληφθεί υπόψη πιθανές περιστροφές.*

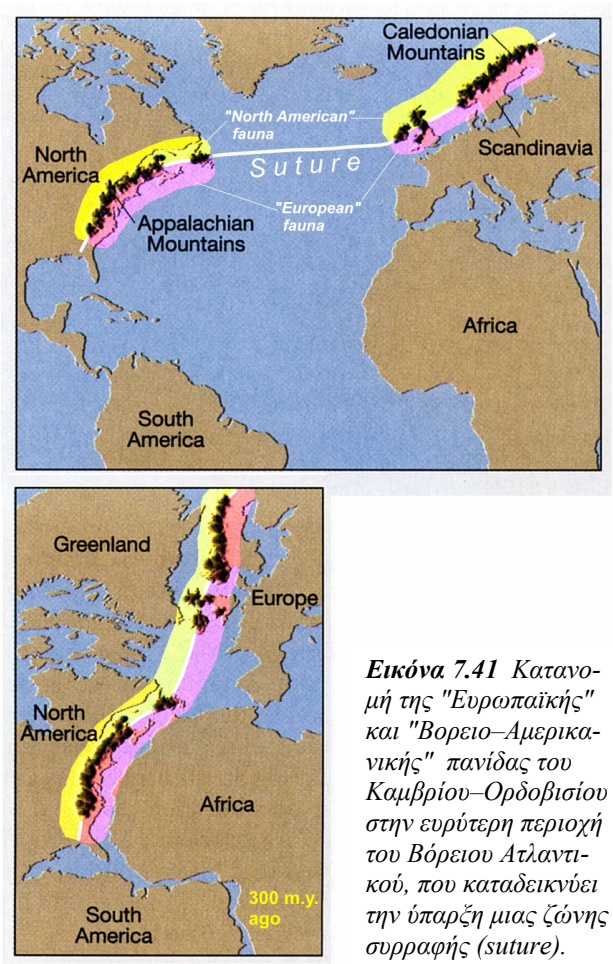


Εικόνα 7.40 *Παγκόσμιος χάρτης όπου παρουσιάζονται τα κύρια όρια των πλακών και οι ζωογεωγραφικές επαρχίες των βενθονικών απολιθωμάτων της κρηπίδας. Αξιοσημείωτη είναι η αχανής Ινδο-Ειρηνική επαρχία που εκτείνεται από την ανατολική Αφρική μέχρι τον κεντρικό Ειρηνικό. Η εικόνα παρουσιάζει επίσης την ευκολία εξάπλωσης της πανίδας κατά μήκος νησιωτικών αλυσίδων, που συνήθως αντιπροσωπεύουν νησιωτικά τόξα και τη δυσκολία εξάπλωσης εγκάρσια στα συστήματα ωκεανικής διάνοιξης και ρηγμάτων μετασχηματισμού.*

πανίδας σαν οδηγό, οι σύγχρονες ωκεάνιες περιοχές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε διακριτές επαρχίες (Εικ. 7.40). Οι ηπειρωτικές κρηπίδες, οι ζώνες υποβύθισης και οι ενδο-ωκεάνιες νησιωτικές αλυσίδες, συνιστούν διασκορπισμένες οδούς επικοινωνίας. Αντίθετα τα ενδοωκεάνια συστήματα ράχεων και ρηγμάτων μετασχηματισμού και σε κάποιο βαθμό οι κλιματικές ζώνες και οι μεγάλες ηπειρωτικές μάζες, αποτελούν φραγμό. Στη σημερινή εικόνα των ωκεανών, η Ινδο-Ειρηνική επαρχία της πανίδας, εκτείνεται από την ανατολική Αφρική έως τα Νησιά Tuamotu στον κεντρικό Ειρηνικό, καλύπτοντας μια απόσταση μεγαλύτερη από 10.000 km. Άλλες επαρχίες, όπως αυτή που περιβάλλει τη νότια απόληξη της Νότιας Αμερικής, έχουν πολύ πιο περιορισμένη έκταση.

Εφαρμόζοντας αυτά τα δεδομένα στο παρελθόν, εξάγεται το συμπέρασμα ότι δύο διαφορετικές βενθονικές πανίδες κρηπίδας, από ένα ομοειδές περιβάλλον, πρέπει να ευρίσκοντο σε απομακρυσμένες και χωριστές περιοχές κατά τη χρονική διάρκεια της απόθεσης. Αν αυτές οι πανίδες βρίσκονται σήμερα δίπλα η μία με την άλλη σε μια παραμορφωμένη περιοχή, μπορεί ανάμεσά τους να υπάρχει μια ζώνη συρραφής. Δύο ομοειδείς πανίδες, από την άλλη μεριά, πρωτογενώς μπορεί να βρίσκονται σε κοντινή ή μακρινή απόσταση. Γίνεται φανερό ότι είναι απαραίτητη η υποστήριξη και από άλλα γεωλογικά στοιχεία, που συνοδεύουν τα πετρώματα που βρίσκονται αυτές οι πανίδες, ώστε να εξαχθούν σωστά συμπεράσματα.

Οι πανίδες του Καμβρίου – Κατωτέρου Ορδοβισίου, που συναντώνται στο ορογενετικό σύστημα των Απαλαχίων και των Καλιδονίδων, παρέχουν ενδείξεις για την ύπαρξη μιας ζώνης συρραφής (Εικ. 7.41). Οι συγκεντρώσεις των απολιθωμάτων που παρατηρούνται εκατέρωθεν της ορογενετικής



Εικόνα 7.41 *Κατανομή της "Ευρωπαϊκής" και "Βορειο–Αμερικανικής" πανίδας του Καμβρίου–Ορδοβισίου στην ευρύτερη περιοχή του Βόρειου Ατλαντικού, που καταδεικνύει την ύπαρξη μιας ζώνης συρραφής (suture).*

ζώνης, είναι εντελώς διαφορετικές. Η πανίδα του Ανώτερου Ορδοβίσιου, όμως, δεν παρουσιάζει αυτή τη διαφορά, καταδεικνύοντας ότι το γεγονός της συρραφής έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια του Ορδοβίσιου. Το τεκτονικό αυτό γεγονός αντιστοιχεί στην τοποθέτηση οφιολιθικών συμπλεγμάτων κατά μήκος της οροσειράς των Απαλαχίων.