ΚΕΦΑΛΑΙΟ

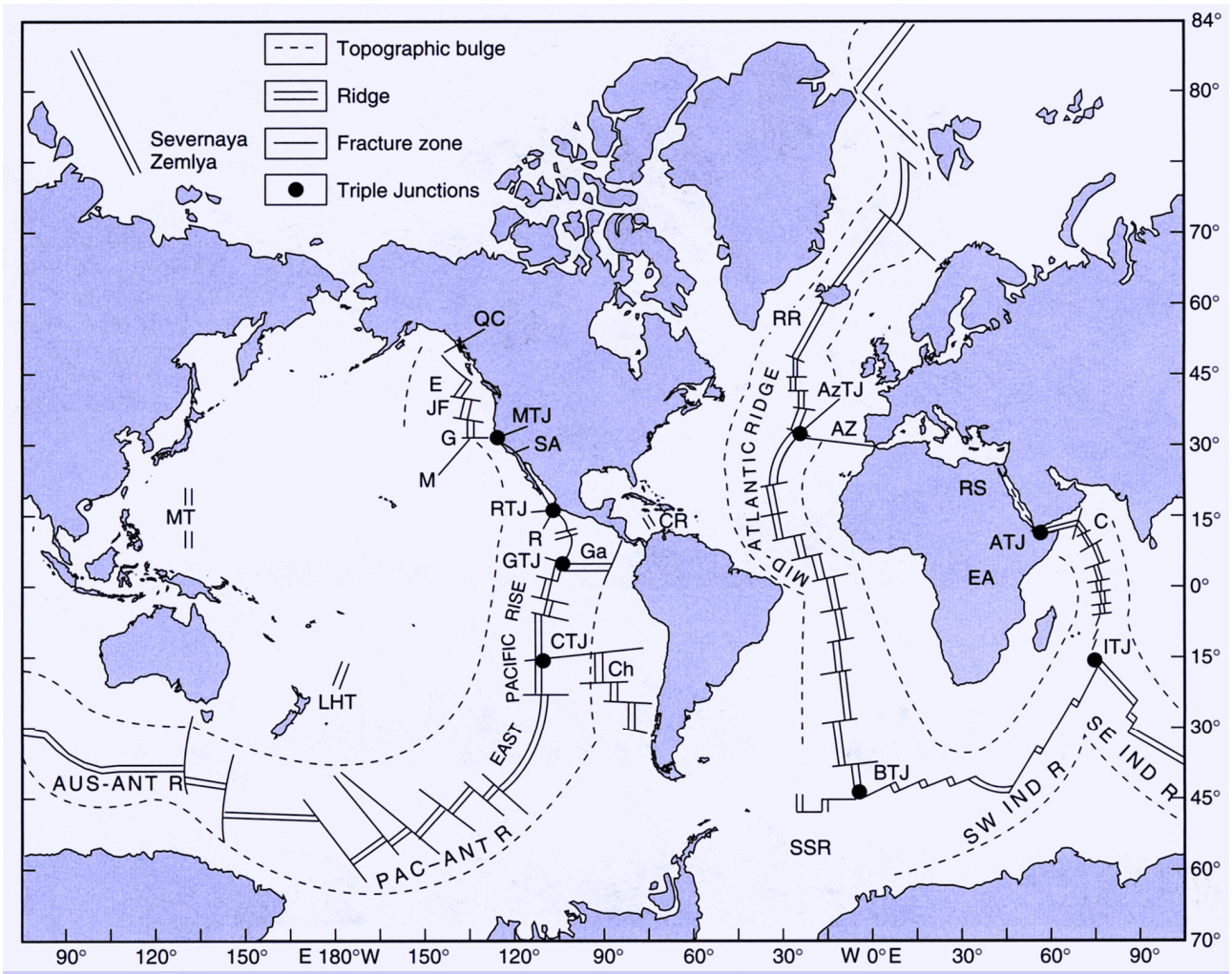
# 4 Αποκλίνοντα Περιθώρια – Ηπειρωτική Ταφρογένεση

## 4.1 Εισαγωγή

Τα αποκλίνοντα περιθώρια περιλαμβάνουν τόσο τα μεσο-ωκεάνια συστήματα διάνοιξης, όσο και τις ηπειρωτικές εκείνες περιοχές, που υπόκεινται σε σημαντικό εφελκυσμό και αποτελούν προέκταση ωκεάνιων συστημάτων διάνοιξης. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν τα τεκτονικά χαρακτηριστικά και η δομή των αποκλινόντων περιθωρίων, καθώς και οι γεωτεκτονικές διαδικασίες που χαρακτηρίζουν τη δημιουργία και εξέλιξή τους.

Τα μεσο-ωκεάνια συστήματα διάνοιξης αποτελούν μια από τις μεγαλύτερες γεωτεκτονικές μεγα-δομές της γήινης σφαίρας, με ένα συνολικό μήκος της τάξης των 40.000 km (Εικ. 4.1 & 4.2). Αναπτύσσονται σε όλους τους ωκεανούς, με κοινά, αλλά και διαφορετικά, χαρακτηριστικά κατά περίπτωση και είναι στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους, αφού τόσο τα κύρια συστήματα, όσο και οι επιμέρους κλάδοι, ενώνονται, συνήθως, μεταξύ τους στα σημεία τριπλής συμβολής (triple junctions, βλπ. και Κεφάλαιο 3). Στην Εικ. 4.1 παρουσιάζονται τόσο τα κύρια μεσο-ωκεάνια συστήματα διάνοιξης (π.χ. η μεσο-Ατλαντική ράχη, η ράχη του Ανατολικού Ειρηνικού, οι ράχεις του ΝΔ και ΝΑ Ινδικού, οι ράχεις Αυστραλίας-Ανταρκτικής και Ειρηνικού-Ανταρκτικής), καθώς και οι δευτερεύοντες κλάδοι, όπως οι μικρότερες ράχεις της Χιλής και των Γκαλαπάγκος στον ανατολικό Ειρηνικό και του Carlsberg στον βόρειο Ινδικό, αλλά και οι μικρότεροι τάφροι της Ερυθράς Θάλασσας, των Αζορών και των S. Sandwich. Στα ίδια, ή αντίστοιχα, σημεία τριπλής συμβολής τέμνονται και ενώνονται, επίσης, με τις άλλες κύριες τεκτονικές μεγα-δομές του πλανήτη, δηλαδή τις ζώνες σύγκλισης (και τις ωκεάνιες τάφρους που τις συνοδεύουν), και τα ρήγματα μετασχηματισμού, με τις οποίες η δημιουργία και εξέλιξή τους σχετίζεται άμεσα.

Στους ωκεανούς που οριοθετούνται από Ατλαντικού Τύπου παθητικά ηπειρωτικά περιθώρια (Ατλαντικός Ωκεανός, Ινδικός Ωκεανός, Ωκεανός Ανταρκτικής), οι μεσο-ωκεάνιες ράχεις και τα κέντρα διάνοιξης τοποθετούνται συνήθως στο μέσον του ωκεανού και παρουσιάζουν μια σχετικά παράλληλη διάταξη με αυτά (Εικ. 4.1 & 4.2). Εξαίρεση αποτελεί ο Αρκτικός Ωκεανός, όπου η μεσο-ωκεάνια ράχη, κατά την παρούσα περίοδο, είναι τοποθετημένη στο ανατολικό τμήμα της ωκεάνιας λεκάνης. Αντίθετα στον Ειρηνικό Ωκεανό, η υποβύθιση της ωκεάνιας λιθόσφαιρας κατά μήκος του



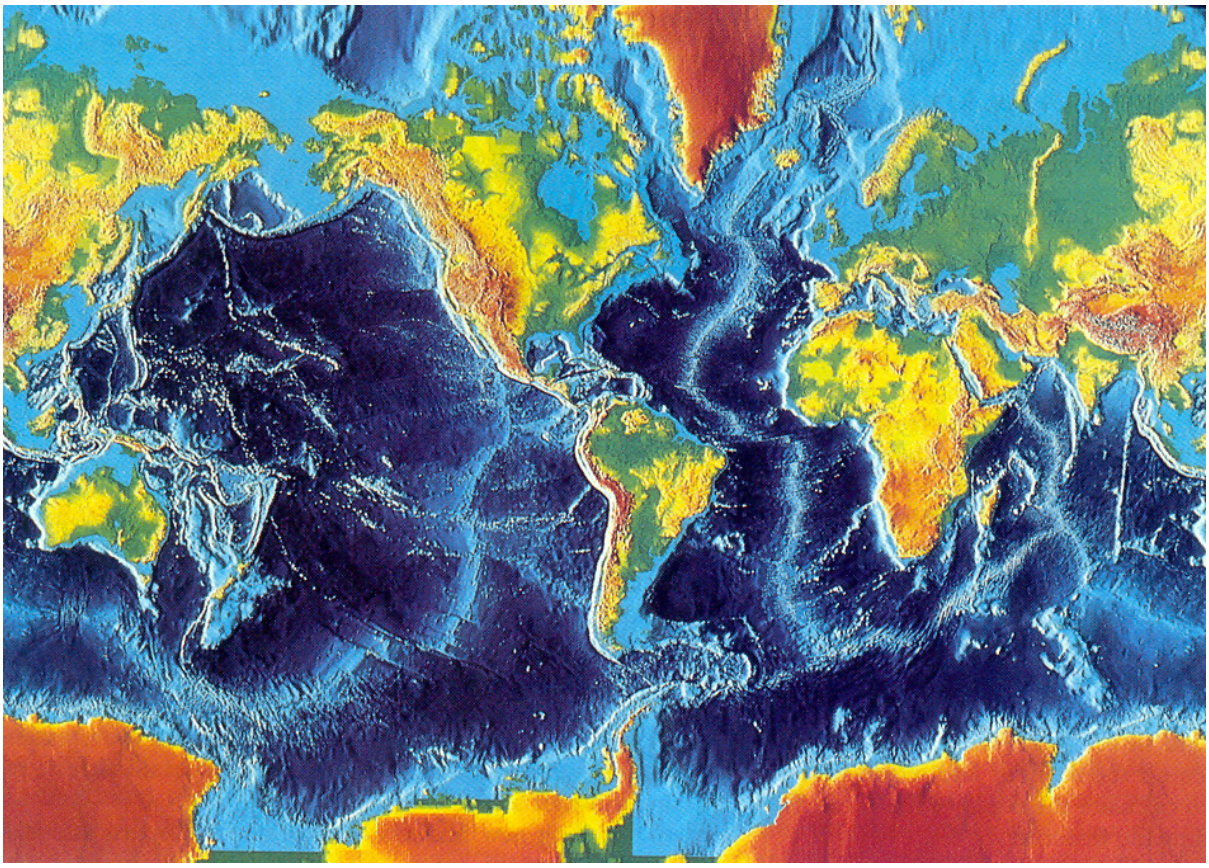

AZ, Azores; C, Carlsberg; Ch, S Chile Ridge; CR, Caribbean Plate; CT, Cayman Trough; E, Explorer; EA, East African Rift; G, Gorda; Ga, Galapagos; J, Juan de Fuca; LHT, Lau-Howe Trough; M, Mendocino; MT, Mariana Trough; QC, Queen Charlotte Islands; RR, Reykjanes Ridge; RS, Red Sea; SA, San Andreas; SSR, South Sandwich Rift; PAC-ANT R, Pacific-Antarctic Ridge; SE IND R, SE Indian Ridge; SW IND R, SW Indian Ridge; AUS-ANT R, Australia-Antarctic Ridge. Triple junctions: ATJ, Afar; AzTJ, Azores; BTJ, Bouvet; CTJ, Chile; GTJ, Galapagos; ITJ, Indian Ocean; MTJ, Mendocino; RTJ, Rivera. *(After Menard and Chase, 1970)*

***Εικόνα 4.1*** *Γενικευμένος χάρτης των μεσο-ωκεάνιων συστημάτων διάνοιξης.*

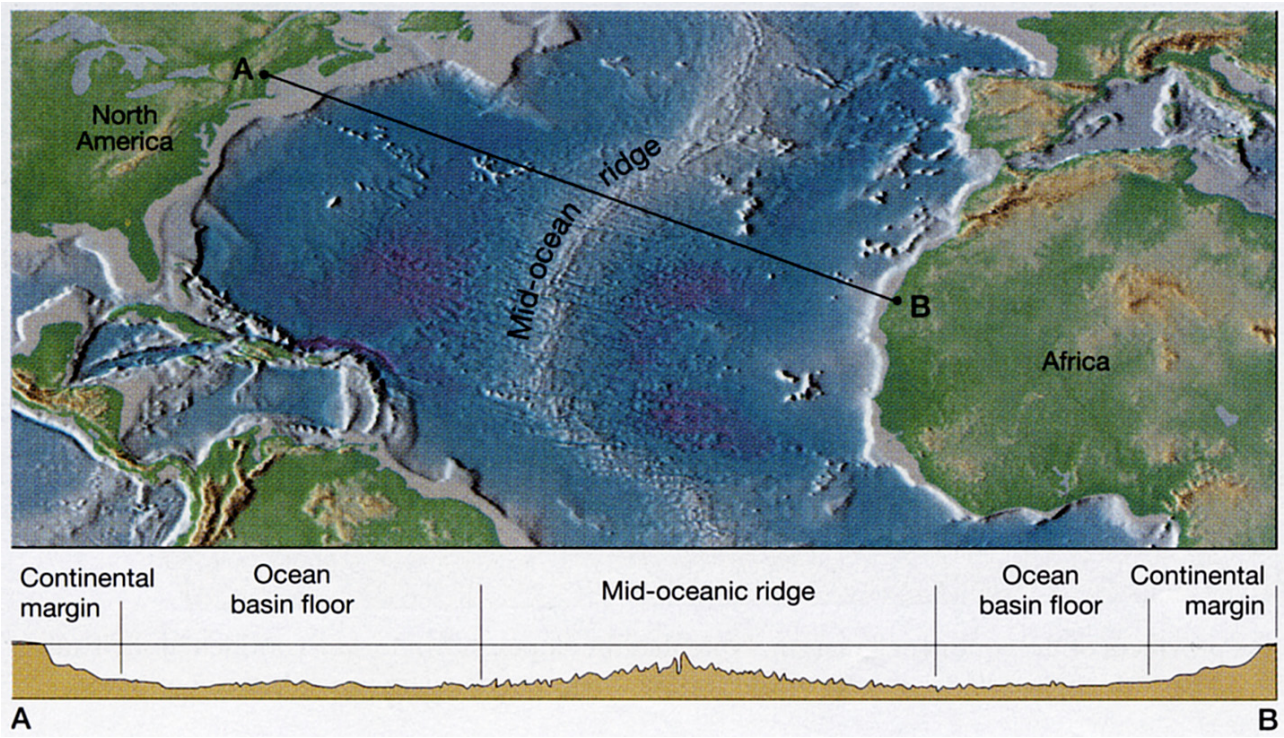
μεγαλύτερου τμήματος του ανατολικού ενεργού περιθωρίου του, έχει σαν αποτέλεσμα την μετανάστευση της μεσο-ωκένιας ράχης προς το ανατολικό τμήμα της ωκεάνιας λεκάνης (Εικ. 4.1 & 4.2).

Σε ότι αφορά την τοπογραφία, η νεοσχηματισμένη λιθόσφαιρα (ωκεάνιος φλοιός), που παράγεται στις ενεργές ράχεις, βρίσκεται σε ένα βάθος περί τα 2.500 μέτρα, ενώ η παλαιότερη λιθόσφαιρα που αποτελεί το θαλάσσιο πυθμένα στις αβυσικές πεδιάδες βρίσκεται σε ένα μέσο βάθος 5.000 μέτρων (Εικ. 4.3 & 4.4). Μεταξύ των ενεργών ράχεων (2.500 μέτρα) και των αβυσικών πεδιάδων (5.000 μέτρα) δεν μεσολαβεί κανένα σημαντικό τεκτονικό φαινόμενο. Η μεταβολή αυτή του βάθους, σχετίζεται άμεσα με την ηλικία και την πυκνότητα του ωκεάνιου φλοιού, που αυξάνονται, λόγω ψύξεως, προς την ίδια διεύθυνση όπως και το βάθος. Μάλιστα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.5, η μείωση του βάθους είναι ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της ηλικίας της ωκεάνιας λιθόσφαιρας. Περισσότερες λεπτομέρειες για τους μηχανισμούς που διέπουν τη σχέση αυτή, αναφέρονται στα επόμενα.

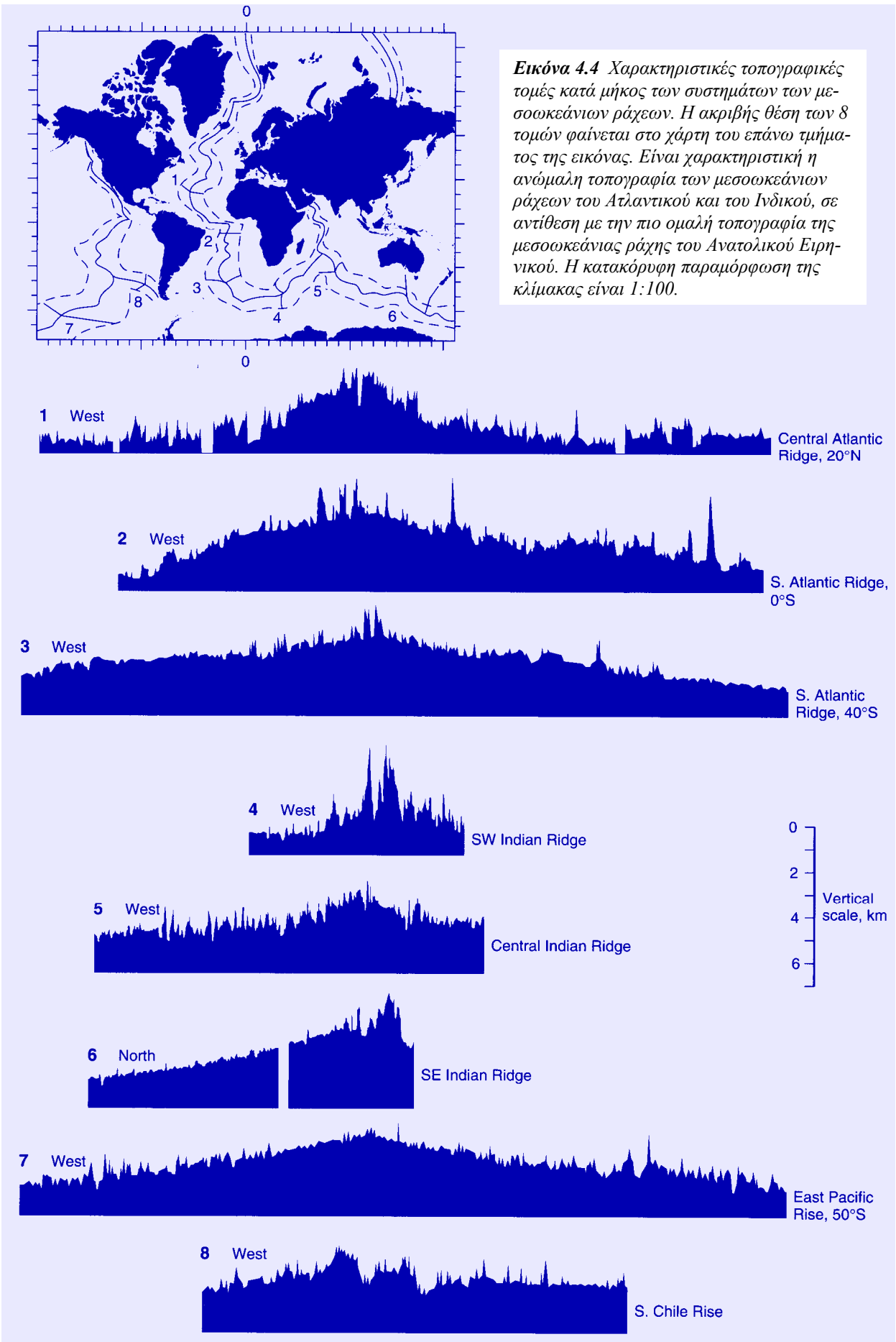
Σημειώνεται ότι η χαρακτηριστική αυτή τοπογραφία, δεν απαντάται μόνο στα κύρια συστήματα μεσο-ωκεάνιας διάνοιξης, αλλά και στους δευτερεύοντες κλάδους, όπως φαίνεται στην τομή 8 της



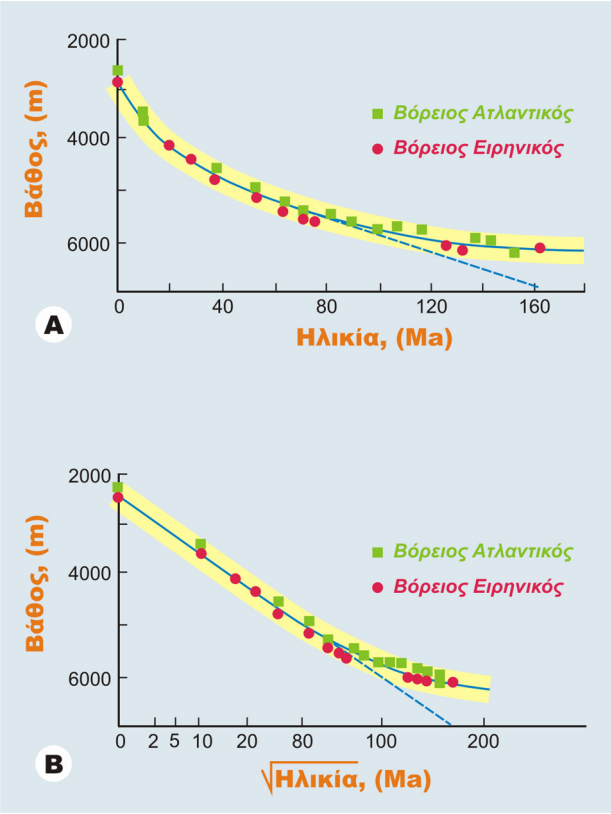
***Εικόνα 4.2*** *Οι μεσο-ωκεάνιες ράχεις, όπως χαρακτηριστικά διακρίνονται στον ανάγλυφο χάρτη της μορφολογίας των ωκεανών.*




***Εικόνα 4.3*** *Τοπογραφική απεικόνιση των διαφόρων τμημάτων του ωκεάνιου πυθμένα, σε μια χαρακτηριστική τομή από τη Βόρεια Αμερική (Νέα Αγγλία) μέχρι τις δυτικές ακτές της Βόρειας Αφρικής.*




***Εικόνα 4.4*** *Χαρακτηριστικές τοπογραφικές τομές κατά μήκος των συστημάτων των μεσοωκεάνιων ράχεων. Η ακριβής θέση των 8 τομών φαίνεται στο χάρτη του επάνω τμήματος της εικόνας. Είναι χαρακτηριστική η ανώμαλη τοπογραφία των μεσοωκεάνιων ράχεων του Ατλαντικού και του Ινδικού, σε αντίθεση με την πιο ομαλή τοπογραφία της μεσοωκεάνιας ράχης του Ανατολικού Ειρηνικού. Η κατακόρυφη παραμόρφωση της κλίμακας είναι 1:100.*




***Εικόνα 4.5*** *Η σχέση ανάμεσα στο βάθος και την ηλικία του ωκεάνιου πυθμένα, σε τομές εγκάρσιες προς τις μεσο-ωκεάνιες ράχεις του Ατλαντικού και του Ειρηνικού.* ***Α.*** *Διάγραμμα "βάθους – ηλικίας". Η κίτρινη περιοχή δείχνει την επιφάνεια διασποράς των προβολών, που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της καμπύλης. Η συνεχής γραμμή παρουσιάζει τη θεωρητική τοπογραφία, θεωρώντας ότι η λιθόσφαιρα φθάνει ένα οριακό πάχος περίπου στα 80 Ma. Η διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει τη θεωρητική τοπογραφία, θεωρώντας ότι το πάχος της λιθόσφαιρας αυξάνεται διαρκώς.* ***Β.*** *Διάγραμμα που δείχνει τη γραμμική σχέση ανάμεσα στο βάθος και την τετραγωνική ρίζα της ηλικίας, περίπου μέχρι τα 80 Ma. Η διακεκομμένη γραμμή αποτελεί προέκταση της συνεχούς και αντιπροσωπεύει τη θεωρητική περίπτωση που η λιθόσφαιρα ψύχεται και παχαίνει διαρκώς.*

Εικ. 4.4, από τη μεσο-ωκεάνια ράχη της Ν. Χιλής, που αποτελεί "παρακλάδι" της ράχης του ανατολικού Ειρηνικού. Επισημαίνεται ότι η "ξεκάθαρη" σχέση που συνδέει το βάθος με την ηλικία του ωκεάνιου φλοιού, δεν εκφράζεται με τον ίδιο τρόπο στις περιπτώσεις των δευτερευόντων κλάδων, κυρίως γιατί αυτοί είτε τέμνονται από πολλά ρήγματα μετασχηματισμού, είτε γιατί βρίσκονται πολύ κοντά στα ηπειρωτικά περιθώρια. Σε δύο περιπτώσεις μάλιστα, οι δευτερεύοντες αυτοί κλάδοι επεκτείνονται και μέσα στις ηπείρους, όπως στο σύστημα ηπειρωτικών τάφρων της Ανατολικής Αφρικής και στην επαρχία Basin and Range της Β. Αμερικής.

Επιπρόσθετα, υπάρχουν και αρκετά μικρότερα συστήματα ωκεάνιων ραχών, τα οποία δεν συνδέονται άμεσα με τα κύρια συστήματα μεσο-ωκεάνιας διάνοιξης. Από αυτά, κυρίαρχα είναι όσα σχετίζονται με κέντρα διάνοιξης και ράχεις που αναπτύσσονται πίσω από ηφαιστειακά τόξα, που συνδέονται άμεσα με ζώνες σύγκλισης και αναλισκόμενα περιθώρια (consuming margins), όπως η τάφρος των Μαριάννων, η τάφρος Lau-Havre και η ράχη της Ν. Σκωτίας (Εικ. 4.1). Άλλες περιπτώσεις σχετίζονται με ρήγματα μετασχηματισμού, όπως η ράχη Cayman, που σχετίζεται με το ρήγμα μετασχηματισμού που αποτελεί το όριο ανάμεσα στις πλάκες της Β. Αμερικής και της Καραϊβικής (Εικ. 4.1).

Στα επόμενα θα αναλυθούν αρχικά τα γεωδυναμικά χαρακτηριστικά των περιοχών που χαρακτηρίζονται από ηπειρωτική ταφρογένεση (continental rifting, π.χ. Ανατολική Αφρική και επαρχία Basin and Range στη Β. Αμερική), δεδομένου ότι, όντας στη ξηρά, μελετώνται πολύ πιο εύκολα και αναλυτικά, επιπρόσθετα δε αποτελούν και πρότυπα για τη μελέτη των αντίστοιχων δομών που αναπτύσσονται στους ωκεανούς (Ατλαντικός, Ειρηνικός, Ινδικός κλπ.), αλλά μελετώνται πολύ πιο δύσκολα. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η μελέτη περιοχών ταφρογένεσης, που χαρακτηρίζονται ως μικρού πλάτους ωκεάνιες λεκάνες, όντας στα αρχικά στάδια της εξέλιξής τους, όπως η Ερυθρά Θάλασσα και η σύγκρισή τους με τις περισσότερο "ώριμες" μεγάλες λεκάνες των ωκεανών. Έτσι, λοιπόν, μπορεί με τον τρόπο αυτό να μελετηθούν όλα τα στάδια της εξέλιξης του φαινομένου της ταφρογένεσης και της διάνοιξης ωκεανών, από το αρχικό στάδιο της ενδο-ηπειρωτικής θραύσης και ταφρογένεσης και, μέσω του ενδιαμέσου σταδίου της δημιουργίας μικρών ωκεάνιων λεκανών, μέχρι το τελικό στάδιο των ώριμων ωκεανών, που οριοθετούνται από ηπειρωτικά περιθώρια και ηπείρους, που σήμερα βρίσκονται πολύ μακριά, αλλά κάποτε αποτελούσαν μια ενιαία ήπειρο. Αυτός είναι και ο λόγος που τα γεωλογικά και τεκτονικά δεδομένα, που συλλέγονται από τις περιοχές που σήμερα χαρακτηρίζονται από ηπειρωτική ταφρογένεση, χρησιμοποιούνται για την κατανόηση της τεκτονικής των πλακών πριν το Μεσοζωϊκό, πριν, δηλαδή, τη διάνοιξη των σημερινών κύριων ωκεανών.

## 4.2 Ηπειρωτική Ταφρογένεση (Continental Rifting)

Πριν την περιγραφή χαρακτηριστικών περιοχών της λιθόσφαιρας, που βρίσκονται κάτω από εφελκυσμό, με αποτέλεσμα την ηπειρωτική ταφρογένεση, θεωρείται σκόπιμο να δοθούν κάποια στοιχεία

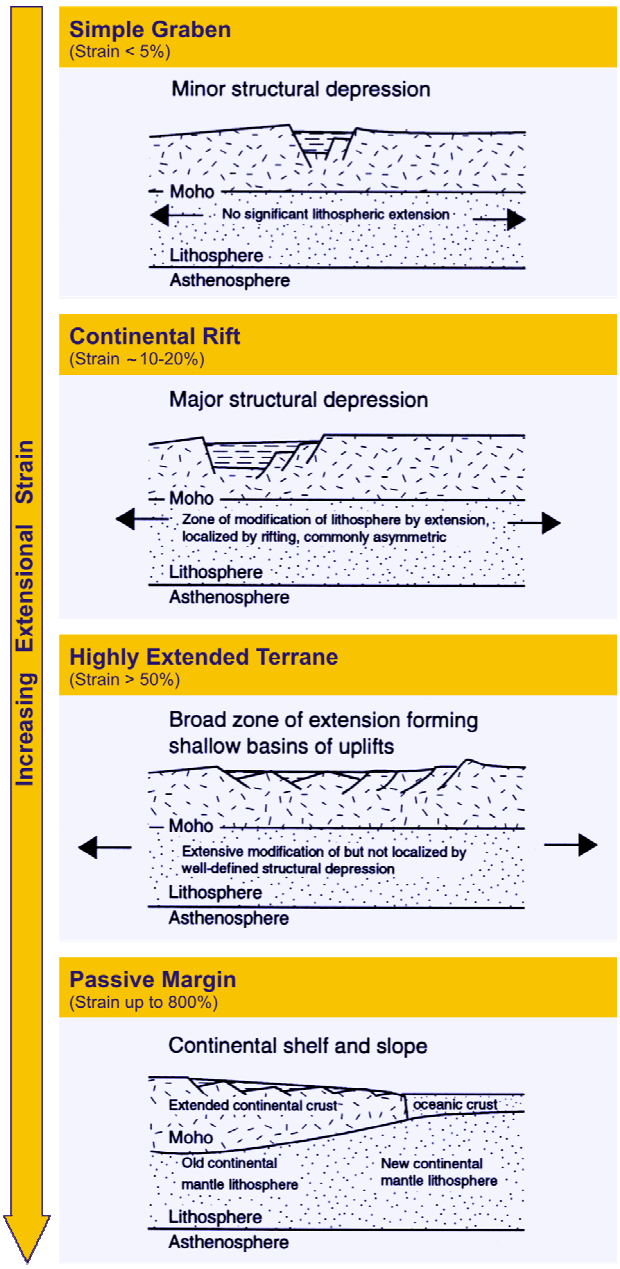
σχετικά με την ορολογία και τους ορισμούς που χαρακτηρίζουν το rifting (ταφρογένεση). Παλαιότερες μελέτες, μέχρι το 1920-1930, προσδιόριζαν τον όρο rift (τεκτονική τάφρος) ως ένα μεγάλης κλίμακας επίμηκες τεκτονικό βύθισμα, που οριοθετείτο από κανονικά ρήγματα, χωρίς να γίνεται αναφορά στον τύπο και τον μηχανισμό της δημιουργίας και εξέλιξής του. Μετά από ένα μεγάλο διάστημα διαμάχης για την προέλευση των rifts κάτω από εφελκυσμό ή συμπίεση, σήμερα είναι παραδεκτό ότι αντιπροσωπεύουν εφελκυστικές δομές, αν και μπορεί να σχετίζονται εν μέρει με προγενέστερη, ταυτόχρονη ή μεταγενέστερη συμπίεση. Η πολύ στενή σχέση των τεκτονικών τάφρων (rifts) με ηφαιστειότητα, υψηλή θερμική ροή, σεισμικότητα και φλοιό και μανδύα με ιδιόμορφη δομή, αποδεικνύει ότι οι μεγάλης κλίμακας αυτές δομές δεν χαρακτηρίζουν μόνο τα ανώτερα στρώματα του φλοιού, αλλά σχετίζονται με γεωδυναμικές διαδικασίες σε επίπεδο λιθόσφαιρας και ασθενόσφαιρας.

Η απόδοση του "rifting" στα ελληνικά ως "ταφροφένεση" θεωρείται η πιο επιτυχής προσέγγιση, δεδομένου ότι όρος "taphrogenesis" είχε προταθεί παλαιότερα για τις εφελκυστικές μεγα-δομές της Ανατολικής Αφρικής και στη διεθνή βιβλιογραφία-θεωρείται συνώνυμος του rifting, που χρησιμοποιείται σήμερα. Με βάση την απόδοση αυτή ο όρος "rift" μπορεί να αποδοθεί ως "τεκτονική τάφρος" (ή "ηπειρωτική τάφρος"). Με τον ίδιο όρο όμως στα ελληνικά αποδίδεται, συνήθως, και το "graben". Για το λόγο αυτό προτείνονται δύο επιλογές. Είτε το "rift" να αποδοθεί ως "τεκτονική (ή ηπειρωτική), μεγα-τάφρος" και το "graben" ως "τεκτονική τάφρος", είτε το "rift" να αποδοθεί ως "τεκτονική (ή ηπειρωτική), τάφρος" και το "graben" ως "τεκτονικό βύθισμα", ή "τεκτονική λεκάνη". Για τις ανάγκες του βιβλίου αυτού και μέχρι να ολοκληρωθεί η απόδοση της ορολογίας στα ελληνικά, επιλέγεται η δεύτερη εκδοχή.

Αρκετοί άλλοι ορισμοί έχουν προσπαθήσει να συμπληρώσουν την έννοια του rifting, όπως αυτός που εισάγει τη θραύση, διάρρηξη (rupture) του συνόλου της λιθόσφαιρας κάτω από εφελκυσμό. Πάντα όμως υπάρχει και η αντίθετη άποψη, όπως και στην περίπτωση αυτή, όπου επισημαίνεται ότι μοντέλα για την παραμόρφωση των πετρωμάτων υποστηρίζουν ότι ο κατώτερος φλοιός και ο κατώτερος λιθοσφαιρικός μανδύας, δεν θραύονται αλλά παραμορφώνονται με όλκιμο τρόπο, καθώς και ότι η διάρρηξη της λιθόσφαιρας δεν συμβαίνει μέχρι η διείσδυση των φλεβών να προχωρήσει στο στάδιο της διάνοιξης του θαλάσσιου πυθμένα.

Ο πιο πρόσφατος και επιτυχής ορισμός είναι αυτός που ορίζει ότι continental rift (ηπειρωτική τεκτονική τάφρος) θεωρείται "ένα επίμηκες τεκτονικό βύθισμα, που σχετίζεται με το γεγονός ότι το σύνολο της λιθόσφαιρας έχει τροποποιηθεί κάτω από εφελκυσμό". Και σαν continental rift system (σύστημα ηπειρωτικών τεκτονικών τάφρων), θεωρείται "μια σειρά από τεκτονικές τάφρους που διασυνδέονται μεταξύ τους τεκτονικά".

Επισημαίνεται ότι ο ανωτέρω ορισμός, διακρίνει με απόλυτα σαφή τρόπο τις τεκτονικές τάφρους (rifts), από άλλες εφελκυστικές δομές, με τις οποίες συχνά συγχέονται, όπως οι ακόλουθες (Εικ. 4.6):




***Εικόνα 4.6*** *Οι κυριότεροι τύποι μεγάλης κλίμακας τεκτονικών δομών που σχετίζονται με ηπειρωτικό εφελκυσμό.*

(1) *Μικρής κλίμακας εφελκυστικές λεκάνες (simple graben)*, όπου, φυσικά, δεν μετασχηματίζε-

ται το σύνολο της λιθόσφαιρας από εφελκυσμό, αλλά μόνο ένα μικρό τμήμα του ανώτερου φλοιού.

(2) *Τεκτονοστρωματογραφικά πεδία που υπόκεινται σε ισχυρό εφελκυσμό (highly extended terrane)*, στα οποία δεν σχηματίζεται ένα επίμηκες στενό και βαθύ τεκτονικό βύθισμα, αλλά μεγάλης έκτασης ρηχές λεκάνες.

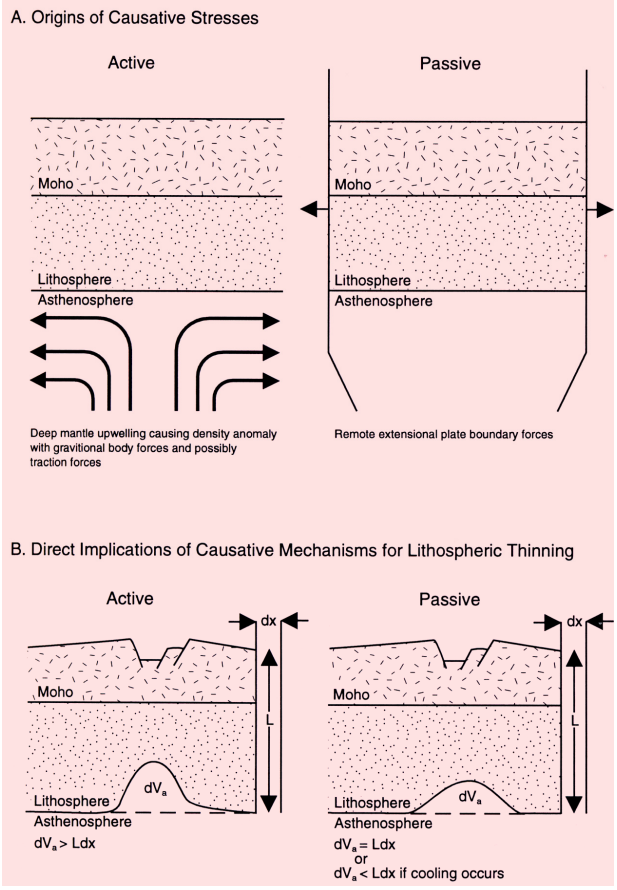
(3) *Τεκτονικές τάφροι που αναπτύσσονται σε ηπειρωτικά παθητικά περιθώρια (rifted passive continental margins)*, όπου, όμως, το αρχικό τεκτονικό βύθισμα αναπτύσσεται μέσα στην ωκεάνια λεκάνη και όχι στην ήπειρο.

***Πίνακας 4.1*** *Όροι που συνήθως χρησιμοποιούνται για να περιγάψουν τις ηπειρωτικές τεκτονικές τάφρους (continental rifts).*

| Όρος | Σύντομος Ορισμός |
|---|---|
| **Ηπειρωτική Τεκτονική Τάφρος (Continental Rift)** | Επίμηκες τεκτονικό βύθισμα, που σχετίζεται με το γεγονός ότι το σύνολο της λιθόσφαιρας έχει τροποποιηθεί κάτω από εφελκυσμό |
| **Σύστημα Τεκτονικών Τάφρων (Rift System)** | Σειρά από τεκτονικές τάφρους που διασυνδέονται τεκτονικά |
| **Σύγχρονη Τεκτονική Τάφρος (Modern Rift)** | Τεκτονική τάφρος ενεργή από τεκτονική ή/και μαγματική άποψη και/ή παραμένοντα θερμικά φαινόμενα (υψηλή επιφανειακή θερμική ροή, θερμική αναθόλωση, χαμηλή ισόθερμη Curie, μικρές σεισμικές ταχύτητες στον αν. μανδύα κλπ.) |
| **Παλαιο–Τεκτονική Τάφρος (Paleorift)** | "Απολιθωμένη", δηλαδή νεκρή ή αδρανής τεκτονική τάφρος χωρίς παραμένοντα θερμικά φαινόμενα |
| **Αποτυχημένος Κλάδος (Failed Arm)** | Αποτελεί υποδιαίρεση του paleorift και αντιπροσωπεύει έναν από τους τρεις κλάδους διάνοιξης ενός σημείου τριπλής συμβολής (triple junction), που δεν εξελίσσεται σε ωκεάνια λεκάνη |
| **Αυλακογενές (Aulacogen)** | Μία παλαιο–τεκτονική τάφρος, ή ένας αποτυχημένος κλάδος, σε μια παλαιά πλατφόρμα, που έχει επαναδραστηριοποιηθεί με συμπιεστική παραμόρφωση |
| **Ενεργός Ταφρογένεση (Active Rifting)** | Αναφέρεται, όπως και ο επόμενος όρος, στους αρχικούς μηχανισμούς δημιουργίας της ταφρογένεσης και αντιπροσωπεύει μια τεκτονική τάφρο που δημιουργείται από θερμική εκλέπτυνση της λιθόσφαιρας και θερμική άνοδο της ασθενόσφαιρας, όπου οι τάσεις που προκαλούν τη δημιουργία της οφείλονται στις πλευρικές θερμικές διαφοροποιήσεις της λιθόσφαιρας και της υποκείμενης ασθενόσφαιρας (Εικ. 4.7) |
| **Παθητική Ταφρογένεση (Passive Rifting)** | Η ταφρογένεση που είναι το αποτέλεσμα της εκλέπτυνσης της λιθόσφαιρας λόγω εφελκυσμού, εξ' αιτίας ενός εντατικού πεδίου, που οφείλεται στις δυνάμεις που ασκούνται σε ένα απομακρυσμένο όριο τεκτονικών πλακών (Εικ. 4.7) |

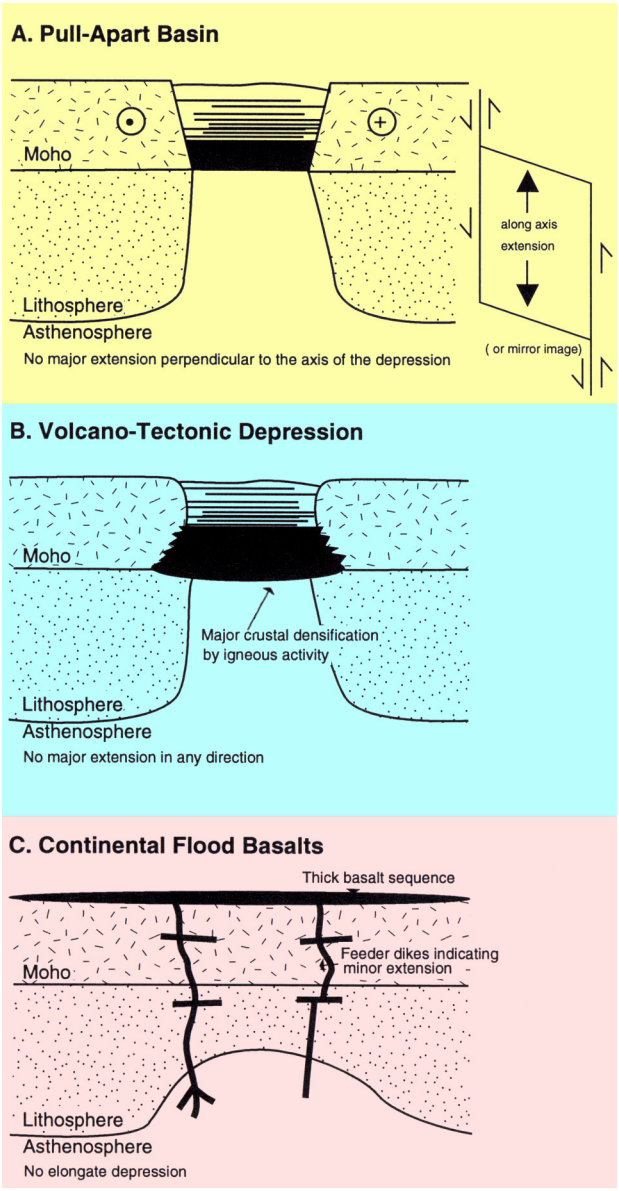
Ο λόγος για τον οποίο όλες αυτές οι δομές θεωρούνται διαφορετικές από τις τεκτονικές τάφρους (rifts), αν και στην ουσία οι διαδικασίες που είναι υπεύθυνες για το σχηματισμό τους είναι παρόμοιες, βασίζεται, εν μέρει, στο μέγεθος του εφελκυσμού, που είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία της κάθε δομής. Π.χ. ένα μικρό ποσό εφελκυσμού, πιθανά μικρότερο του 5% για μια περιοχή πλάτους της τάξης των 100 km, θεωρείται ανεπαρκές για να επηρεάσει το σύνολο της λιθόσφαιρας και ως εκ τούτου οδηγεί στο σχηματισμό ενός ή περισσοτέρων μικρών τεκτονικών βυθισμάτων (simple graben). Από την άλλη μεριά, μια παραμόρφωση λόγω ισχυρού εφελκυσμού, πιθανά μεγαλύτερου του 100%, μπορεί να προκαλέσει μια εκτεταμένη τροποποίηση της λιθόσφαιρας, οπότε χάνεται και το επίμηκες σχήμα των τεκτονικών βυθισμάτων που δημιουργούνται.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 4.1, δίνεται ένας σύντομος ορισμός για την ορολογία που περιγράφει την ηπειρωτική ταφρογένεση και τις δομές που σχετίζονται με αυτή. Επιπρόσθετα, στην Εικ. 4.7, παρουσιάζονται οι δύο αρχικοί μηχανισμοί που ερμηνεύουν τη δημιουργία της ηπειρωτικής ταφρογένεσης (ενεργή και παθητική ταφρογένεση).




***Εικόνα 4.7*** *Οι δύο αρχικοί μηχανισμοί που ερμηνεύουν τη δημιουργία της ηπειρωτικής ταφρογένεσης (ενεργή και παθητική).*

Συχνά στη βιβλιογραφία απαντάται και ο όρος "pseudorifts", που αναφέρεται σε διάφορους τύπους "θερμο-τεκτονικής" προέλευσης μεγάλης κλίμακας δομές, με χαρακτηριστικά που θυμίζουν τυπικές τεκτονικές τάφρους και πολλές φορές συγχέονται με αυτές. Τρεις από τις πιο τυπικές αυτές περιπτώσεις είναι (Εικ. 4.8):




***Εικόνα 4.8*** *Τεκτονικές και μαγματικές μεγα-δομές με χαρακτηριστικά που θυμίζουν τεκτονικές τάφρους (pseudorifts).*

(1) *Οι λεκάνες πλάγιας απομάκρυνσης (pull-apart basins)*, με κύρια διαφοροποίηση τον άξονα του εφελκυσμού, που είναι παράλληλος ή υποπαράλληλος με τον άξονα της κύριας ανάπτυξης του βυθίσματος, σε αντίθεση με τις τυπικές τεκτονικές τάφρους, όπου αυτός είναι εγκάρσιος.

(2) *Βυθίσματα τεκτονο-ηφαιστειακής προέλευσης (volacano-tectonic depressions)*, που σχετίζονται μεν με μεγάλης κλίμακας μαγματικές διαφοροποιήσεις στο φλοιό, αλλά η δημιουργία του βυθίσματος στην επιφάνεια οφείλεται κυρίως σε φαινόμενα ψύξης του μάγματος ή καταρρεύσεις μεγάλων ηφαιστειακών δομών, παρά σε εφελκυστικές δυνάμεις στο φλοιό και την κατώτερη λιθόσφαιρα.

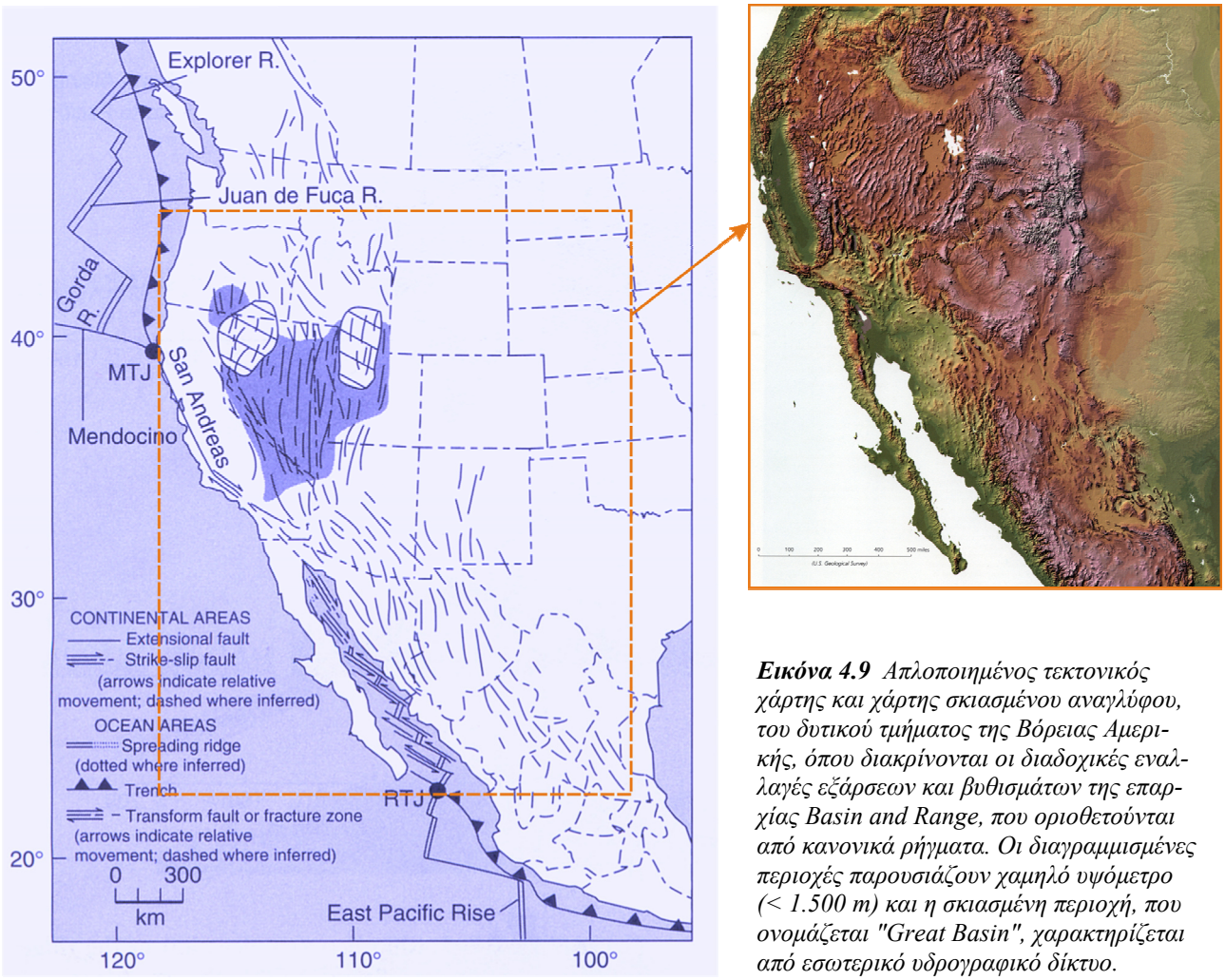
(3) *Ηπειρωτικές περιοχές που έχουν κατακλυσθεί από βασάλτες (continental flood basalt provinces)*, που αντιπροσωπεύουν εκτεταμένα ηφαιστειακά πλατώ, που σχετίζονται με εφελκυστικό εντατικό πεδίο. Χαρακτηρίζονται από την απουσία επιμήκων τεκτονικών βυθισμάτων, δεδομένου ότι οι καταβυθίσεις στις περιοχές αυτές είναι βαρυτικής προέλευσης, λόγω εκτεταμένης επιφανειακής ροής.

Στα επόμενα ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή χαρακτηριστικών περιοχών της λιθόσφαιρας, όπως η επαρχία Basin and Range της Βόρειας Αμερικής και η Ανατολική Αφρική, στις οποίες λαμβάνουν χώρα όλες οι γεωδυναμικές διεργασίες, που έχουν ως αποτέλεσμα τη σύγχρονη ηπειρωτική ταφρογένεση.

## *Η Επαρχία Basin and Range της Βόρειας Αμερικής*

Η επαρχία Basin and Range καλύπτει μια μεγάλη περιοχή του δυτικού τμήματος της Βόρειας Αμερικής. Ξεκινάει από το Βόρειο Μεξικό και, δια μέσου των Η.Π.Α., εκτείνεται μέχρι τον Καναδά, καλύπτοντας μια απόσταση της τάξης των 3.000 km. Το μέγιστο πλάτος της περιοχής αυτής φθάνει τα 1.000 km στο κεντρικό τμήμα στις Δυτικές Η.Π.Α., αλλά είναι μικρότερο στη βόρεια και νότια απόληξή της. Η περιοχή αυτή, τοποθετημένη στο σημερινό πρότυπο της τεκτονικής των πλακών, φαίνεται ότι οριοθετείται από σημαντικές μεγα-δομές. Το νότιο τμήμα της βρίσκεται ανατολικά από τη βόρεια απόληξη της μεσο-ωκεάνιας ράχης του Ανατολικού Ειρηνικού, στο σημείο όπου εισέρχεται στον Κόλπο της Καλιφόρνια. Το βόρειο, γειτνιάζει με τη ζώνη υποβύθισης, που οριοθετεί το ΒΔ ηπειρωτικό περιθώριο των Η.Π.Α. και συνδέεται με την ηφαιστειότητα της περιοχής Cascade Range (Εικ. 4.9).

Το τεκτονικό πρότυπο της ίδιας περιοχής, που στο σύνολό της βρίσκεται σε υψόμετρα 1 ως 2 km, χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη διαδοχικών επιμήκων τεκτονικών εξάρσεων και βυθισμάτων, με ΒΔ ή ΒΒΑ διεύθυνση (Εικ. 4.9). Τα επιμέρους, κανονικού χαρακτήρα, ρηξιτεμάχη που δημιουργούνται παρουσιάζονται, συνήθως, περιστραμμένα. Τα βυθίσματα αποτελούν κυρίως τεκτονικές τάφρους (grabens) ή ημι-τάφρους (half-grabens), ενώ οι εξάρσεις χαρακτηρίζουν κυρίως τεκτονικά κέρατα

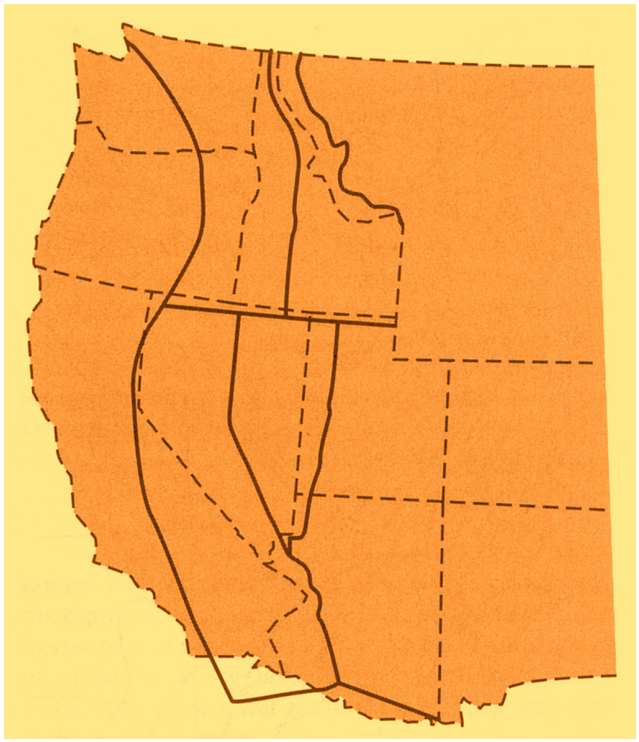



***Εικόνα 4.9*** *Απλοποιημένος τεκτονικός χάρτης και χάρτης σκιασμένου αναγλύφου, του δυτικού τμήματος της Βόρειας Αμερικής, όπου διακρίνονται οι διαδοχικές εναλλαγές εξάρσεων και βυθισμάτων της επαρχίας Basin and Range, που οριοθετούνται από κανονικά ρήγματα. Οι διαγραμμισμένες περιοχές παρουσιάζουν χαμηλό υψόμετρο (< 1.500 m) και η σκιασμένη περιοχή, που ονομάζεται "Great Basin", χαρακτηρίζεται από εσωτερικό υδρογραφικό δίκτυο.*

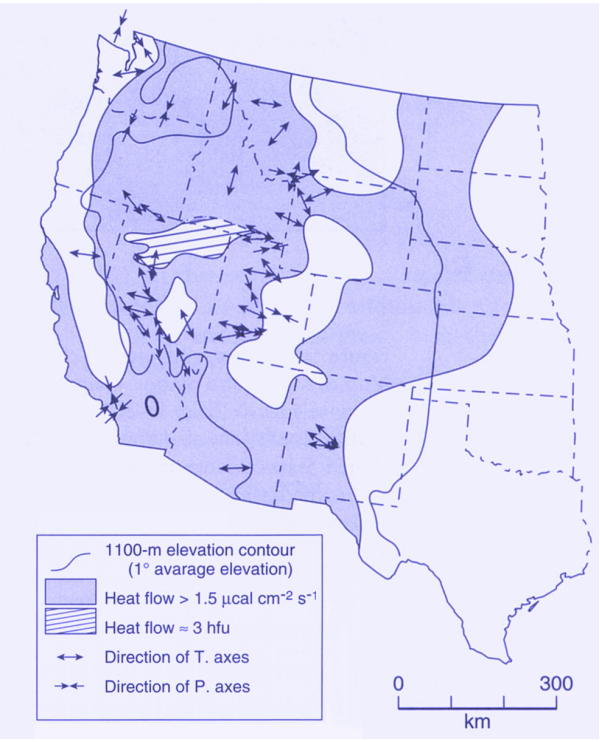
(horsts), ή τα ανερχόμενα τμήματα των περιστραμμένων ρηξιτεμαχών. Οι περισσότερες επιμήκεις εξάρσεις οριοθετούνται από κανονικά ρήγματα, που παρουσιάζουν μεγάλες και απότομες κλίσεις στα ανώτερα τμήματά τους, σε αντίθεση με τα βαθύτερα τμήματα, που αποκτούν μια γεωμετρία λιστρικού χαρακτήρα. Άλλα από αυτά εκτείνονται βαθειά μέσα στον ηπειρωτικό φλοιό και άλλα παρουσιάζουν πιο επιφανειακό χαρακτήρα. Οι μετατοπίσεις για τα ρήγματα που οριοθετούν ένα μόνο ρηξιτέμαχος είναι της τάξης των 8 έως 10 km, ενώ για ορισμένα μεγαλύτερα λιστρικού χαρακτήρα ρήγματα, που οριοθετούν ένα σύνολο περιστραμμένων ρηξιτεμαχών, είναι της τάξης των 15 ως 20 km.

Υπολογισμοί για τη συνολική μετατόπιση, σε τομές εγκάρσιες ως προς τα ρήγματα της επαρχίας Basin and Range, δείχνουν ότι αυτή κυμαίνεται από 60 km έως περισσότερο από 300 km. Μάλιστα, όσο η μελέτη των, λιστρικών κυρίως, ρηγμάτων συνεχίζεται, οι τιμές αυτές τείνουν να γίνουν ακόμα μεγαλύτερες. Τα τεκτονικά δεδομένα λοιπόν, φανερώνουν ξεκάθαρα ότι ο ηπειρωτικός φλοιός εκτείνεται, με αποτέλεσμα να έχει σχεδόν διπλασιασθεί το αρχικό πλάτος της συγκεκριμένης περιοχής. Στην Εικόνα 4.10 παρουσιάζονται τα όρια των δυτικών πολιτειών πριν αυτός ο εφελκυσμός λάβει χώρα, ώστε, σε σύγκριση με τα σημερινά, να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της έκτασης.

Τα γεωφυσικά δεδομένα, επίσης, συνηγορούν για το σύγχρονο εφελκυσμό στην επαρχία Basin and Range. Η θερμική ροή στην περιοχή είναι τριπλάσια, απ' ότι η συνήθης για τις ηπειρωτικές περιοχές (Εικ. 4.11). Η σεισμική δραστηριότητα των ιστορικών χρόνων επικεντρώνεται σε δύο ζώνες, που με διεύθυνση Β-Ν εκτείνονται κατά μήκος των δυτικών και ανατολικών περιθωρίων της επαρχίας αυτής. Οι μηχανισμοί γένεσης των σεισμών δείχνουν, ως επί το πλείστον, κανονικά ρήγματα, με άξονα εφελκυσμού στη διεύθυνση Α-Δ. Εξαίρεση αποτελεί το ΝΔ περιθώριο της επαρχίας, όπου, σύμφωνα με τους μηχανισμούς γένεσης, εντοπίζονται και ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης. Οι γεωφυσικές διασκοπίσεις αποκαλύπτουν ένα λεπτό φλοιό στην περιοχή, που υπέρκειται ενός μανδύα που χαρακτηρίζεται από χαμηλές ταχύτητες. Ταυτόχρονα



***Εικόνα 4.10*** *Διάγραμμα των δυτικών Η.Π.Α., όπου παρουσιάζεται η έκταση που έχει υποστεί η επαρχία Basin and Range. Η συνεχής γραμμή δείχνει την πιθανή θέση των ορίων των πολιτειών στο Ηώκαινο, πριν την έναρξη της έκτασης.*



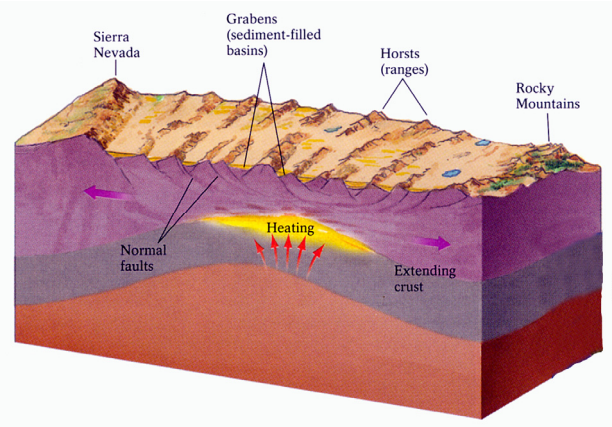

***Εικόνα 4.11*** *Οι μηχανισμοί γένεσης των ενδοηπειρωτικών σεισμών και η κατανομή της θερμικής ροής, για την επαρχία Basin and Range των δυτικών Η.Π.Α. Οι σεισμοί συγκεντρώνονται σε δύο ζώνες με γενική διεύθυνση Β-Ν.*

δεν υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις για την ύπαρξη υψηλών ταχυτήτων λιθόσφαιρας, αμέσως κάτω από τον φλοιό (Εικ. 4.12). Τα λεπτότερα τμήματα του φλοιού βρίσκονται κατά μήκος των δύο ζωνών με την υψηλή σεισμική δραστηριότητα και αντιστοιχούν στα δύο μορφολογικά βυθίσματα στην περιοχή Great Basin (βλπ. Εικ. 4.9).

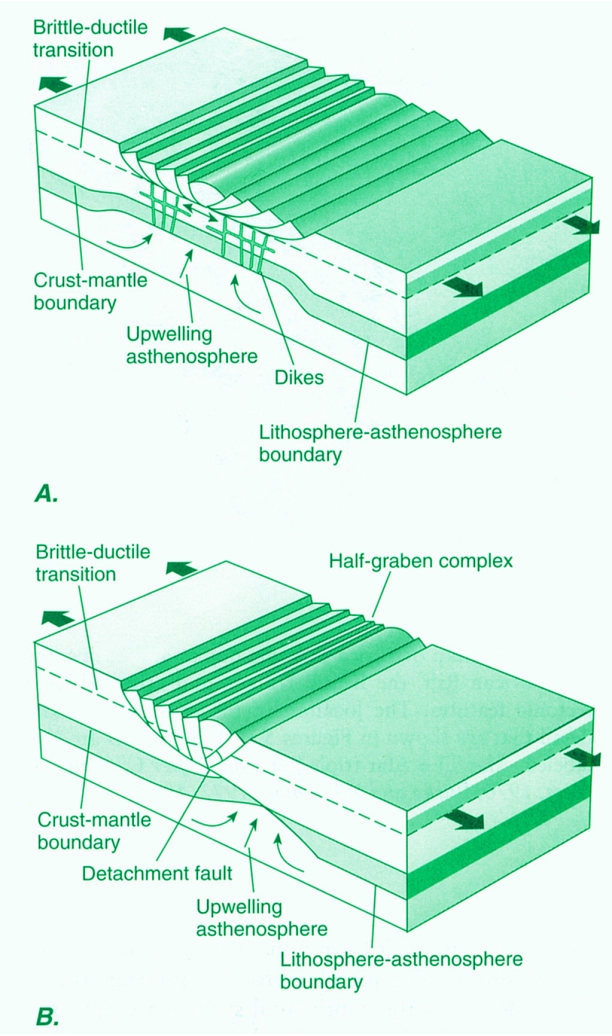
Ως εκ τούτου λοιπόν, τα τεκτονικά, γεωφυσικά και μορφολογικά δεδομένα, υποστηρίζουν ότι η επαρχία Basin and Range στο δυτικό τμήμα της Βόρειας Αμερικής, συνεχίζει να βρίσκεται σε καθεστώς έκτασης και εφελκυσμού. Το καθεστώς αυτό ξεκίνησε μετά το Ηώκαινο, στα 20 Ma, με αρχικό άξονα εφελκυσμού ΒΑ-ΝΔ. Η παρούσα φάση του εφελκυσμού, στη διεύθυνση Α-Δ, ξεκίνησε πριν από 10 Ma περίπου στην περιοχή Great Basin και πιθανά λίγο νωρίτερα στις νοτιότερες περιοχές. Όλα τα δεδομένα υποστηρίζουν ότι ο ρυθμός έκτασης είναι της τάξης των 1–5 cm/yr για την περιοχή Great Basin, που είναι άμεσα συγκρίσιμος με το ρυθμό διάνοιξης στις μεσο-ωκεάνιες ράχεις, που κυμαίνεται από 2–20 cm/yr.

Τα πετρώματα που δομούν σήμερα την επαρχία Basin and Range, αντανακλούν την τεκτονική τοποθέτησή της. Αλλουβιακά ριπίδια και υλικά κατολισθήσεων οριοθετούν τις επιμήκεις τοπογραφικές εξάρσεις, ενώ στις λεκάνες επικρατούν λεπτομερέστερα ηπειρωτικά ή λιμναία ιζήματα, γύψοι και εβαπορίτες. Απαντώνται επίσης ηφαιστειακά πετρώματα, τα πιο πρόσφατα από τα οποία παρουσιάζουν ένα διττό χαρακτήρα, ως προς τη σύσταση, δεδομένου ότι αντιπροσωπεύονται από βασάλτες αλλά και ρυολίθους. Αυτό έρχεται σε ισχυρή αντίθεση με παλαιότερες αποθέσεις του Τριτογενούς, που παρουσιάζουν μια ενδιάμεση σύσταση, και αντανακλούν τη διαδικασία της υποβύθισης, που λάμβανε χώρα εκείνη την εποχή κατά μήκος των ακτών του Ειρηνικού.

Η γεωτεκτονική εξέλιξη της επαρχίας Basin and Range, αποτελεί ένα πρότυπο για τις περιοχές όπου επικρατεί ο λιθοσφαιρικός εφελκυσμός και για το λόγο αυτό διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί, τα οποία στη συνέχεια έγινε προσπάθεια να εφαρμοσθούν και σε άλλες περιοχές, με αντίστοιχα γεωτεκτονικά χαρακτηριστικά. Τα δύο βασικότερα από αυτά παρουσιάζονται στην Εικ. 4.13. Και τα δύο παρουσιάζουν έναν εκλεπτυσμένο φλοιό, που περιλαμβάνει τριτογενή ιζήματα και ηφαιστειακά πετρώματα, που με τη σειρά τους καλύπτουν παραμορφωμένα παλαιοζωϊκής ή μεσοζωϊκής ηλικίας ιζήματα και ηφαιστειακά πετρώματα, αλλά και προκάμβρια κρυσταλλικά πετρώματα. Σύμφωνα με το πρώτο μοντέλο (Εικ. 4.13Α), η παραμόρφωση του ανώτερου φλοιού έχει θραυσιγενή χαρακτήρα,




***Εικόνα 12.*** *Εκλέπτυνση του φλοιού και της λιθόσφαιρας στην επαρχία Basin and Range της Βόρειας Αμερικής, που βρίσκεται κάτω από την επίδραση σύγχρονου εφελκυστικού πεδίου.*




***Εικόνα 4.13*** *Τεκτονικά μοντέλα, που έχουν προταθεί για τον υπολογισμό της έκτασης σε περιοχές με κανονικά ρήγματα, όπως η επαρχία Basin and Range της Βορειο-Αμερικανικής ηπείρου.*

με κανονικά λιστρικά ρήγματα που δημιουργούν συμμετρικές λεκάνες και που στη βάση τους η κλίση τους μειώνεται πάρα πολύ, με αποτέλεσμα στο βάθος να συγκλίνουν σε μια, περίπου οριζόντια, μυλονιτική ζώνη. Για το δεύτερο μοντέλο (Εικ. 4.13B), η έκταση πραγματοποιείται με τη μετακίνηση κατά μήκος ενός μεγάλου και μικρής κλίσης, ρήγματος αποκόλλησης, που τέμνει όλο το φλοιό. Το ανώτερο τμήμα του φλοιού παραμορφώνεται θραυσιγενώς με λιστρικά ρήγματα, αλλά όχι συμμετρικά, που στο βάθος καταλήγουν στην επιφάνεια αποκόλλησης. Ο κατώτερος φλοιός αποτελείται από ισχυρά μεταμορφωμένα πετρώματα, μεσοζωϊκής, παλαιοζωϊκής ή και παλαιότερης ηλικίας. Το παλαιότερο μοντέλο (Εικ. 4.13A) προϋποθέτει ότι η παραμόρφωση των πετρωμάτων του κατώτερου φλοιού χαρακτηρίζεται από ομοαξονική έκταση, που συνοδεύεται από διείσδυση φλεβών, ενώ το νεότερο (Εικ. 4.13B), από όλκιμη διάτμηση, που λαμβάνει χώρα κατά μήκος του ρήγματος αποκόλλησης. Η λιθόσφαιρα μπορεί να περιλαμβάνει ένα μικρό στρώμα από μανδυακό υλικό, ή ο λιθοσφαιρικός μανδύας μπορεί να απουσιάζει τελείως και έτσι η ασθενόσφαιρα να έρχεται άμεσα σε επαφή με τον υπερκείμενο φλοιό (Εικ. 4.13A&B). Σε αυτό το υλικό του ανώτερου μανδύα η έκταση, που οδηγεί σε όλκιμη παραμόρφωση, συνοδεύεται από διεισδύσεις. Το ποσοστό της έκτασης είναι μεγαλύτερο στις περιοχές που ο φλοιός είναι λεπτότερος.

Στο Κεφάλαιο 10, όπου αναλύονται τα Συμπλέγματα Μεταμορφικού Πυρήνα, αναφέρονται πολύ περισσότερες λεπτομέρειες για τα μοντέλα αυτά, που έχουν εκτεταμένη εφαρμογή στην εξέλιξη ορογενών σε καθεστώς εφελκυσμού.

## *Οι Ηπειρωτικές Τεκτονικές Τάφροι της Ανατολικής Αφρικής*

Η αφρικανική ήπειρος, στο σύνολό της, παρουσιάζει μια σειρά από γεωτεκτονικά χαρακτηριστικά, που αντιπροσωπεύουν διάφορα στάδια ηπειρωτικής ταφρογένεσης. Από μορφολογική άποψη, παρουσιάζει μεγάλο μέσο υψόμετρο, γύρω στα 1.000 m, μεγαλύτερο από κάθε άλλη ήπειρο, με εξαίρεση την Ασία. Το μεγαλύτερο τμήμα του αφρικανικού φλοιού χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο δόμων και λεκανών, με διαστάσεις δεκάδων ή και εκατοντάδων χιλιομέτρων (Εικ. 4.14). Πολλοί από τους δόμους αυτούς παρουσιάζουν την ιδιοτυπία, τα κορυφαία τμήματά τους, να διασχίζονται από τεκτονικές τάφρους, συνήθως 2 ή 3 στον αριθμό. Η πιο χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση, σε μέγεθος, αλλά και γεωτεκτονική σημασία, είναι η σειρά των δόμων που αναπτύσσεται κατά μήκος του ανατολικού περιθωρίου της ηπείρου, από την Ερυθρά Θάλασσα στα βόρεια, μέχρι την Τανζανία στα νότια.

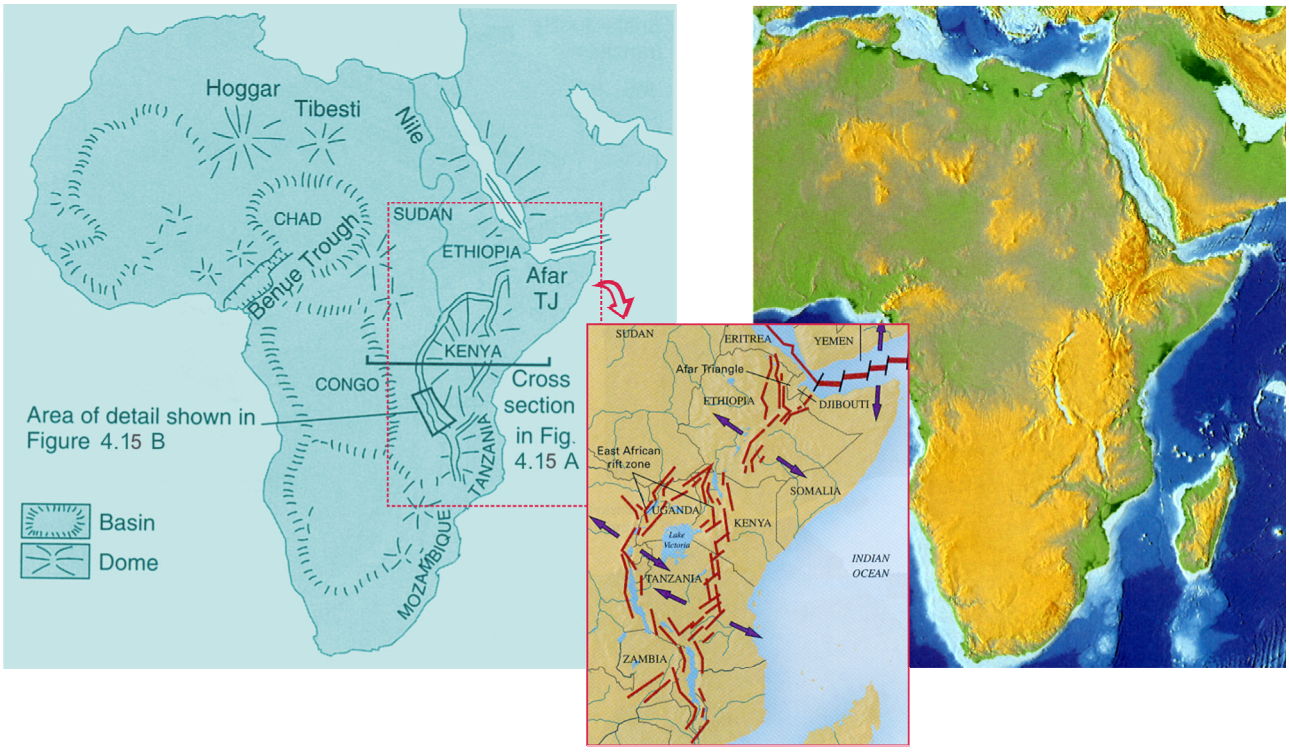
Το σύστημα τεκτονικών τάφρων της Ανατολικής Αφρικής εκτείνεται κατά μήκος του άξονα, που συνδέει αυτούς τους δόμους, ξεκινώντας από το σημείο τριπλής συμβολής (triple junction) του Αφάρ και εκτεινόμενο νότια, για 3.000, περίπου, km, διασχίζει όλο το ανατολικό τμήμα της Αφρικής. Αποτελεί τη δεύτερη χαρακτηριστική περίπτωση (η πρώτη είναι η επαρχία Basin and Range της βόρειο -αμερικανικής ηπείρου, που περιγράφηκε στα προηγούμενα), όπου η ηπειρωτική ταφρογένεση εκτείνεται σε μια ολόκληρη ήπειρο, αποτελώντας στην ουσία ένα όριο τεκτονικών πλακών, που βρίσκεται στα αρχικά στάδια της εξέλιξής του.

Από το σημείο τριπλής συμβολής του Αφάρ και προς τα ΝΝΔ, η τεκτονική τάφρος χωρίζεται σε δύο επιμέρους κλάδους (Εικ. 4.14). Ο ανατολικός κλάδος παρουσιάζεται, από σεισμική άποψη, περισσότερο ενεργός από τον δυτικό, αν και στις δύο περιπτώσεις υπάρχουν ενδείξεις για την ύπαρξη ενεργών ρηγμάτων. Και οι δύο αυτές τεκτονικές τάφροι, αποτελούν τμήμα μιας ανυψωμένης, στο σύνολό της, περιοχής της ηπείρου, που χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη εκλεπτυσμένου φλοιού και εκλεπτυσμένης λιθόσφαιρας, όπως παρουσιάζεται στο μοντέλο της Εικόνας 4.15Α. Τα ρήγματα φαίνεται ότι συγκεντρώνονται, κατά κύριο λόγο, κατά μήκος των δύο αυτών τεκτονικών τάφρων.

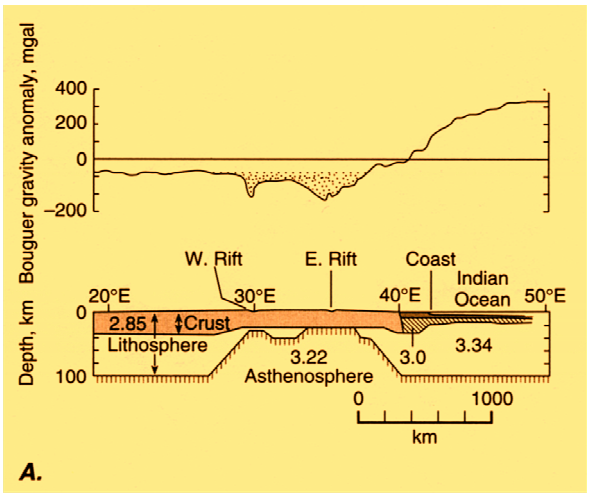
Η έκταση της περιοχής που οριοθετείται από αυτές τις δύο τεκτονικές τάφρους είναι ομόλογη με αυτή της επαρχίας Basin and Range. Αν και το σύστημα των ρηγμάτων φαίνεται να είναι πιο πολύπλοκο στην περίπτωση της Basin and Range, εν τούτοις υπάρχει μεγάλη ομοιότητα από σεισμοτεκτονική άποψη, δεδομένου ότι και εκεί η σεισμικότητα εστιάζεται κατά μήκος δύο ζωνών, που διασχίζουν το ανατολικό και δυτικό περιθώριο της περιοχής (βλπ. Εικ. 4.11). Ομοιότητες, επίσης εντοπίζονται και στο πάχος του εκλεπτυσμένου φλοιού και λιθόσφαιρας και για τις δύο περιπτώσεις.

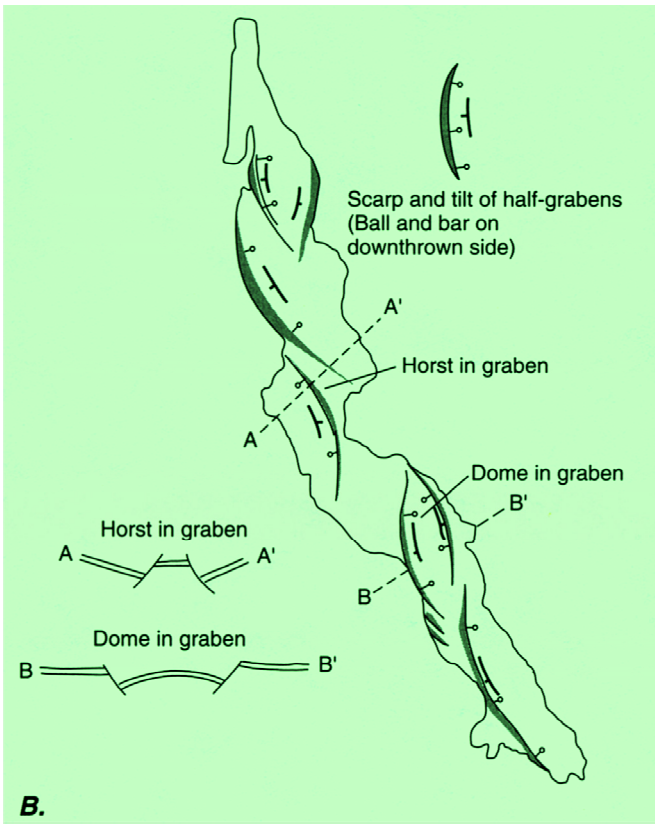
Τα γεωλογικά δεδομένα υποστηρίζουν ότι η διαδικασία του εφελκυσμού ξεκίνησε από το Ηώκαινο, ή ακόμα και από το Ιουρασικό, αν και η παρούσα φάση εφελκυσμού φαίνεται ότι έχει την απαρχή της στο Μέσο Μειόκαινο, όπως ακριβώς και στην περίπτωση της επαρχίας Basin and Range. Η τεκτονική διαδικασία περιλαμβάνει τη δημιουργία των δόμων, την ανάπτυξη των τεκτονικών τάφρων και την εκδήλωση ηφαιστειότητας από την απαρχή της διαδικασίας. Στρωματογραφικά δεδομένα υποστηρίζουν ότι η δημιουργία των δόμων και η ταφρογένεση συνέβησαν ταυτόχρονα και ότι οι πυθμένες των τεκτονικών τάφρων καταβυθίστηκαν από το Ανώτερο Μειόκαινο.

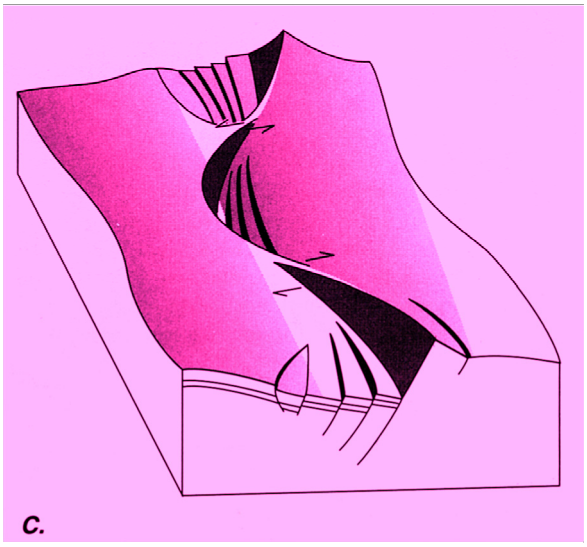
Τα πετρώματα που έχουν αποτεθεί στο σύστημα τεκτονικών τάφρων της Ανατολικής Αφρικής,




***Εικόνα 4.14*** *Απλοποιημένος τεκτονικός χάρτης και χάρτης σκιασμένου αναγλύφου της Αφρικανικής ηπείρου. Διακρίνονται οι μεγάλης κλίμακας δόμοι και λεκάνες, καθώς και το σύστημα τεκτονικών τάφρων της Ανατολικής Αφρικής, λεπτομέρεια του οποίου παρουσιάζεται στη μεσαία εικόνα. - Afar TJ = Afar Triple Junction (σημείο τριπλής συμβολής του Αφάρ).*




**Για την ακριβή θέση της τομής της εικόνας Α και του χάρτη της εικόνας Β, βλπ. στην προηγούμενη Εικόνα 4.14.**

***Εικόνα 4.15*** *Γεωτεκτονικά και γεωδυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος των τεκτονικών τάφρων της Ανατολικής Αφρικής.* ***Α.*** *Μοντέλο για το φλοιό και τον ανώτερο μανδύα, που βασίζεται σε γεωφυσικά και σεισμολογικά δεδομένα.* ***Β.*** *Απλοποιημένος τεκτονικός χάρτης των ρηγμάτων της περιοχής της Λίμνης Ταγκανίκας.* ***C.*** *Τρισδιάστατο μοντέλο των ρηγμάτων της ίδιας περιοχής.*

φέρνουν στο νου εκείνα της επαρχίας Basin and Range. Αλλουβιακά ριπίδια, που αναπτύσσονται στα περιθώρια των κοιλάδων, δίνουν τη θέση τους, στις κεντρικές περιοχές, σε εβαπορίτες, λιμναίες και ποτάμιες αποθέσεις. Ενεργά ηφαίστεια, με, κυρίως, αλκαλικού τύπου ηφαιστειότητα, αποτελούν, επίσης, χαρακτηριστικό της περιοχής, ιδίως της ανατολικής τάφρου.

Η μελέτη και ανάλυση των τεκτονικών δομών στην περιοχή της λίμνης Ταγκανίκα, στη δυτική τεκτονική τάφρο, απέδειξε ότι η τεκτονική δομή χαρακτηρίζεται από μια σειρά εναλλασσόμενων και εν μέρει επικαλυπτόμενων, τεκτονικών ημι-τάφρων (Εικ. 4.15Β&C). Τα επιμέρους ρήγματα, που σχετίζονται με την ταφρογένεση, παρουσιάζονται, από άποψη γεωμετρίας, τοξοειδή σε κάτοψη (στην αποτύπωση, δηλαδή, στον τεκτονικό χάρτη) και λιστρικά στις τρεις διαστάσεις. Η περιοχή ανάμεσα στα επικαλυπτόμενα ρηξιτεμάχη αποτελεί μια μορφολογική ράχη, που σε τομή εμφανίζεται είτε σαν κέρας, είτε σαν λεκάνη (με πυθμένα που έχει τη μορφή δόμου), ανάλογα με το αν η κλίση των ρηγμάτων, στη ζώνη επικάλυψης, τα κάνει να αποκλίνουν ή να συγκλίνουν το ένα με το άλλο (Εικ. 4.15Β, τομές Α-Α΄ και Β-Β΄).

Γεωφυσικά και τεκτονικά δεδομένα καταδεικνύουν ότι η περιοχή αυτή της Ανατολικής Αφρικής είναι ενεργή και βρίσκεται κάτω από καθεστώς σύγχρονου εφελκυσμού. Το συνολικό μέγεθος της έκτασης που έχει υποστεί δεν είναι υψηλό, δεδομένου ότι υπολογίζεται μικρότερο από 50 km. Άρα ο ρυθμός της έκτασης προσεγγίζει τα 0,5 cm/yr.

Με τα δεδομένα που υπάρχουν μέχρι σήμερα, δεν είναι ξεκάθαρο αν η επαρχία Basin and Range

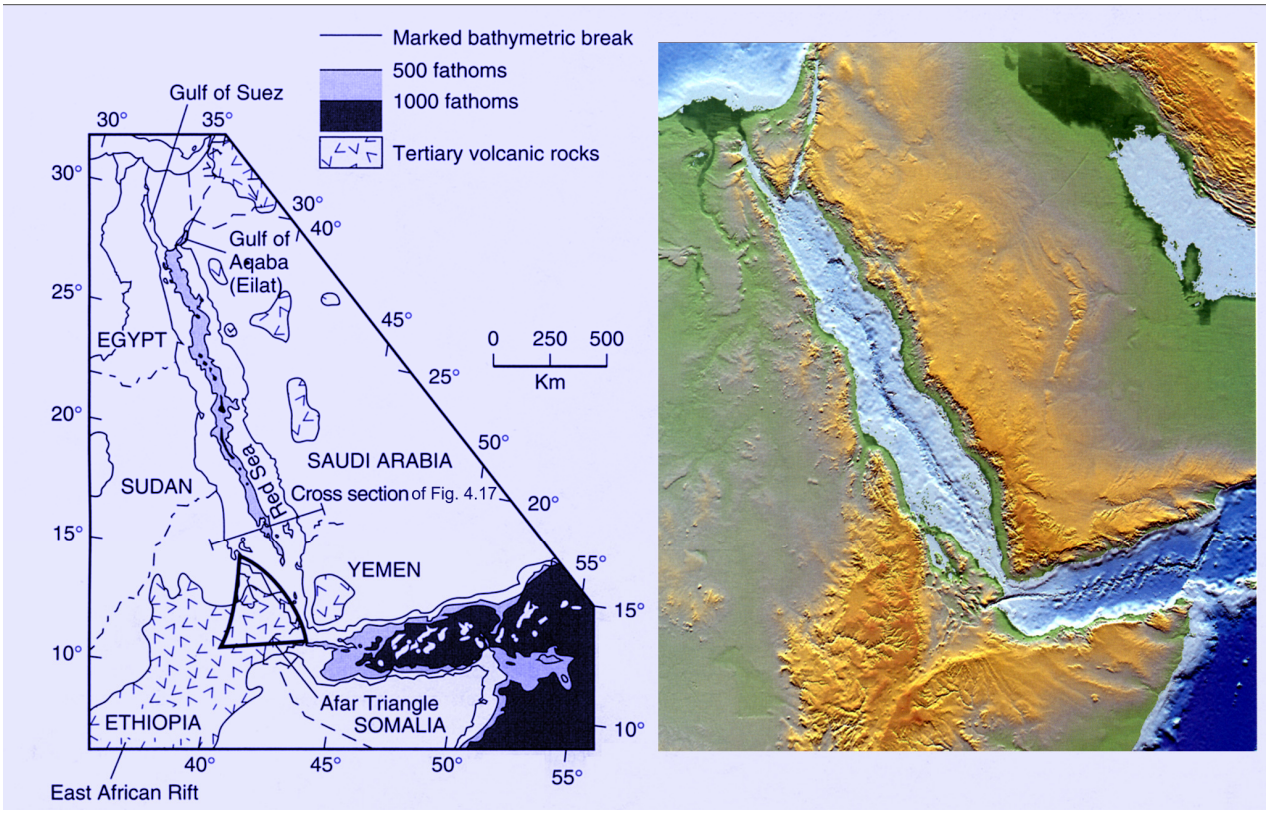
και το σύστημα τεκτονικών τάφρων της Ανατολικής Αφρικής είναι επακριβώς συγκρίσιμα. Η επαρχία Basin and Range παρουσιάζει, σε όλη της την έκταση, μια περισσότερο πολύπλοκη τεκτονική δομή και η έκτασή της έχει ένα πλάγιο χαρακτήρα, σε σχέση με την Ανατολική Αφρική που είναι απόλυτα εγκάρσια στη διεύθυνση των δομών (βλπ. Εικ. 4.14). Πιθανά η σημερινή γεωτεκτονική εικόνα της επαρχίας Basin and Range να αντιπροσωπεύει ένα μεταγενέστερο στάδιο στην εξέλιξη μιας περιοχής, όπως αυτή που αναπτύσσεται ανάμεσα στον ανατολικό και δυτικό κλάδο των τάφρων της Ανατολικής Αφρικής. Από την άλλη μπορεί η ιστορία της να είναι μοναδικά και πιθανά να καθορίζεται και να επηρεάζεται διαχρονικά από την υποβύθιση κατά μήκος των δυτικών ακτών της Βόρειας Αμερικής και τον πλάγιο εφελκυσμό, που αναπτύσσεται προς το εσωτερικό της ηπείρου.

## 4.3 Η Νέα Ωκεάνια Λεκάνη της Ερυθράς Θάλασσας

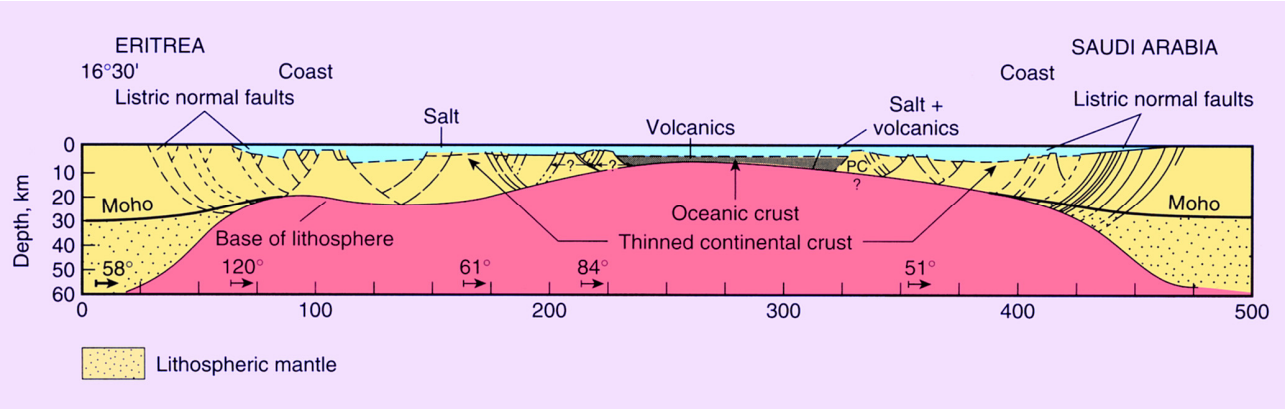
Μετά την ηπειρωτική ταφρογένεση, που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το επόμενο στάδιο στην εξέλιξη της απομάκρυνσης των ηπείρων και των αποκλινόντων περιθωρίων, είναι η δημιουργία μιας στενής θαλάσσιας λεκάνης με ωκεάνιο φλοιό στον πυθμένα της. Το πιο χαρακτηριστικό ακτουαλιστικό πρότυπο μιας τέτοιας λεκάνης αποτελεί η Ερυθρά Θάλασσα, το γεωδυναμικό καθεστώς της οποίας θα περιγραφεί στη συνέχεια.

Όπως και προηγουμένως αναφέρθηκε, η Ερυθρά Θάλασσα, είναι μια στενή ωκεάνια λεκάνη, που χωρίζει την Αφρική από την Αραβία. Το μήκος της φθάνει τα 3.000 km, ενώ το πλάτος της κυμαίνεται από 100 έως 300 km (Εικ. 4.16). Τα περιθώρια της σχηματίζονται από απότομα ρηξιγενή μέτωπα, με ύψος που φθάνει τα 3 km, με αποτέλεσμα να ανυψώνονται απότομα και εντυπωσιακά από την ακτογραμμή. Τα υψόμετρα, σε γενικές γραμμές, είναι μεγαλύτερα στο ανατολικό τμήμα, απ' ότι στο δυτικό.

Το μεγαλύτερο τμήμα του πυθμένα της Ερυθράς Θάλασσας είναι γενικά ρηχό και μόνο στην κεντρική ζώνη του νότιου τμήματος τα βάθη είναι αβυσσικά. Κάτω από τον πυθμένα των ρηχών τμημάτων της λεκάνης, ο ηπειρωτικός φλοιός παρουσιάζεται λεπτότερος, σε σχέση με αυτόν των παράπλευρων ηπειρωτικών περιοχών. Η εκλέπτυνση αυτή, προφανώς, έχει πραγματοποιηθεί μέσω μιας σειράς λιστρικών ρηγμάτων, όπως χαρακτηριστικά παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.17. Ο εκλεπτυσμένος φλοιός στον πυθμένα της Ερυθράς Θάλασσας, καλύπτεται από ένα παχύ στρώμα εβαποριτών (κυρί-




***Εικόνα 4.16*** *Απλοποιημένος γεωγραφικός και γεωλογικός χάρτης και χάρτης σκιασμένου αναγλύφου, της ευρύτερης περιοχής της Ερυθράς Θάλασσας. Σημειώνεται και η θέση της τομής της επόμενης εικόνας.*




***Εικόνα 4.17*** *Τεκτονική τομή στο νότιο τμήμα της Ερυθράς Θάλασσας (για ακριβή θέση βλπ. Εικ. 4.16), όπου διακρίνονται τα κανονικά λιστρικά ρήγματα, η βάση του φλοιού (Moho) και η βάση της λιθόσφαιρας.*

ως από αλίτη), με πάχος που φθάνει το 1 km.

Τα στρωματογραφικά δεδομένα καταδεικνύουν ότι η διάνοιξη της Ερυθράς Θάλασσας ξεκίνησε από τις αρχές του Τριτογενούς, με μια γενική ανύψωση όλης της περιοχής, που συνοδεύτηκε από καταβύθιση του φλοιού και ταφρογένεση κατά μήκος της αξονικής ζώνης. Η ζώνη με τη μεγαλύτερη ανύψωση, αλλά και η ηφαιστειακή δραστηριότητα, σε γενικές γραμμές, τοποθετούνται ανατολικότερα της Ερυθράς Θάλασσας, στην Αραβική πλατφόρμα (Εικ. 4.16). Ο μαγματισμός ξεκίνησε από τα αρχικά στάδια στις περιοχές που ανυψώθηκαν και ταφροποιήθηκαν. Οι λιθολογίες περιλαμβάνουν βασαλτικές φλέβες και εκχύσεις λάβας, οι νεότερες εκ των οποίων φαίνεται ότι σχετίζονται με ένα σύστημα διαρρήξεων, που αναπτύχθηκε παράλληλα με τη σημερινή τεκτονική τάφρο. Μεγάλου πάχους βασαλτικές κοίτες, απαντώνται επίσης στην ξηρά, κατά μήκος των περιθωρίων της τάφρου, διασχίζοντας το φλοιό, που αποτελείται από προ-κάμβρια πετρώματα, αλλά και αποθέσεις περιθωρίων. Οι κοίτες μπορεί να κατευθύνονται και προς την μεριά της θάλασσας, όπου προεκτείνονται κάτω από τους εβαπορίτες. Από άποψη σύστασης, οι βασάλτες αυτοί είναι ομόλογοι με αυτούς που έχουν εκχυθεί κατά μήκος του ενεργού κεντρικού άξονα της τάφρου.

Στην κεντρική ζώνη του νότιου τμήματος της Ερυθράς Θάλασσας, ο πυθμένας, όπως αναφέρθηκε, φθάνει σε μεγάλα, ωκεανικά, βάθη, που φθάνουν τα 5 km (Εικ. 4.16). Τα σεισμικά δεδομένα υποστηρίζουν ότι το πάχος του φλοιού στη περιοχή αυτή, είναι αντίστοιχο με αυτό που χαρακτηρίζει έναν τυπικό ωκεάνιο φλοιό. Οι έρευνες με γεωφυσικές μαγνητικές μεθόδους, αποκαλύπτουν την παρουσία συμμετρικών μαγνητικών ανωμαλιών, που υποδηλώνουν ότι τα τελευταία 5 εκατομμύρια έτη λαμβάνει χώρα τυπική ωκεάνια διάνοιξη. Ως εκ τούτου λοιπόν, η Ερυθρά Θάλασσα αποτελεί ένα τυπικό παράδειγμα μιας νέο-σχηματισθείσας ωκεάνιας λεκάνης, η οποία σχετικά πρόσφατα, με τη γεωλογική έννοια του χρόνου, εξελίχθηκε από το αρχικό στάδιο της ηπειρωτικής ταφρογένεσης.

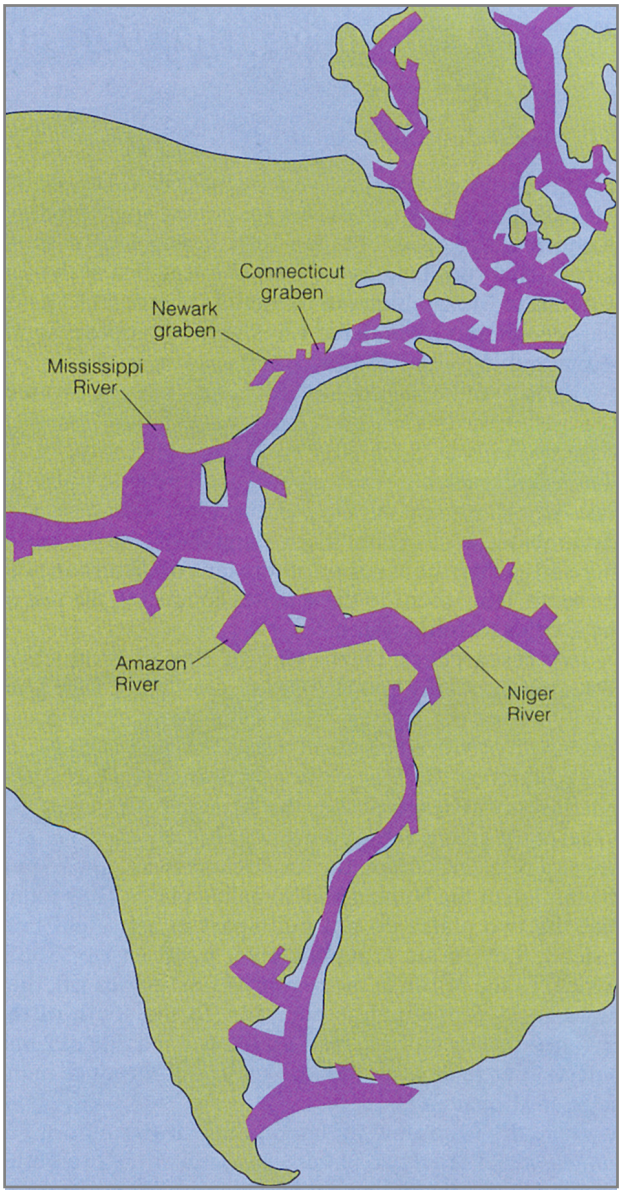
Οι δομές που αναπτύσσονται σε όλη τη ζώνη της μετάβασης από τον ηπειρωτικό στον ωκεάνιο φλοιό στην περίπτωση της Ερυθράς Θάλασσας (βλπ. Εικ. 4.17), αποτελούν ένα πρώτης τάξης μοντέλο για την κατανόηση της εξέλιξης και άλλων ηπειρωτικών περιθωρίων, όπως με λεπτομέρεια θα αναπτυχθεί στα επόμενα.

## 4.4 Παθητικά, ή Ατλαντικού–Τύπου Περιθώρια

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκε και συζητήθηκε η απομάκρυνση των ηπείρων, από το αρχικό στάδιο της ενδοηπειρωτικής ταφρογένεσης (intracontinental rifting, με χαρακτηριστικά παραδείγματα την επαρχία Basin and Range και την Ανατολική Αφρική), μέχρι το επόμενο στάδιο της δημιουργίας μιας νέας στενής ωκεάνιας λεκάνης (με χαρακτηριστικό παράδειγμα την Ερυθρά Θάλασσα). Όσο όμως η διαδικασία της προσθήκης νέου υλικού στην κεντρική ζώνη διάνοιξης προχωρά, τα ηπειρωτικά περιθώρια, που προήλθαν από την ηπειρωτική ταφρογένεση, απομακρύνονται μεταξύ τους και γίνονται πια τμήμα του εσωτερικού της πλάκας, στην οποία το καθένα ανήκει. Η υποκείμενη λιθόσφαιρα ψύχεται, συστέλλεται και καταβυθίζεται ισοστατικά. Καθώς το ηπειρωτικό περιθώριο ακολουθεί αυτή την καταβύθιση, μια μεγάλου πάχους ακολουθία από νηριτικά θαλάσσια ιζήματα επικάθεται πάνω σε αυτό.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιου τύπου περιθωρίων, περιλαμβάνουν τα σημερινά περιθώρια του Ατλαντικού Ωκεανού, τόσο προς την μεριά

της Αμερικανικής ηπείρου, όσο και προς την μεριά της Ευρώπης και της Αφρικής. Στην Εικόνα 4.18 παρουσιάζονται τα περιθώρια αυτά, όχι όπως είναι σήμερα, αλλά ουσιαστικά σε ένα στάδιο αντίστοιχο με αυτό που είναι η Ερυθρά Θάλασσα σήμερα, δηλαδή πριν την απομάκρυνση των ηπείρων και την εξέλιξή τους στη σημερινή εικόνα. Στην επόμενη Εικόνα 4.19, παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τεκτονικές και γεωλογικές τομές από το ΒΑ ηπειρωτικό περιθώριο της πλάκας της Βόρειας Αμερικής και από το ΒΔ ηπειρωτικό περιθώριο της Αφρικανικής πλάκας.




***Εικόνα 4.18.*** *Ανακατασκευή των ηπείρων που περιβάλλουν τον Ατλαντικό, πριν την απομάκρυνσή τους. Τα ηπειρωτικά περιθώρια βρίσκονται σε ένα στάδιο διάνοιξης, αντίστοιχο με αυτό που βρίσκεται σήμερα η Ερυθρά Θάλασσα. Διακρίνονται επίσης οι αποτυχημένοι κλάδοι (failed arms), της ταφρογένεσης, που σήμερα αποτελούν, συνήθως, κοιλάδες μεγάλων ποταμών (βλπ. και Κεφ. 4.7).*

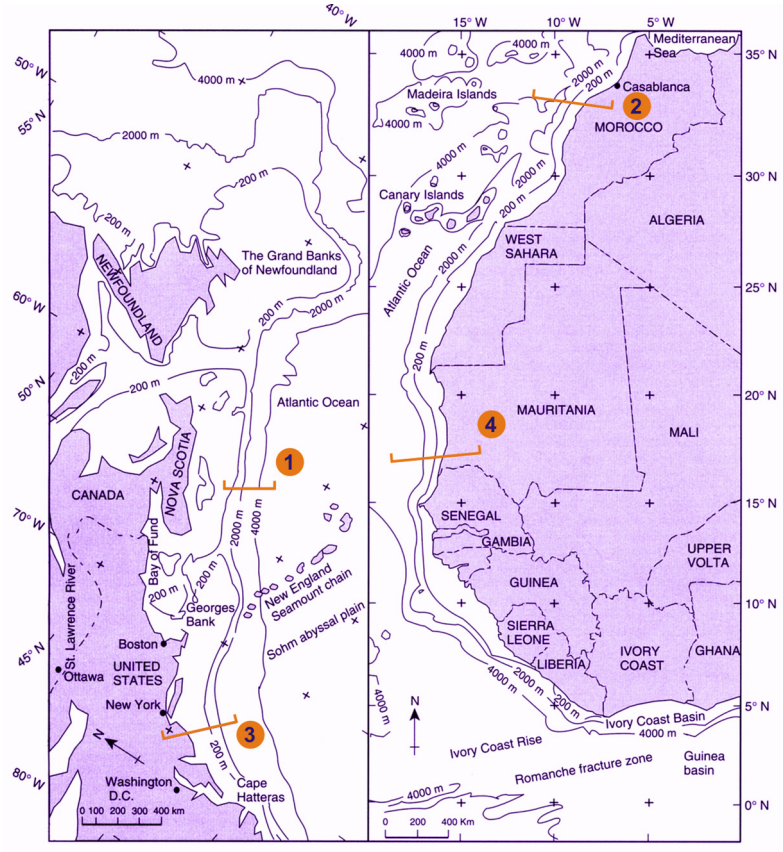
Μια σειρά από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, δομούν τον τύπο των περιθωρίων Ατλαντικού τύπου. Η ακολουθία των νηριτικών θαλάσσιων ιζημάτων, συγκεντρώνεται τυπικά σε περιοχές που στη βάση τους αναπτύσσεται ένα παλαιό, συνήθως κρυσταλλικό, ηπειρωτικό υπόβαθρο (βλπ. τομές Εικ. 4.19). Τα ιζήματα, σε γενικές γραμμές, αποτίθενται απ' ευθείας πάνω στο υπόβαθρο, σχηματίζοντας έτσι μια βαθειά ασυμφωνία. Το ηπειρωτικό υπόβαθρο, που πρωτογενώς έχει το τυπικό πάχος, εκλεπτύνεται προς την πλευρά του περιθωρίου, λόγω της δράσης εφελκυστικών λιστρικών κανονικών ρηγμάτων, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται σε πολλά σεισμικά προφίλ.

Σε ορισμένες περιοχές, λεκάνες που οριοθετούνται από ρήγματα και είναι πληρωμένες με ηπειρωτικά ιζήματα, υπέρκεινται του κρυσταλλικού υποβάθρου. Κατά μήκος του Βορειο-Αμερικανικού ηπειρωτικού περιθωρίου, αυτές οι λεκάνες είναι πληρωμένες με τριαδικο-ιουρασικής ηλικίας ιζήματα. Βασαλτικά πετρώματα εντοπίζονται στους ανώτερους στρωματογραφικούς ορίζοντες αυτών των τεκτονικών λεκανών. Όλα αυτά τα πετρώματα στη συνέχεια, περιστρέφονται και διαβρώνονται, πριν την απόθεση των νηριτικών θαλάσσιων ιζημάτων, καταδεικνύοντας έτσι τη συνεχή δράση των λιστρικών ρηγμάτων.

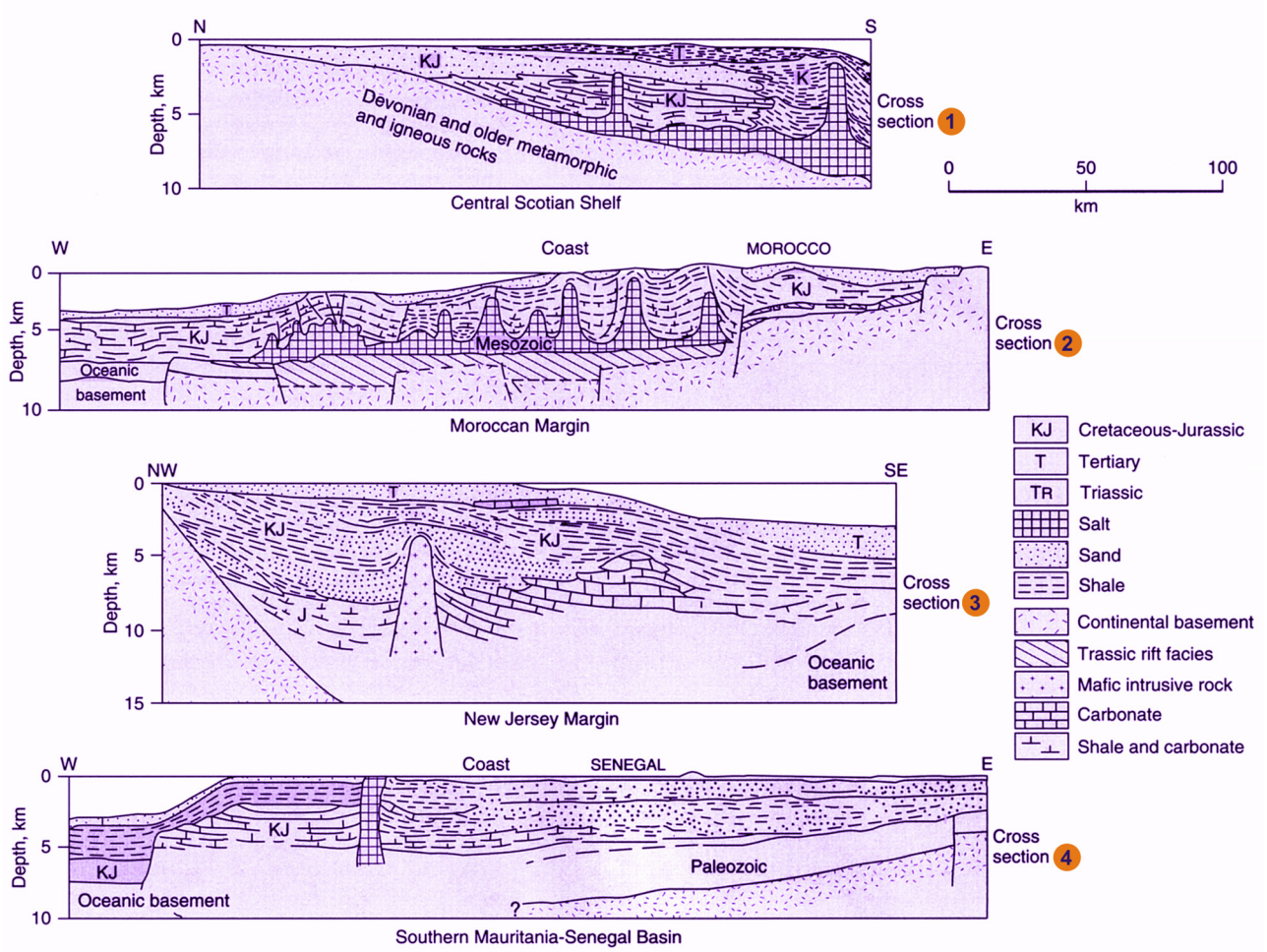
Το πάχος των νηριτικών θαλάσσιων ιζημάτων, που έχουν αποτεθεί σε παλαιότερα πετρώματα, αυξάνει σημαντικά προς το ηπειρωτικό χείλος (Εικ. 4.19). Αρκετές θαλάσσιες ακολουθίες ξεκινούν με ένα παχύ στρώμα εβαποριτών, αντίστοιχο με αυτό που περιγράφηκε για την Ερυθρά Θάλασσα. Τα στρώματα αυτά των εβαποριτών, σχηματίζουν μεταγενέστερα, λόγω διαπειρικών φαινομένων, ζώνες από δόμους, που παρουσιάζουν μεγάλη οικονομική σημασία, λόγω της δημιουργίας παγίδων πετρελαίου (Εικ. 4.19, τομές 1 & 2).

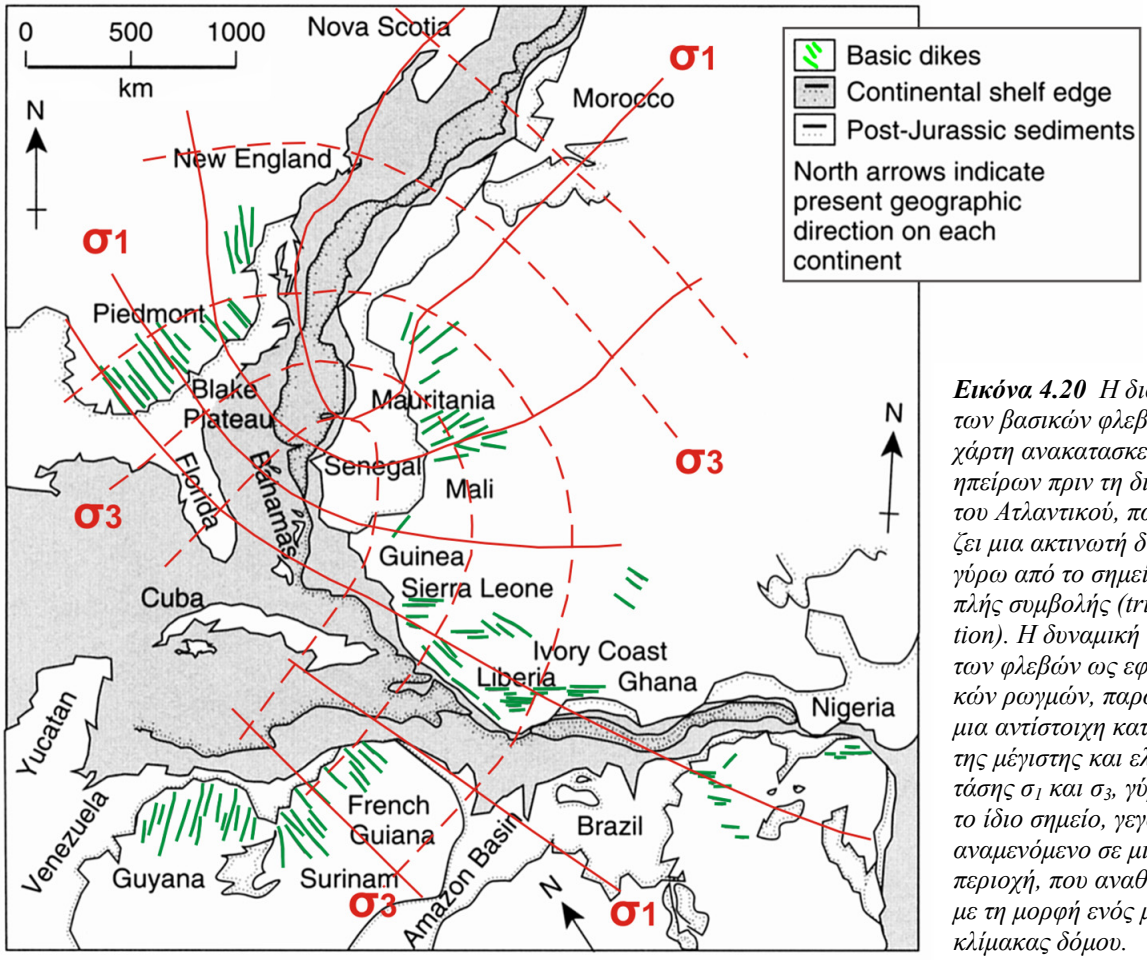
Σε πολλές ιζηματογενείς ακολουθίες παρατηρείται μια σημαντική μείωση του πάχους τους, πάνω από ενταφιασμένες ράχεις, που συνήθως εντοπίζονται στο εξωτερικό χείλος της ηπείρου. Οι ράχεις αυτές αντιπροσωπεύουν συνήθως: ενταφιασμένα τεκτονικά κέρατα ή περιστραμμένα ρηξιτεμάχη (Εικ. 4.19), κάποιο τύπο διεισδύσεων όπως διάπειρους εβαποριτών ή ηφαιστειακά πετρώματα (Εικ. 4.19, τομές 1 & 2), ή, σπανιότερα, ενταφιασμένους ανθρακικούς υφάλους (Εικ. 4.19, τομή 3).

Στην ηπειρωτική κατωφέρεια, τα ιζήματα αυξάνουν επίσης το πάχος τους προς την μεριά της θάλασσας και αποτελούνται από βαθειάς θάλασσας ριπιδιακές αποθέσεις, που έχουν αποσπασθεί από το ηπειρωτικό χείλος και τοποθετηθεί στον πυθμένα του ωκεανού. Συνιζηματογενή, επαυξητικά ρήγματα (growth faults), είναι συνήθη στις ακολουθίες αυτές.




***Εικόνα 4.19.*** *Γεωλογικές και τεκτονικές τομές εγκάρσια στα παθητικού-(ή Ατλαντικού-) τύπου ηπειρωτικά περιθώρια της ΒΑ Αμερικής και της ΒΔ Αφρικής. Η ακριβής θέση των τομών σημειώνεται στο χάρτη που τις συνοδεύει και ο οποίος παρουσιάζει, επίσης, τη γεωγραφία και βαθυμετρία της ευρύτερης περιοχής. Οι τομές είναι σχεδιασμένες όλες με την ίδια κλίμακα και έχουν κατακόρυφη παραμόρφωση 5:1.*



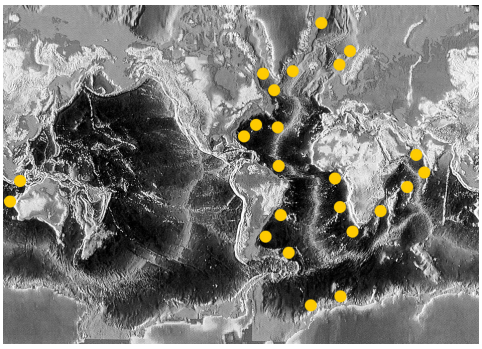



***Εικόνα 4.20*** *Η διάταξη των βασικών φλεβών, στο χάρτη ανακατασκευής των ηπείρων πριν τη διάνοιξη του Ατλαντικού, παρουσιάζει μια ακτινωτή διάταξη γύρω από το σημείο τριπλής συμβολής (triple junction). Η δυναμική ανάλυση των φλεβών ως εφελκυστικών ρωγμών, παρουσιάζει μια αντίστοιχη κατανομή της μέγιστης και ελάχιστης τάσης $\sigma_1$ και $\sigma_3$, γύρω από το ίδιο σημείο, γεγονός αναμενόμενο σε μια μεγάλη περιοχή, που αναθολώνεται με τη μορφή ενός μεγάλης κλίμακας δόμου.*

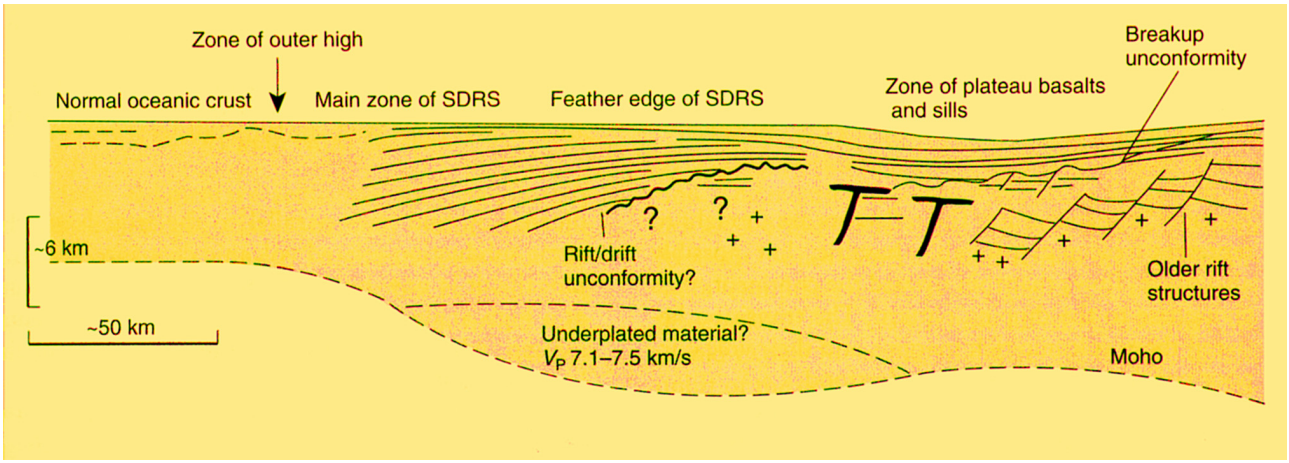
Όπως και στην Ερυθρά Θάλασσα, έτσι και στην περίπτωση αυτή τα αρχικά στάδια της ταφρογένεσης χαρακτηρίζονται από την τοποθέτηση βασαλτικών πετρωμάτων, που συνήθως πραγματοποιείται με δύο διαφορετικούς τύπους: είτε ως φλέβες στον διερρηγμένο ηπειρωτικό φλοιό, είτε, σε συγκεκριμένες περιοχές, ως ογκώδεις εκχύσεις μάγματος κατά μήκος των ηπειρωτικών περιθωρίων.

Ανακατασκευάζοντας και φέρνοντας στην αρχική τους θέση, τις ηπείρους του κεντρικού Ατλαντικού Ωκεανού, παρατηρεί κανείς ότι οι φλέβες που διασχίζουν τα πετρώματα του υποβάθρου κατά μήκος των περιθωρίων, παρουσιάζουν ένα ακτινωτό σχήμα (Εικ. 4.20). Η μηχανική της δημιουργίας και τοποθέτησης των φλεβών, εξηγεί ότι η πίεση σε ένα μαγματικό θάλαμο αυξάνεται μέχρι το σχηματισμό μιας εφελκυστικής διάρρηξης στα τοιχώματα του θαλάμου. Το μάγμα διεισδύει κατά μήκος της διάρρηξης αυτής και στερεοποιείται, σχηματίζοντας μια φλέβα ή μια κοίτη. Επειδή η διάρρηξη αυτή έχει εφελκυστικό χαρακτήρα, προσανατολίζεται εγκάρσια ως προς τον άξονα της ελάχιστης συμπιεστικής τάσης $\sigma_3$ και παράλληλα στους άξονες της μέγιστης και ενδιάμεσης συμπιεστικής τάσης $\sigma_1$ και $\sigma_2$.

Στην ίδια εικόνα (Εικ. 4.20), παρουσιάζεται μια ερμηνεία των ιχνών που καταγράφουν οι προβολές των τάσεων, βασισμένη στο μοντέλο αυτό του σχηματισμού των φλεβών. Η μέγιστη συμπιεστική τάση $\sigma_1$ προσανατολίζεται ακτινωτά, γύρω από τη μικρή τριγωνική περιοχή που σχηματίζουν οι τρεις συνενωμένες ήπειροι της Βόρειας Αμερικής, Νότιας Αμερικής και Αφρικής. Αντίθετα η ελάχιστη συμπιεστική τάση $\sigma_3$ προσανατολίζεται σε μια κυκλοειδή διάταξη, γύρω από την ίδια περιοχή. Η κατανομή αυτή των τάσεων είναι ακριβώς αυτό που αναμένεται από μιας μεγάλης διαμέτρου (της τάξης των 2.500 km), αναθόλωσης του φλοιού με τη μορφή ενός δόμου, που λαμβάνει χώρα σε ένα σημείο τριπλής συμβολής (βλπ. και Κεφ. 4.7). Η εικόνα αυτή άλλωστε θυμίζει πολύ αυτή που περιγράφηκε για τους δόμους που αναπτύσσονται κατά μήκος της τεκτονικής τάφρου της Ανατολικής Αφρικής (βλπ. Εικ. 4.14). Η ηφαιστειότητα που συνοδεύει την αναθόλωση αυτή και οι ηφαιστειακές αποθέσεις που εμφανίζονται μόνο στα ανώτερα τμήματα των ιζημάτων της τάφρου κατά μήκος της ΒΑ ακτής των Η.Π.Α., καταδεικνύουν διαφορετικό χρόνο έναρξης της ηφαιστειότητας στη διαδικασία της αρχικής ταφρογένεσης και ως εκ τούτου διαφορές στις γεωδυναμικές διεργασίες (βλπ. και Κεφ. 4.7 & 4.8).



***Εικόνα 4.21*** *Παθητικά περιθώρια πλούσια σε ηφαιστειακά, έχουν εντοπισθεί σε αρκετές περιοχές (κίτρινες τελείες στο χάρτη). Όπως δείχνει η τομή από ένα τέτοιο περιθώριο, η ζώνη των ανακλαστήρων, που αντιπροσωπεύει τα ηφαιστειακά, παρουσιάζει μια χαρακτηριστική κλίση προς την μεριά της θάλασσας και μια εκλέπτυνση προς την μεριά της ξηράς. Η ζώνη αυτή διαχωρίζει το διερρηγμένο ηπειρωτικό περιθώριο από τον τυπικό ωκεάνιο φλοιό.*




Ηπειρωτικά περιθώρια που είναι πλούσια σε ηφαιστειακά πετρώματα και στις γεωφυσικές διασκοπήσεις οι ανακλαστήρες παρουσιάζουν μια κλίση προς την μεριά της θάλασσας, εντοπίζονται σε αρκετές περιοχές, με παθητικού τύπου περιθώρια, σε ολόκληρο τον πλανήτη. Στην Εικόνα 4.21 παρουσιάζεται ένα χάρτης όπου έχουν εντοπισθεί τέτοιου τύπου περιθώρια, καθώς και μια χαρακτηριστική τεκτονική τομή εγκάρσια σε ένα από αυτά. Διακρίνεται η χαρακτηριστική κλίση της ζώνης των ανακλαστήρων προς την μεριά της θάλασσας, που χωρίζει το διερρηγμένο ηπειρωτικό περιθώριο από τη μια, με τον τυπικό ωκεάνιο φλοιό από την άλλη. Οι ανακλαστήρες αυτοί αντιπροσωπεύουν πιθανά ηφαιστειακές εκχύσεις (βασαλτικής, κυρίως, αλλά και πυριτικής σύστασης) και εκλεπτύνονται προς την μεριά της ηπείρου. Η μετάβαση ανάμεσα στα περιθώρια με πλούσια ηφαιστειότητα και στα ομόλογά τους με φτωχή ηφαιστειότητα, αποτελεί ένα μηχανισμό και μια διαδικασία, που δεν έχει ακόμα κατανοηθεί.

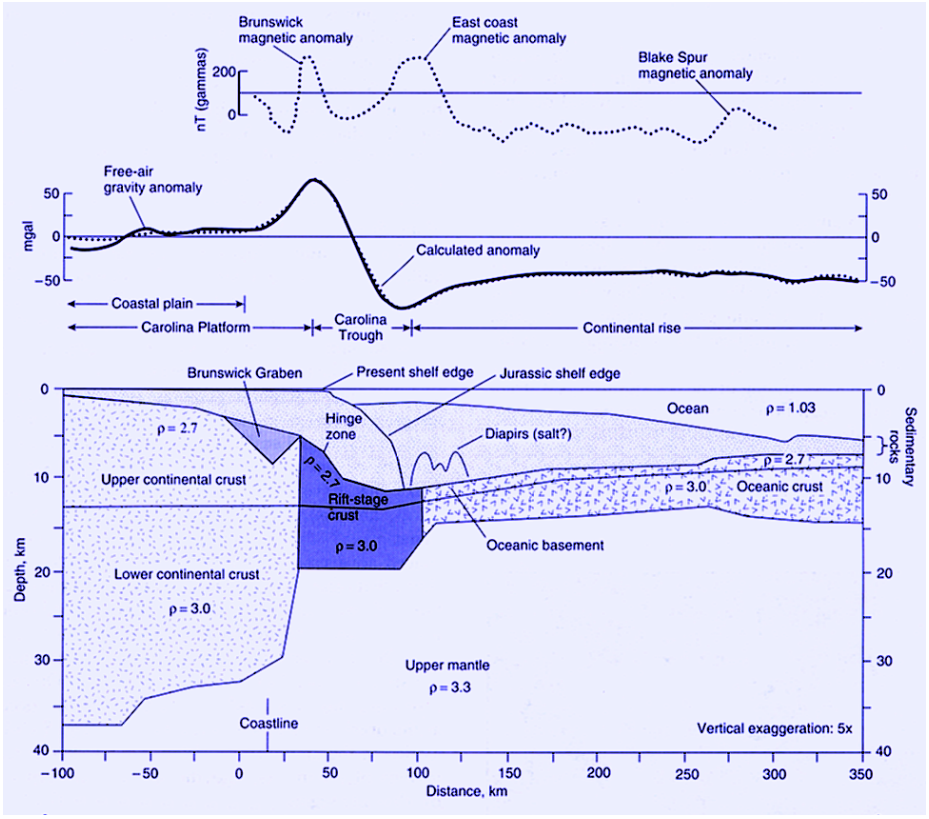
Τα ηπειρωτικά περιθώρια που αναλύθηκαν μέχρι τώρα, αντιπροσωπεύουν συνήθως περιπτώσεις, όπου η διάνοιξη προσανατολίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να σχηματίζει μια, λιγότερο ή περισσότερο, μεγάλη γωνία σε σχέση με ένα γραμμικό ηπειρωτικό περιθώριο. Άλλα ηπειρωτικά περιθώρια παρουσιάζουν έντονες καμπές, όπως αυτά της Νότια Αμερικής και Αφρικής, που στο παρελθόν συνέπιπταν (βλπ. Εικ. 4.18). Στην προσπάθεια ανακατασκευής της αρχικής ηπείρου που διαχωρίσθηκε, παρατηρείται ότι τα ηπειρωτικά περιθώρια της Αφρικής παρουσιάζουν δύο τμήματα, ένα περίπου Β-Ν και ένα περίπου Α-Δ, που στην ουσία αντιπροσωπεύουν τους δύο από τους τρεις κλάδους του συστήματος διαρρήξεων, που ακτινωτά σχηματίζονται κατά την απαρχή της αναθόλωσης και της ταφρογένεσης (για λεπτομέρειες βλπ. Κεφ. 4.7). Ο τρίτος κλάδος σήμερα αντιπροσωπεύεται από μια μεγάλη ταφροειδή δομή, ΒΑ διεύθυνσης, που αναπτύσσεται μέσα στην Αφρική, γνωστή με το όνομα Αύλακα Benue (Benue Trough, βλπ. Εικ. 4.14 και Εικ. 4.18), που είναι πληρωμένη με μια μεγάλου πάχους θαλάσσια ιζηματογενή ακολουθία πετρωμάτων. Στα πρώτα στάδια του αποχωρισμού της Αφρικής από τη Νότια Αμερική, αυτές οι τρεις τάφροι σχημάτιζαν ένα σημείο τριπλής συμβολής (triple junction), του τύπου Ράχη-Ράχη-Ράχη (RRR, βλπ. Κεφ. 3, Εικ. 3.5). Οι δύο από αυτούς τους κλάδους συνέχισαν τη διάνοιξή τους, μέχρι να γίνουν τμήματα του Ατλαντικού Ωκεανού. Ο τρίτος κλάδος, η Benue Trough, απέτυχε να εξελιχθεί με τον ίδιο τρόπο, άρα αποτελεί αυτό, που στην Εισαγωγή του Κεφαλαίου 4, ορίσθηκε ως αποτυχημένος κλάδος (failed arm, βλπ. Πίνακα 4.1). Μάλιστα στη συνέχεια η τάφρος αυτή, επηρεασμένη από ένα συ-

μπιεστικό γεγονός, έκλεισε, όπως αποδεικνύεται από άξονες πτυχών, που αναπτύσσονται παράλληλα με την τάφρο, αλλά και από περιορισμένης έκτασης ηφαιστειακές αποθέσεις, που συνδέονται με υποβύθιση. Ως εκ τούτου αποτελεί και ένα αυλακογενές (aulacogen), σύμφωνα με τον ορισμό που δόθηκε στον Πίνακα 4.1. Σήμερα, από μορφολογική άποψη, αποτελεί μόνο μια μορφολογική ταπείνωση, που φιλοξενεί το τελευταίο τμήμα και το δέλτα του μεγάλου ποταμού Νίγηρα (βλπ. Εικ. 4.18).

Αυτές οι έντονες καμπές που παρουσιάζουν τα ηπειρωτικά περιθώρια, όπως αυτή της Νότιας Αμερικής – Αφρικής, συνοδεύονται από την ανάπτυξη ενός βυθίσματος, με διεύθυνση από το κορυφαίο προς το κοίλο τμήμα του καμπύλου περιθωρίου, δηλαδή προς την μεριά της ξηράς. Τα βυθίσματα αυτά αντιπροσωπεύουν, συνήθως, τους αποτυχημένους κλάδους (failed arms), σημείων τριπλής συμβολής (triple junctions), τύπου RRR (Ράχη-Ράχη-Ράχη). Στην Εικόνα 4.18 παρουσιάζεται ένας αριθμός τέτοιων δομών, που αναπτύσσονται γύρω από τα περιθώρια του Ατλαντικού Ωκεανού και φιλοξενούν, συνήθως, τμήματα μεγάλων ποταμών (Νίγηρας, Αμαζόνιος, Μισισιπής κλπ.). Όπως αναφέρθηκε, οι αποτυχημένοι αυτοί κλάδοι, μπορούν να θεωρηθούν και ως το σύγχρονο ανάλογο των αυλακογενών (aulacogens), που αναπτύσσονται στις ηπειρωτικές πλατφόρμες (βλπ. Κεφ. 2, Εικ. 2.10). Ένα συνολικό μοντέλο για την ανάπτυξη του Ατλαντικού, καθώς και ένα συγκριτικό μοντέλο που ερμηνεύει τη διαφορετική εξέλιξη μιας ωκεάνιας λεκάνης και ενός αυλακογενούς, παρουσιάζονται στο Κεφ. 4.7.

Τα πετρώματα των ωκεανών, διαφέρουν σημαντικά από αυτά των ηπείρων, τόσο στη σύσταση όσο και στη δομή, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2. Τα παθητικά περιθώρια, στα διάφορα στάδια της ανάπτυξής τους, που περιγράφησαν στα προηγούμενα, προσφέρουν κάποιες ενδείξεις για το χαρακτήρα της μετάβασης αυτής από τον ένα τύπο φλοιού στον άλλο, παραμένουν όμως αδιευκρίνιστα πολλά πράγματα ακόμα. Τα σεισμικά προφίλ δίνουν πολύ λίγες πληροφορίες για την πολύ βαθειά θαμμένη μετάβαση ανάμεσα στον ηπειρωτικό και ωκεάνιο φλοιό (βλπ. για παράδειγμα τα προφίλ της Εικ. 4.19). Οι τεχνικές της σεισμικής διάθλασης, που δίνουν ικανοποιητικά μοντέλα για οριζόντια στρώματα, δεν μπορούν να αποδώσουν στις εξαιρετικά πολύπλοκες αυτές περιοχές των περιθωρίων, όπου ο χαρακτήρας των πετρωμάτων αλλάζει δραματικά σε μικρές αποστάσεις.

Οι γεωφυσικές έρευνες στις παρυφές των ηπείρων, παρουσιάζουν προφίλ με χαρακτηριστικές βαρυτικές και μαγνητικές ανωμαλίες (Εικ. 4.22). Το βαρυτικό προφίλ για ένα τυπικό παθητικό περιθώριο παρουσιάζει ένα ευδιάκριτο μέγιστο στη ζώνη της (ομαλής κατά τα άλλα), μετάβασης από της




***Εικόνα 4.22*** *Χαρακτηριστικά γεωφυσικά προφίλ, κατά μήκος ενός τυπικού παθητικού ηπειρωτικού περιθωρίου (ανατολικές ακτές Βόρειας Αμερικής). Τα βαρυτικά προφίλ παρουσιάζουν ένα τυπικό μέγιστο στη ζώνη μετάβασης, ενώ οι μαγνητικές ανωμαλίες παρουσιάζουν μια πιο πολύπλοκη εικόνα.*

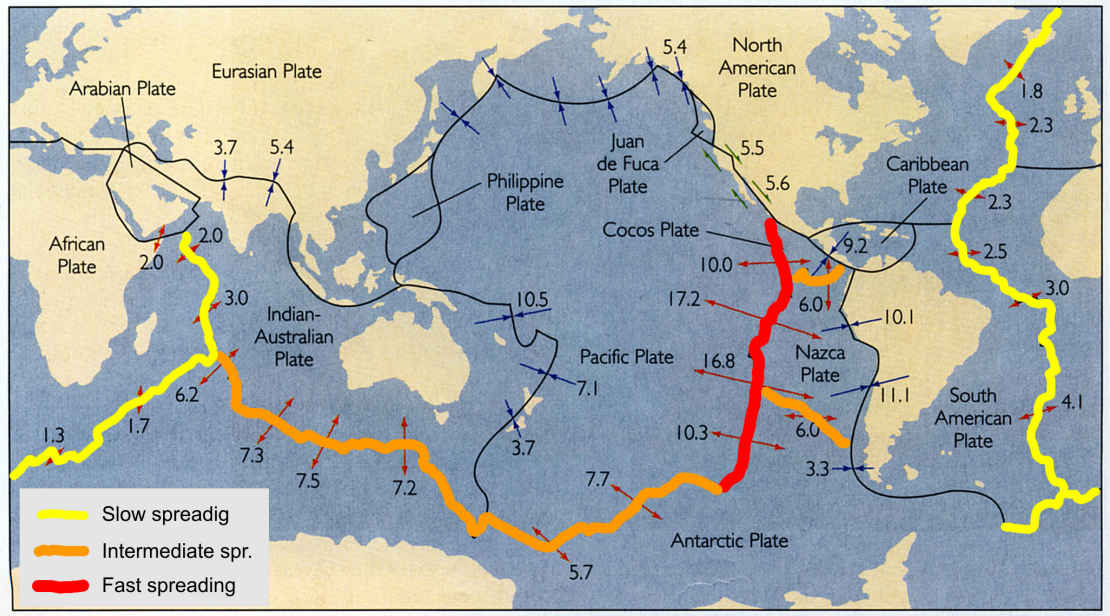
υψηλές τιμές του ωκεάνιου φλοιού στις χαμηλές του ηπειρωτικού.

Τα προφίλ των μαγνητικών ανωμαλιών είναι περισσότερο σύνθετα. Ορισμένα, παρουσιάζουν περισσότερα από ένα μέγιστα στη μετάβαση ανάμεσα στον ωκεάνιο και ηπειρωτικό φλοιό, ενώ άλλα μια πολλή ομαλή μετάβαση.

Επισημαίνεται ότι τα προφίλ αυτά είναι πολύ χρήσιμα και για το λόγο της σύγκρισης με ομόλογα από τις περιοχές των ορογενετικών αλυσίδων στο εσωτερικό των ηπείρων, δεδομένου ότι μπορεί να αντιπροσωπεύουν παλαιά ηπειρωτικά περιθώρια, αντίστοιχα με τα σημερινά, Ατλαντικού– τύπου, περιθώρια.

των μαγνητικών ανωμαλιών, είναι πολύ σημαντική, δεδομένου ότι σε κάθε περίπτωση υφίστανται σημαντικές διαφορές στην τοπογραφία, την κατανομή των πετρωμάτων και τη δομή (Εικ. 4.24). Σημαντικές και ευδιάκριτες διαφορές εντοπίζονται επίσης στα πρότυπα των μαγνητικών και βαρυτικών ανωμαλιών, αλλά και στην κατανομή της σεισμικότητας και της θερμικής ροής.

Η γνώση της σύστασης και δομής του ωκεάνιου πυθμένα προέρχεται από ένα μεγάλο αριθμό δειγμάτων από πυρήνες γεωτρήσεων και δειγματολήπτες βυθού, αλλά και από τη μελέτη ακολουθιών πετρωμάτων του ωκεάνιου φλοιού, που σήμερα έχουν αποκαλυφθεί στην ξηρά. Οι ακολουθίες αυ-




***Εικόνα 4.23*** *Χάρτης του παγκόσμιου συστήματος μεσο-ωκεάνιων ραχών, ταξινομημένο ανάλογα με το ρυθμό διάνοιξης. Σημειώνονται και οι σχετικές ταχύτητες κίνησης (σε cm/yr), τόσο για τα αποκλίνοντα, όσο και για τα συγκλίνοντα περιθώρια των πλακών.*

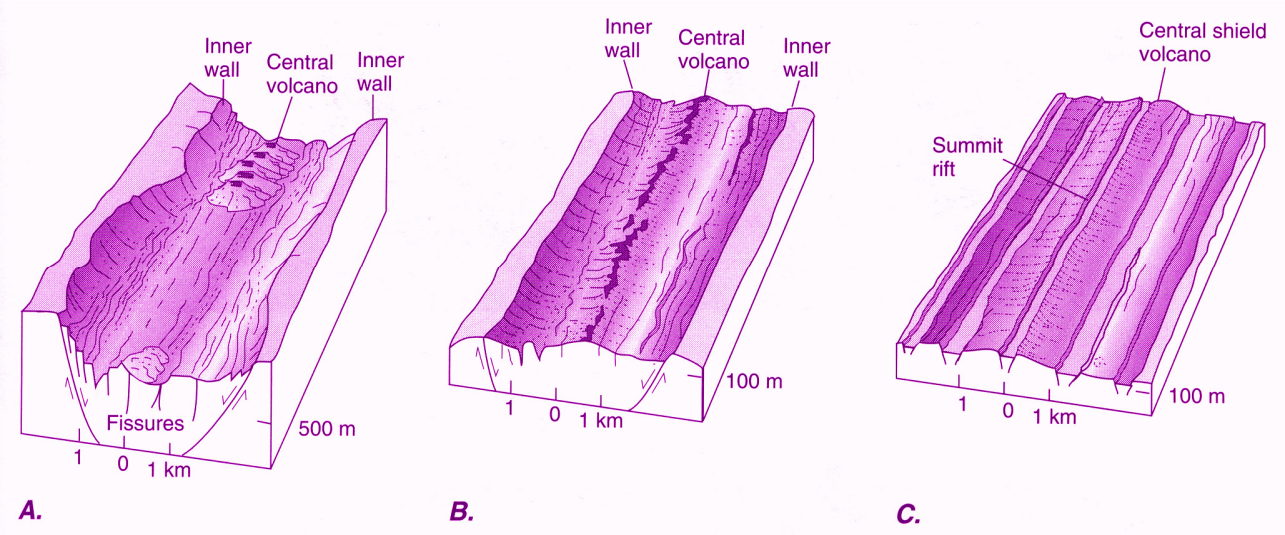
## 4.5 Ωκεάνιος Φλοιός και Κέντρα Ωκεανικής Διάνοιξης

Αφήνοντας τα ηπειρωτικά περιθώρια και προχωρώντας προς το εσωτερικό της θαλάσσιας λεκάνης, ο βαθύς πυθμένας του ωκεανού αποτελείται από πετρώματα που δημιουργούνται κυρίως στα αποκλίνοντα περιθώρια των πλακών. Στην Εικ. 4.23 παρουσιάζεται το παγκόσμιο σύστημα ωκεανικής διάνοιξης (word oceanic rift system), όπου ο κάθε κλάδος είναι ταξινομημένος ανάλογα με το ρυθμό διάνοιξης που τον χαρακτηρίζει. Η διάκριση των αποκλινόντων περιθωρίων των πλακών σε αργής– (1-5 cm/yr), μέσης– (5-9 cm/yr) και ταχείας– (9-18 cm/yr) διάνοιξης, όπως προκύπτει από την ανάλυση

τές είναι γνωστές με το όνομα "οφιόλιθοι" και αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων για την ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων και ως εκ τούτου και των γωδυναμικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία της διάνοιξης.

### *Μορφολογία του Θαλάσσιου Πυθμένα στα Κέντρα Διάνοιξης*

Σε ένα μοντέλο δύο διαστάσεων, η αργής–διάνοιξης μεσο-ωκεάνιες ράχεις (Εικ. 4.24Α), παρουσιάζουν μια βαθειά αξονική τάφρο, που κατεβαίνει 1,5 έως 3 km κάτω από το επίπεδο του γειτονικού πυθμένα και ένα τραχύ και ανώμαλο διερρηγμένο ανάγλυφο, που είναι περίπου συμμετρικό




***Εικόνα 4.24*** *Σχηματικά διαγράμματα όπου απεικονίζεται η μορφολογία και η δομή των αξονικών ζωνών των μεσο-ωκεάνιων ράχεων, ανάλογα με το ρυθμό διάνοιξης. Η κατακόρυφη παραμόρφωση της κλίμακας είναι 2:1.* ***A.*** *Ράχεις που χαρακτηρίζονται από αργό ρυθμό διάνοιξης (1–5 cm/yr),* ***B.*** *Ράχεις που χαρακτηρίζονται από μέσο ρυθμό διάνοιξης (5–9 cm/yr) και* ***C.*** *Ράχεις που χαρακτηρίζονται από ταχύ ρυθμό διάνοιξης (9–18 cm/yr).*

γύρω από τον άξονα της ράχης. Στο κέντρο της αξονικής τάφρου αναπτύσσεται κατά διαστήματα μια επιμήκης ζώνη από συστάδες ηφαιστείων. Η χαρακτηριστική αυτή μορφολογία αναπτύσσεται κατά μήκος των κορυφαίων τμημάτων της ίδιας της μεσο-ωκεάνιας ράχης.

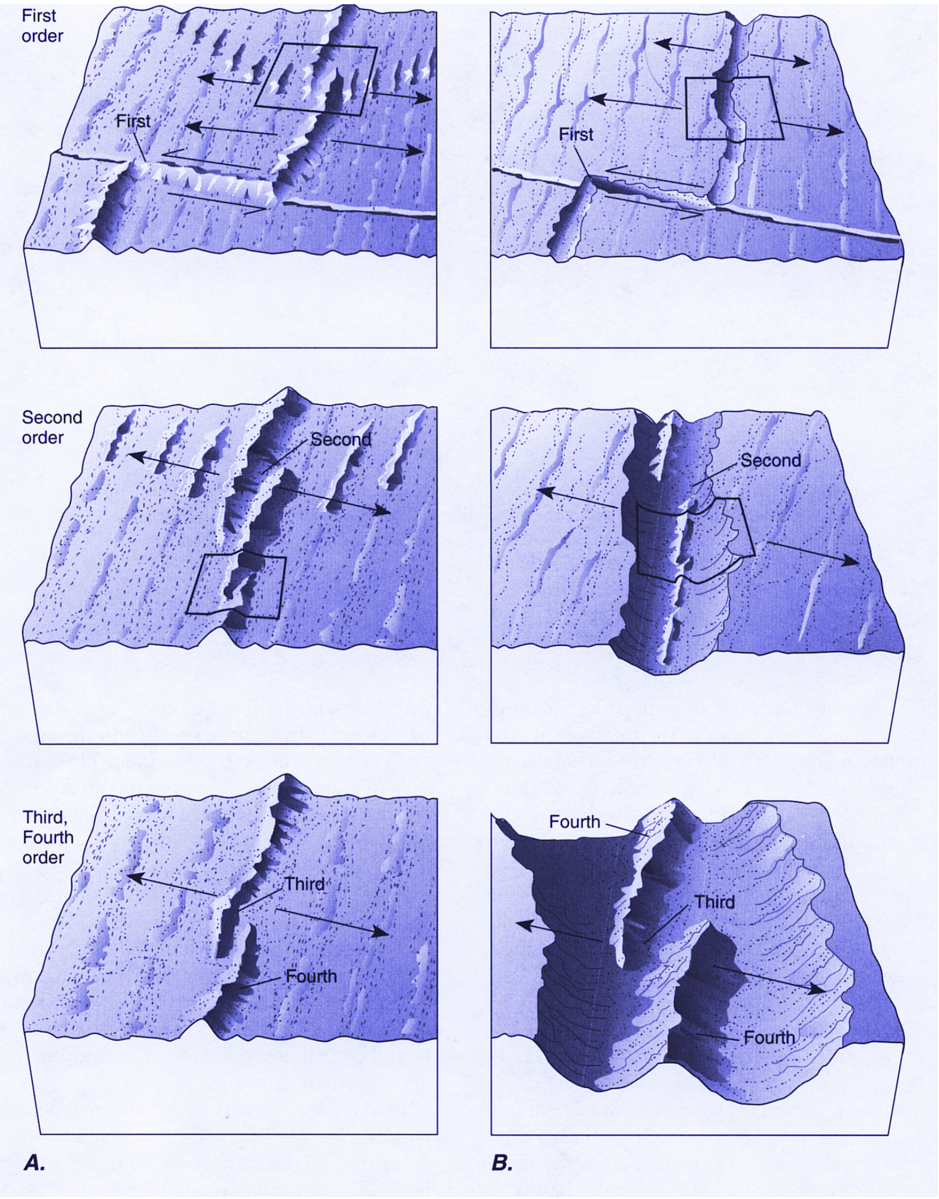
Τα αποκλίνοντα περιθώρια με ενδιάμεσο ρυθμό διάνοιξης, παρουσιάζουν μια πιο ήπια μορφολογία, σε σχέση με τα προηγούμενα (Εικ. 4.24B). Αξονική τάφρος εμφανίζεται και σε αυτή την περίπτωση, μόνο που το βάθος της δεν ξεπερνά τα 100 έως 200 m. Ηφαίστεια σχηματίζονται και εδώ, σχεδόν σε όλο το μήκος της κεντρικής ζώνης, με μικρές διακοπές, και συνήθως διατέμνονται από εφελκυστικές διαρρήξεις, που αναπτύσσονται σε λοξή-κλιμακωτή διάταξη (en echelon), κατά μήκος των κορυφών των ηφαιστείων.

Οι ταχείας–διάνοιξης ράχεις τυπικά δεν παρουσιάζουν αξονική τάφρο (Εικ. 4.24C). Το σύστημα των ηφαιστείων που αναπτύσσεται στο κέντρο της διάνοιξης είναι ακόμα πιο συνεχές και θυμίζει τα ηφαίστεια της Χαβάης, που χαρακτηρίζονται από την ανάπτυξη μια μικρής τάφρου ή ράχης, στα κορυφαία τμήματα. Η μορφολογία είναι πολύ ομαλή, σε πλήρη αντίθεση με την περίπτωση των αργής–διάνοιξης ράχεων.

Αν και το σύστημα μεσο-ωκεάνιων ράχεων μπορεί να θεωρηθεί συνεχόμενο σε κλίμακα γήϊνης σφαίρας, εν τούτοις σε πιο τοπικό επίπεδο παρουσιάζονται συγκεκριμένα πρότυπα ασυνεχειών, που διακόπτουν τη μορφολογική συνέχεια των ράχεων και μάλιστα έχουν ταξινομηθεί σε διάφορες τάξεις, ανάλογα με την κλίμακα εμφάνισης (Εικ. 4.25). Οι ασυνέχειες πρώτης τάξης αντιπροσωπεύονται από τα ρήγματα μετασχηματισμού, που συνήθως επαναλαμβάνονται κάθε 300 έως 500 km και μεταθέτουν τη ράχη και την αξονική τάφρο (όπου υπάρχει), το λιγότερο κατά 20 km και συνηθέστερα περισσότερο από 50 km.

Οι ασυνέχειες δεύτερης τάξης παρουσιάζουν μια συχνότητα εμφάνισης κάθε 50 έως 300 km. Στις ράχες με αργό ρυθμό διάνοιξης εμφανίζονται ως καμπές ή λοξές μεταθέσεις της αξονικής τάφρου (Εικ. 4.25B). Στις ταχείας–διάνοιξης ράχες παρατηρείται μια επικάλυψη των απολήξεων του άξονα διάνοιξης εκατέρωθεν της ασυνέχειας (Εικ. 4.25A). Η επικάλυψη αυτή είναι της τάξης των μερικών έως δεκάδων χιλιομέτρων και η απόσταση ανάμεσα στα επικαλυπτόμενα τμήματα φθάνει το 1/3 της επικάλυψης. Η περιοχή ανάμεσα στα επικαλυπτόμενα τεμάχη αντιπροσωπεύει μια υποθαλάσσια λεκάνη με βάθος μερικών εκατοντάδων μέτρων.

Οι τρίτης τάξης ασυνέχειες στις ταχείας–διάνοιξης ράχες είναι συνήθως μικρές επικαλύψεις και στις αργής–διάνοιξης διάκενα ανάμεσα σε αλυσίδες ηφαιστείων. Οι τέταρτης τάξης ασυνέχειες εμφανίζονται ως μικρές κάμψεις στην κατεύθυνση του άξονα (γνωστές με το όνομα devals) για την περίπτωση του ταχέως ή ενδιάμεσου ρυθμού διάνοιξης. Στην αργή διάνοιξη εμφανίζονται ως κενά ανάμεσα σε συστάδες ηφαιστείων. Επισημαίνεται ότι η ύπαρξη αυτών των ασυνεχειών είναι σημαντική για τα μοντέλα που ασχολούνται με την ανάπτυξη των μεσο-ωκεάνιων ράχεων. Διακυμάνσεις παρατηρούνται επίσης και στο υψόμετρο των ράχεων, δεδομένου ότι αυτές παρουσιάζονται υψηλότερες ανάμεσα στις ασυνέχειες απ' ότι όταν πλησιάζουν σ' αυτές.

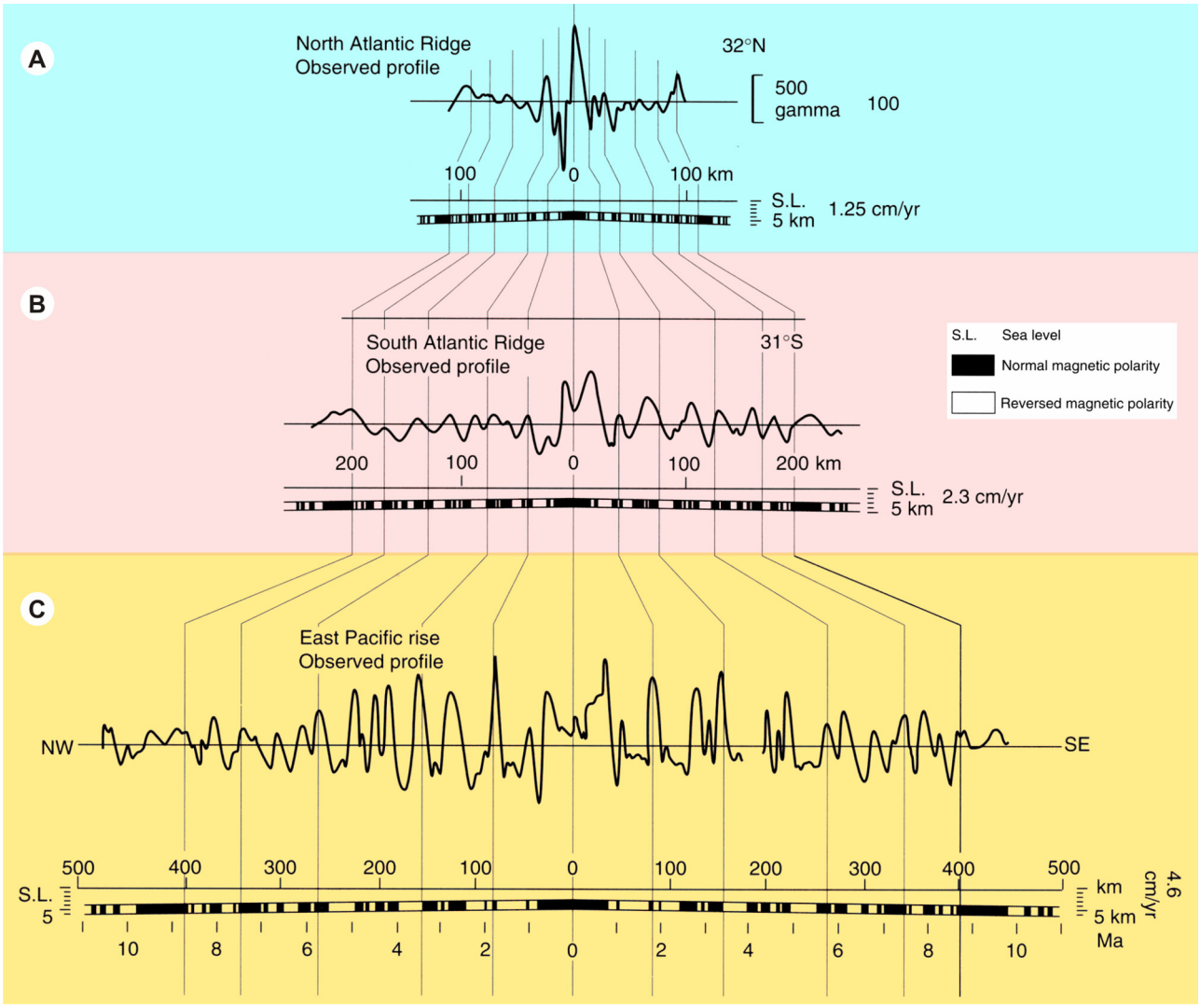


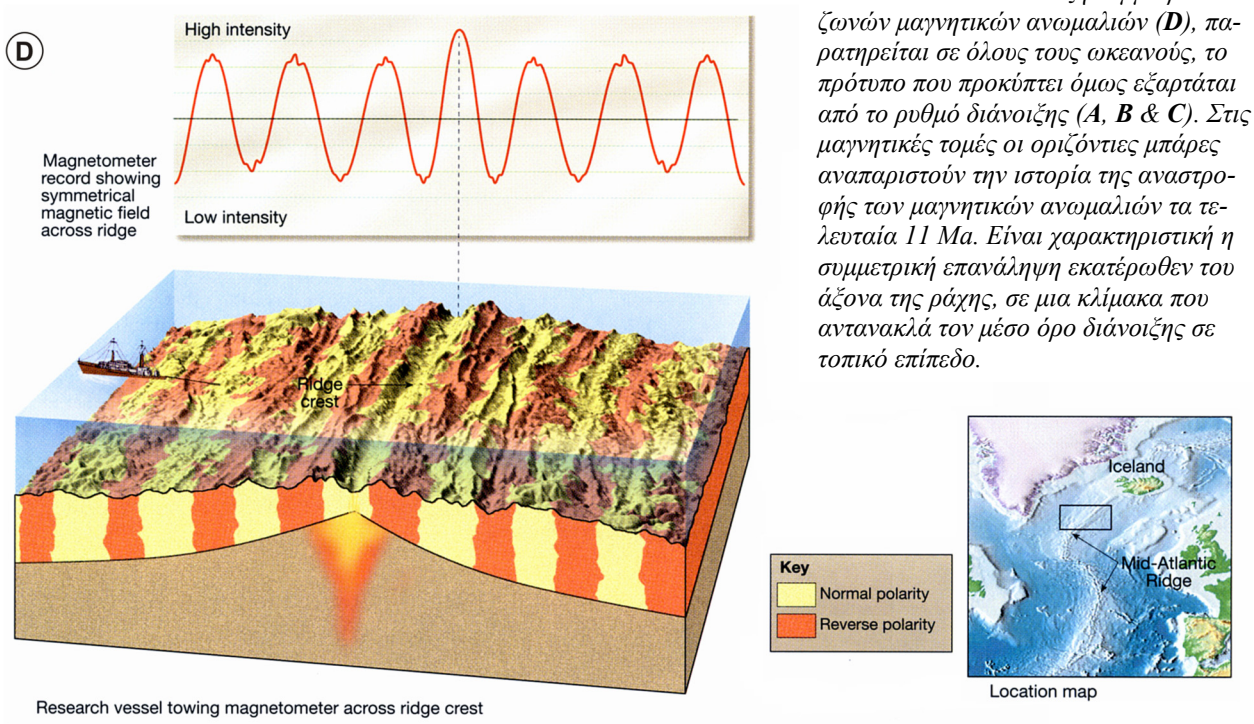

***Εικόνα 4.25*** *Τρισδιάστατη απεικόνιση των ασυνεχειών στις μεσο-ωκεάνιες ράχεις. Οι πρώτης τάξης ασυνέχειες είναι τα ρήγματα μετασχηματισμού. Οι δεύτερης τάξης ασυνέχειες στις ταχείας–διάνοιξης ράχεις είναι μικρές επικαλύψεις του άξονα διάνοιξης, που σε κάτοψη έχουν τη μορφή οξύληκτου V, ενώ στις αργής–διάνοιξης είναι καμπές της αξονικής κοιλάδας. Οι τρίτης και τέταρτης τάξης ασυνέχειες αντιπροσωπεύονται από μικρότερες επικαλύψεις, μεταθέσεις των ηφαιστείων ή ελαφρές αποκλήσεις της διεύθυνσης.* ***A.*** *Ταχείας–διάνοιξης κέντρα.* ***B.*** *Αργής–διάνοιξης κέντρα.*

## *Πρότυπα Μαγνητικών Ανωμαλιών*

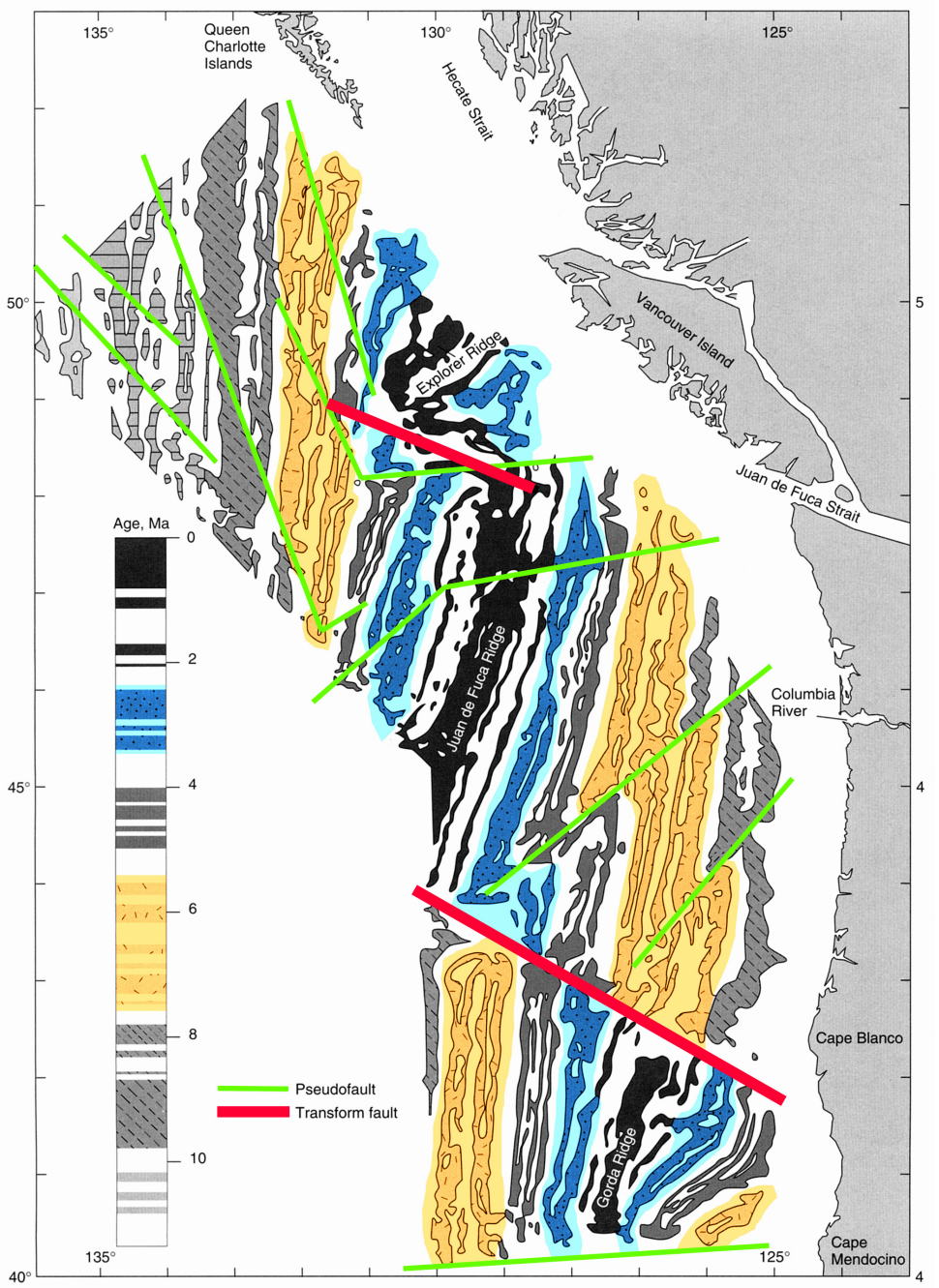
Ο ωκεάνιος πυθμένας, εκατέρωθεν των κέντρων διάνοιξης, χαρακτηρίζεται από ένα πρότυπο γραμμικών μαγνητικών ανωμαλιών, που αναπτύσσεται με τη μορφή συμμετρικών ζωνών ως προς τον άξονα της ράχης (Εικ. 4.26D). Το πλάτος αυτών των ζωνών είναι ανάλογο και αντιστοιχεί στο μέγεθος του ρυθμού διάνοιξης (Εικ. 4.26). Η μελέτη των προτύπων αυτών φανερώνει ότι τα όρια της μετάβασης ανάμεσα στις θετικές και αρνητικές ανωμαλίες είναι πιο έντονα και ευδιάκριτα στις ταχείας–διάνοιξης ράχεις, όπως το Έξαρμα του Ανατολικού Ειρηνικού (East Pacific Rise, Εικ. 4.26C), απ' ότι στις αργής–διάνοιξης ράχεις, όπως η Μεσο-Ατλαντική Ράχη (Mid-Atlantic Ridge, Εικ. 4.26A).

Η κύρια ζώνη του μαγνητισμού, που δημιουργεί αυτό το ανώμαλο πρότυπο, φαίνεται ότι εντοπίζεται περίπου στα ανώτερα 2 km του ωκεάνιου φλοιού. Ορισμένες γεωτρήσεις στον πυθμένα του Βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού, αποκάλυψαν την ύπαρξη εναλλασσομένων στρωμάτων βασαλτών μαγνητισμένων με κανονική ή ανάστροφη πολικότητα. Με βάση τα δεδομένα αυτά μπορεί να υποστηριχθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις ο διαφορετικός μαγνητισμός για τις περιόδους με διαφορετική πολικότητα δεν διαχωρίζεται σαφώς στην οριζόντια έννοια, κάτι που εν μέρει αιτιολογείται από τη μικρή ευκρίνεια του προτύπου ανωμαλιών στις αργής–διάνοιξης ράχεις. Επί τόπου παρατηρήσεις και παλαιομαγνητικές μετρήσεις στις ράχεις αργής διάνοιξης, καταδεικνύει, επίσης, την ύπαρξη περιστραμμένων ρηξιτεμαχών, προφανώς ως το αποτέλεσμα της κίνησης σε λιστρικά κανονικά ρήγματα. Τέτοιες περιστροφές μπορούν να επηρεάσουν τον προσανατολισμό των παλαιομαγνητικών αξόνων




***Εικόνα 4.26*** *Η ανάπτυξη συμμετρικών ζωνών μαγνητικών ανωμαλιών (**D**), παρατηρείται σε όλους τους ωκεανούς, το πρότυπο που προκύπτει όμως εξαρτάται από το ρυθμό διάνοιξης (**A**, **B** & **C**). Στις μαγνητικές τομές οι οριζόντιες μπάρες αναπαριστούν την ιστορία της αναστροφής των μαγνητικών ανωμαλιών τα τελευταία 11 Ma. Είναι χαρακτηριστική η συμμετρική επανάληψη εκατέρωθεν του άξονα της ράχης, σε μια κλίμακα που αντανακλά τον μέσο όρο διάνοιξης σε τοπικό επίπεδο.*

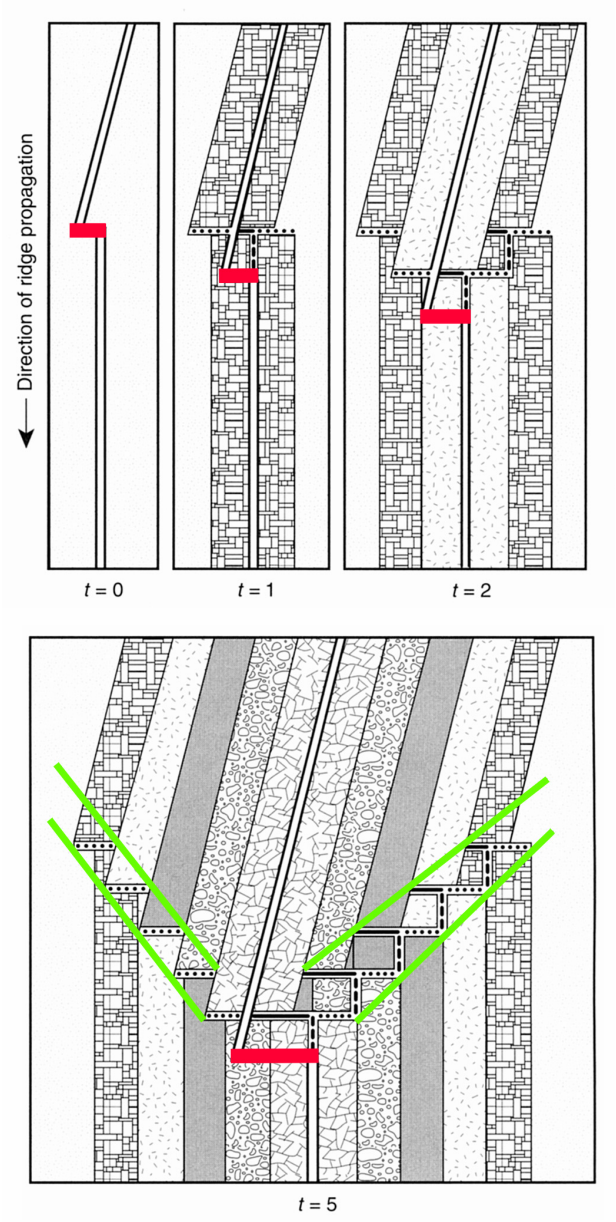



***Εικόνα 4.27*** *Χάρτης της κατανομής των μαγνητικών ανωμαλιών εκατέρωθεν της μεσο-ωκεάνιας ράχης Juan de Fuca, όπου σημειώνονται τα ψευδορήγματα (pseudofaults) και οι εξαπλωνόμενες ράχεις (propagating rifts).*

στα πετρώματα και ως εκ τούτου να οδηγήσουν στην απώλεια της ευκρίνειας του προτύπου μαγνητικών ανωμαλιών.

Ένα διακριτό χαρακτηριστικό, που παρατηρείται στα πρότυπα μαγνητικών ανωμαλιών όλων, ανεξαιρέτως, των ράχεων, είναι η μείωση του πλάτους των ανωμαλιών στις πλευρικές περιοχές, σε σχέση με την αξονική περιοχή (Εικ. 4.26A,B,C). Πολλές ερμηνείες έχουν προταθεί γι' αυτό, όπως: μεταμόρφωση ή οξείδωση φλοιού που προγενέστερα είχε μαγνητισθεί, διείσδυση μαγμάτων στο βάθος μακριά από τον άξονα διάνοιξης, ενδιαστρώσεις υλικών μαγνητισμένων με κανονική ή ανάστροφη πολικότητα μακριά από τον άξονα διάνοιξης (όπως αναφέρθηκε προηγουμένως για την Μεσο–Ατλαντική Ράχη) και περιστροφή του μαγνητικού ανύσματος από δράση λιστρικών ρηγμάτων.

Σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν παρατηρηθεί μεταθέσεις των μαγνητικών ανωμαλιών, που δεν είναι παράλληλες σε ρήγματα μετασχηματισμού και δεν έχουν ξεκάθαρη σχέση με την κίνηση των πλακών (Εικ. 4.27). Κάθε μία από αυτές τις φαινομενικές μεταθέσεις δημιουργείται από ένα φαινόμενο που καλείται propagating rift (εξαπλωνόμενη ράχη;) και λαμβάνει χώρα όταν ένα τμήμα της ράχης αναπτύσσεται περισσότερο σε σχέση με ένα γειτονικό, που είναι συνδεδεμένο με ένα ρήγμα μετασχηματισμού, και αυξάνεται λιγότερο.




***Εικόνα 4.28*** *Η επίδραση του φαινομένου της εξαπλωνόμενης ράχης (propagating rift), στο πρότυπο των μαγνητικών ανωμαλιών, για διάφορες χρονικές στιγμές. Μετά από κάθε επαύξηση της διάνοιξης, το βόρειο τμήμα της ράχης εξαπλώνεται προς νότο, δημιουργώντας έτσι αυτές τις διαγώνιες ασυνέχειες, που καλούνται ψευδορήγματα (pseudofaults).*

Στην Εικ. 4.28 παρουσιάζεται σχηματικά η εξέλιξη του propagating rift σε 4 χρονικά στιγμιότυπα ($t$ = 0, 1, 2, 5), μέσα σε ένα συνθετικό σχήμα που περιλαμβάνει τις ράχεις και το ρήγμα μετασχηματισμού. Ανάμεσα στο $t$ = 0 και $t$ = 1, η διάνοιξη κατά μήκος της ράχης παράγει τη λιθόσφαιρα που στην εικόνα συμβολίζεται με ένα μωσαϊκό. Στον χρόνο $t$ = 1, η νότια απόληξη, του βόρειου τμήματος της ράχης, προεκτείνεται στη νέα της θέση, όπου συνεχίζει τη διάνοιξη μέχρι το $t$ = 2, δημιουργώντας το φλοιό που συμβολίζεται με διαφορετικό μωσαϊκό. Οι εναλλαγές αυτές διάνοιξης και επιμήκυνσης του βορείου τμήματος της ράχης, συνεχίζονται και έτσι δημιουργείται το πρότυπο του φλοιού που φαίνεται στη χρονική στιγμή $t$ = 5.

Έτσι λοιπόν, η μετάθεση των μαγνητικών ανωμαλιών δίνει ασυνέχειες με τη μορφή V, που καλούνται ψευδορήγματα (pseudofaults). Η πραγματική αιτία τους πρέπει να σχετίζεται με ένα πολύπλοκο σχήμα όπου "ανακατεύονται" φαινόμενα διάνοιξης και διεισδύσεων, διαδικασίες που δεν έχουν γίνει ακόμα πλήρως κατανοητές. Πρέπει πάντως να σχετίζονται και με τις μορφολογικές ασυνέχειες που μόλις πριν σχολιάσθηκαν.

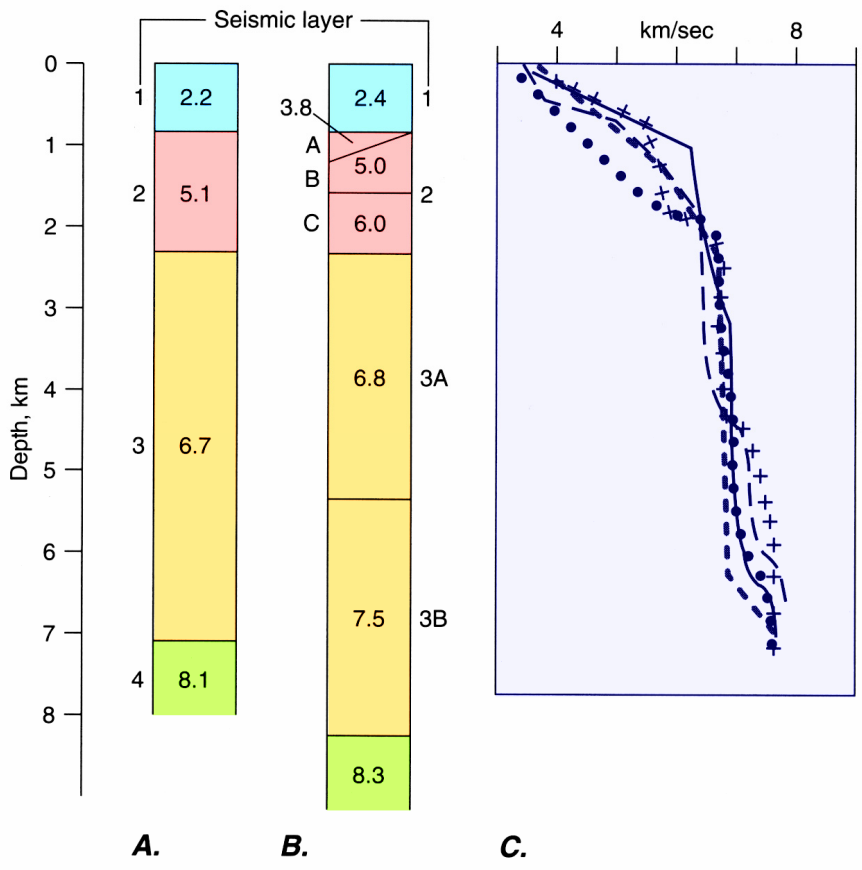
## *Σεισμολογικά και Γεωφυσικά Δεδομένα*

Τα σεισμολογικά δεδομένα από τις μεσο-ωκεάνιες ράχεις περιλαμβάνουν την κατανομή των σεισμών, τους μηχανισμούς γένεσης αλλά και τα αποτελέσματα από τη μελέτη των φαινομένων της σεισμικής ανάκλασης και διάθλασης.

Τα αποτελέσματα από τη σεισμική διάθλαση καταλήγουν σε ένα μοντέλο τριών στρωμάτων για τον ωκεάνιο φλοιό (Εικ. 4.29A). Η εφαρμογή πιο σύγχρονων τεχνικών έχει οδηγήσει σε επιμέρους διαχωρισμούς για κάθε στρώμα (Εικ. 4.29B), άρα και σε μια πιο πολύπλοκη δομή του ωκεάνιου φλοιού. Επισημαίνεται πάντως ότι τα σεισμολογικά μοντέλα παρουσιάζουν σε γενικές γραμμές μια συνεχή αλλαγή των σεισμικών ταχυτήτων, χωρίς απότομες μεταβολές (Εικ. 4.29C), με αποτέλεσμα ο διαχωρισμός των διαφορετικών στρωμάτων του φλοιού να βασίζεται στη μεταβολή της κλίσης της καμπύλης των ταχυτήτων.

Το σημαντικό είναι ότι τα σεισμικά μοντέλα έχουν πολύ μεγάλη σημασία για την ερμηνεία της δομής και της πετρολογίας του ωκεάνιου πυθμένα. Π.χ. το στρώμα 2A της Εικ. 4.29, που χαρακτηρίζεται από χαμηλές ταχύτητες που γρήγορα αυξάνουν με το βάθος, πιθανά αντιπροσωπεύει πολυδιαρρηγμένες βασαλτικές εκχύσεις, με τις διαρρήξεις να κλείνουν καθώς η πίεση αυξάνεται με το βάθος. Το στρώμα 2B με τη σταθερή σεισμική ταχύτητα, πιθανά αντιπροσωπεύει τον κύριο όγκο των εκχύσεων. Το στρώμα 2C, που χαρακτηρίζεται από έντονη αύξηση της ταχύτητας με το βάθος, μπορεί να αντιπροσωπεύει μια μεταβολή στη λιθολογία ή τη μεταμόρφωση ή ένα πέρασμα από υπερκείμενα διερρηγμένα πετρώματα που επικάθονται σε συμπαγή.

Η παρουσία και οι διαστάσεις μαγματικών θαλάμων στο φλοιό, στα κέντρα μεσο-ωκεάνιας διάνοιξης, αποκαλύπτεται πιθανά από την ύπαρξη μια ζώνης χαμηλών ταχυτήτων, ή μιας περιοχής που παρατηρείται εξασθένηση των S κυμάτων.




***Εικόνα 4.29*** *Σεισμικά μοντέλα για τον ωκεάνιο φλοιό.* ***A.*** *Απλό μοντέλο τριών στρωμάτων του φλοιού πάνω από τη Moho.* ***B.*** *Πιο λεπτομερές μοντέλο όπου τα στρώματα 2 και 3 του φλοιού, υποδιαιρούνται σε επιμέρους στρώματα.* ***C.*** *Μοντέλο όπου παρουσιάζεται η συνεχής μεταβολή της ταχύτητας με το βάθος. Οι ασυνέχειες και η διάκριση των επιμέρους στρωμάτων βασίζεται στις αλλαγές της κλίσης των καμπυλών.*

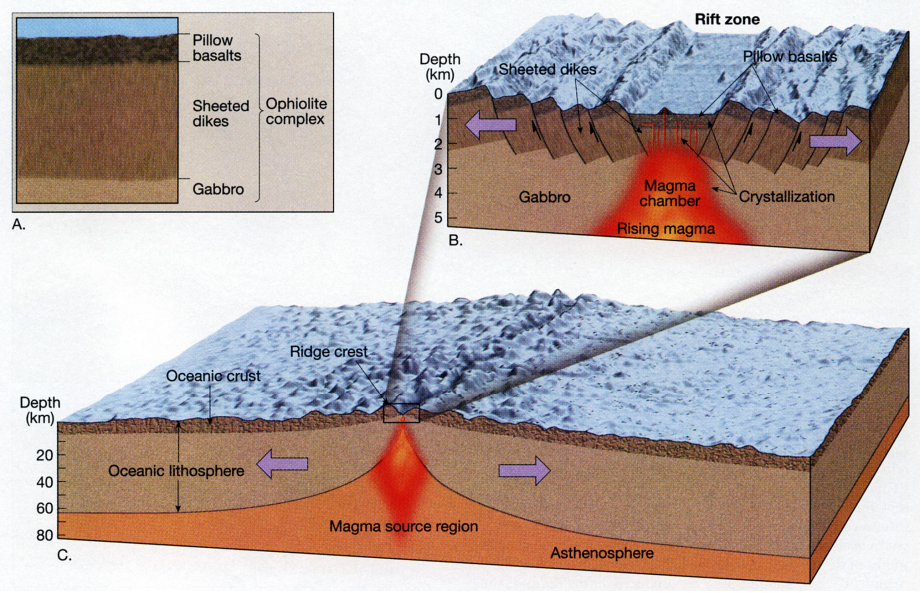
Σεισμικές έρευνες υποστηρίζουν ότι κάτω από τις αξονικές περιοχές σύγχρονων ράχεων, ενδιάμεσης ή ταχείας διάνοιξης, υπάρχουν μαγματικοί θάλαμοι με πλάτος γύρω στα 4 km και πάχος μερικών εκατοντάδων μέτρων (Εικ. 4.30). Αντίθετα, κάτω από τις ράχες αργής διάνοιξης, παρ' ότι θεωρητικά αναμένονται έστω και σποραδικά μαγματικοί θάλαμοι, εν τούτοις τα σεισμικά δεδομένα επιβεβαιώνουν την ανυπαρξία τους ακόμα και αρκετά βαθειά κάτω από τις ράχεις.

Οι σεισμικές ενδείξεις από τον μανδύα που βρίσκεται ακριβώς κάτω από τις ωκεάνιες ράχεις, υποστηρίζουν μια λιθόσφαιρα με πολύ μικρό πάχος, ή ακόμα και την παντελή έλλειψή της. Το πάχος της αυξάνει εκατέρωθεν της αξονικής περιοχής της ράχης, φθάνοντας τα 100 km εκεί όπου η ηλικία της λιθόσφαιρας είναι περίπου 80 Ma.

Βαρυτικές μετρήσεις στις μεσο-ωκεάνιες ράχεις φανερώνουν την παρουσία μιας έκδηλης συμμετρικής, αρνητικής, ανωμαλίας Bouger και μιας μικρής, θετικής ανωμαλίας ελεύθερου αέρα, που παρατηρούνται επίσης και από τις μετρήσεις των δορυφόρων. Η πρώτη από αυτές δείχνει την έλλειψη μάζας στο βάθος, σχετικά με το γειτονικό φλοιό και το μανδύα, και η δεύτερη υποδεικνύει ότι η ράχη βρίσκεται κοντά, αλλά όχι εντελώς, σε ισοστατική ισορροπία και ως εκ τούτου υπάρχει μια μικρή υπέρβαση του τοπογραφικού υψομέτρου της ράχης.

Οι μετρήσεις της θερμικής ροής δείχνουν μια αξιοσημείωτη αύξηση της θερμικής ροής κοντά στα κορυφαία τμήματα των ράχεων, με τιμές που φθάνουν τα 10 hfu. Σε αντίθεση, οι μέσες ωκεανικές τιμές κυμαίνονται γύρω στο 1.0 με 1.5 hfu. Τα δεδομένα αυτά καταδεικνύουν την ύπαρξη μιας μεγάλης πηγής θερμότητας στην περιοχή κάτω από τον άξονα της ράχης.

Απευθείας παρατηρήσεις στον ωκεάνιο πυθμένα με επανδρωμένα υποβρύχια, αποκαλύπτουν την παρουσία ενός μεγάλου αριθμού θερμών πηγών, κοντά στα ενεργά κέντρα διάνοιξης. Εκτενής υδροθερμική εξαλλοίωση είναι επίσης παρούσα σε απολιθωμένες ράχεις. Οι παρατηρήσεις αυτές δείχνουν ότι μια σημαντική ποσότητα της θερμότητας, μεταφέρεται έξω από τον φλοιό με τη διάχυτη μεταφορά του νερού των πόρων. Αυτή η απώλεια θερμότητας δεν περιλαμβάνεται στις μετρήσεις της ροής θερμότητας, που προσδιορίζουν μόνο την αγώγιμη απώλεια. Άρα λοιπόν, οι τιμές της θερμικής ροής στον πυθμένα των ωκεανών αντιπροσωπεύουν τις ελάχιστες τιμές. Η ποσότητα της θερμότητας που χάνεται από υδροθερμική διάχυση, είναι πολύ δύσκολο να υπολογισθεί, επειδή η ποσότητα και η έκταση της υδροθερμικής κυκλοφορίας είναι δύσκολο νε ποσοτικοποιηθεί.




***Εικόνα 4.30*** *Δημιουργία ωκεάνιου φλοιού στις μεσο-ωκεάνιες ράχεις (**C**), που η δομή του (**B**), θεωρείται ομόλογη με αυτή των οφιολιθικών συμπλεγμάτων στην ξηρά (**A**). Η ύπαρξη μαγματικού θαλάμου επιβεβαιώνεται μόνο για τις ενδιάμεσης– ή ταχείας–διάνοιξης ράχεις, σε αντίθεση με της αργής–διάνοιξης, που απουσιάζει.*

## *Σύσταση του Ωκεάνιου Φλοιού και το Πρότυπο των Οφιολίθων*

Μετά το 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο αναπτύχθηκαν πολύ οι υποθαλάσσιες έρευνες, κυρίως μέσα από τα προγράμματα Deep Sea Drilling Project (DSDP) και Ocean Drilling Program (ODP), με αποτέλεσμα χιλιάδες δειγμάτων από τον ωκεάνιο φλοιό να μπορέσουν να μελετηθούν. Οι συνηθέστεροι λιθολογικοί τύποι αφορούσαν αβυσσικά ιζήματα στον πυθμένα των ωκεανών, που υπερκάλυπταν ακολουθίες ηφαιστειακών πετρωμάτων. Οι θολεϊτικοί βασάλτες, πτωχοί σε K, ήταν ο τύπος που κυριαρχούσε στους ωκεανούς. Από τα λιγότερο συχνά πετρώματα, σημαντικότερα ήταν γάβροι, περιδοτίτες και διαβάσες και τα μεταμορφωμένα ομόλογά τους.

Παρά την πληθώρα των δειγμάτων, είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η δειγματοληψία από τον ωκεάνιο φλοιό και μανδύα είναι ακόμα πτωχή. Οι γεωτρήσεις συνήθως σταματούν στα σεισμικά στρώματα 1 και 2 του φλοιού (Εικ. 4.29). Μόνο ελάχιστες γεωτρήσεις έχουν διατρήσει πετρώματα, που πιστεύεται ότι αντιπροσωπεύουν το στρώμα 3 ή τον ανώτερο μανδύα. Τα δεδομένα, παρ' ότο πτωχά, επιβεβαιώνουν την παρουσία φλεβών και άλλων διεισδύσεων στο βάθος. Η δειγματοληψία (με βυθοκόρο), από τα κατώτερα στρώματα του φλοιού, είναι δυνατή κατά μήκος των μετώπων των ρηγμάτων, κυρίως κατά μήκος των ρηγμάτων μετασχηματισμού, και των ρηγμάτων της αξονικής λεκάνης, που αναπτύσσονται παράλληλα με τη ράχη. Τα δείγματα αυτά, όμως, σε καμία περίπτωση δεν αντιπροσωπεύουν το σύνολο του ωκεάνιου φλοιού. Σε γενικές γραμμές, η γνώση μας για τα πετρώματα που δομούν τα κατώτερα στρώματα του φλοιού στις ράχεις που στερούνται αξονικής τάφρου, είναι αποσπασματική.

Ευτυχώς, υπάρχει στην ξηρά ένας αριθμός από χαρακτηριστικές ακολουθίες πετρωμάτων, που μπορεί να αντιπροσωπεύουν τμήματα του ωκεάνιου φλοιού και του μανδύα, που έχουν δηλαδή σχηματισθεί σε ωκεανικά κέντρα διάνοιξης. Οι ακολουθίες αυτές αποκαλούνται οφιόλιθοι (ophiolites), και περιλαμβάνουν λιθολογικούς τύπους και δομές όμοιες με αυτές που υπάρχουν στον ωκεάνιο φλοιό (Εικ. 4.30). Μια ιδεατή οφιολιθική ακολουθία περιλαμβάνει συνοπτικά τις ακόλουθες ενότητες, από τη βάση προς την κορυφή (Εικ. 4.31).

A. Έναν τεκτονισμένο περιδοτίτη που τυπικά συνίσταται από χαρτζβουργίτη, αλλά και λερζόλιθο, δουνίτη και χρωμιτίτη. Ο τεκτονικός ιστός χαρακτηρίζεται από ανακρυστάλλωση κατά τη διάρκεια όλκιμης παραμόρφωσης, με έντονη φύλλωση και γράμμωση, από τον προτιμητέο προσανατολισμό των επιμήκων, κυρίως, κρυστάλλων. Τα επιμέρους στρώματα από πυρόξενο, χρωμίτη και δουνίτη συνήθως παρουσιάζονται ισοκλινώς πτυχωμένα κα επαναπτυχωμένα. Τα πετρώματα αυτά καλούνται και Αλπικοί περιδοτίτες, λόγω των χαρακτηριστικών εμφανίσεών τους στην οροσειρά των Άλπεων. Αντιπροσωπεύουν το τμήμα του ανώτερου μανδύα που ανήκει στην λιθόσφαιρα.

B. Ένα βασικής-υπερβασικής σύστασης πλουτώνιο σύμπλεγμα, συνήθως πλούσιο σε ολιβίνη και πυρόξενο στη βάση, που προς τα πάνω περνάει σε μέλη πλούσια σε πλαγιόκλαστο ή ακόμα και σε χαλαζία ή κεροστίλβη στην οροφή. Παρουσιάζει τυπική στρωμάτωση (compositional layering) και ο ιστός του είναι χαρακτηριστικός της κρυστάλλωσης από μάγ-

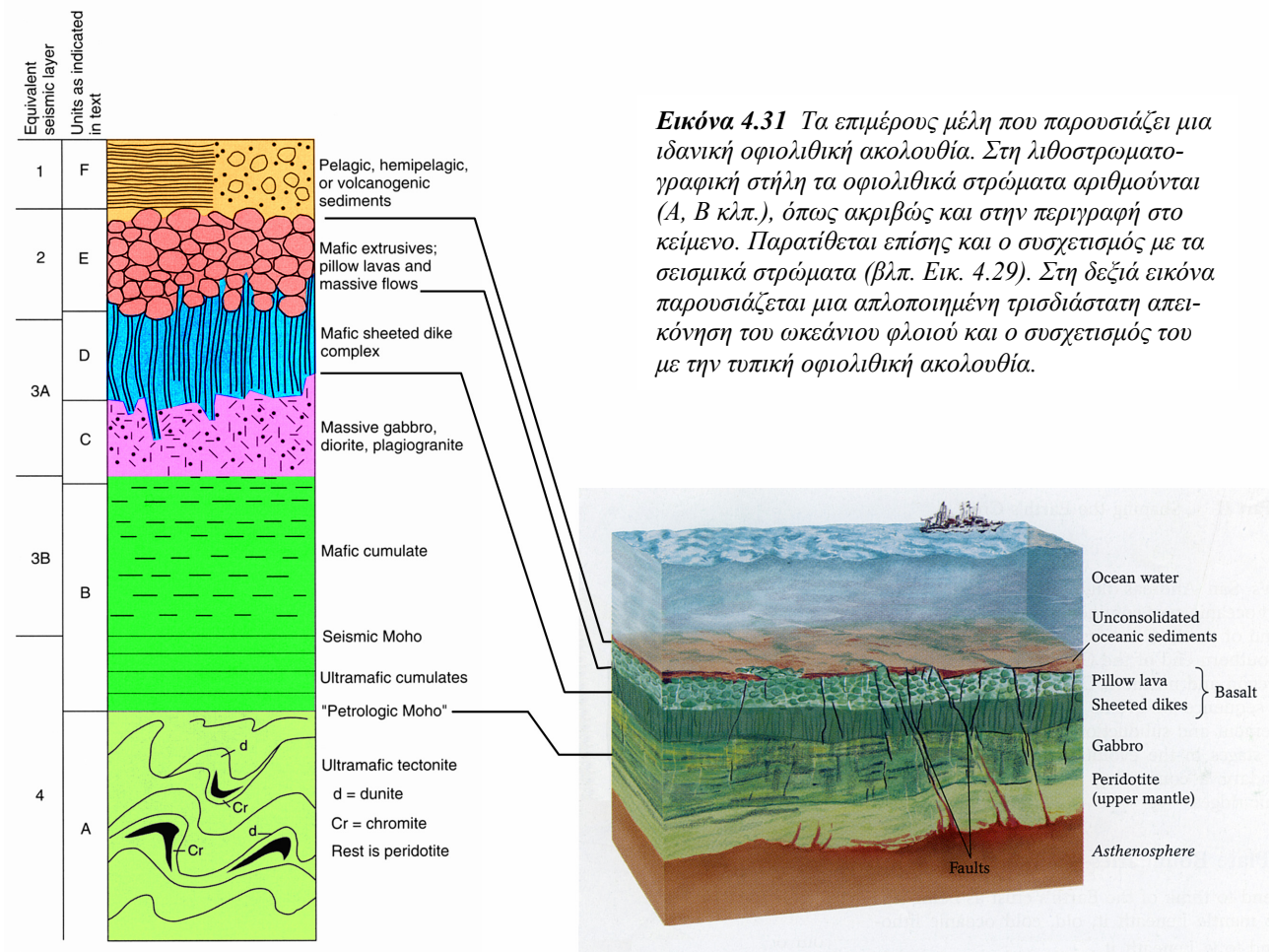
μα, παρά από ανακρυστάλλωση από μεταμόρφωση ή όλκιμη ροή. Από άποψη σύστασης οι περιδοτίτες αυτοί είναι πιο πλούσιοι σε σίδηρο, απ' ότι οι υποκείμενοί τους. Η στρωμάτωση που παρουσιάζουν και η σύστασή τους συνηγορούν ότι τα πετρώματα αυτά σχηματίσθηκαν από τη συγκέντρωση των κρυστάλλων στη βάση του μαγματικού θαλάμου από βαρυτική καθίζηση. Ως εκ τούτου λοιπόν, η επαφή αυτή αντιπροσωπεύει το αληθινό όριο φλοιού/μανδύα, αφού στην ουσία είναι η επαφή ανάμεσα στον στερεό και όλκιμα παραμορφωμένο μανδύα και τον ωκεάνιο φλοιό που σχηματίσθηκε από μαγματικά πετρώματα.

C. Ένα "στρώμα" από αδρόκοκκο έως λεπτόκοκκο γάββρο, διορίτη και λευκοκρατικό χαλαζιακό διορίτη (πλαγιογρανίτη), που αποτελεί την οροφή του προηγούμενου συμπλέγματος. Τα πετρώματα αυτά είναι πιθανώς το αποτέλεσμα επιτόπου κρυστάλλωσης και όχι βαρυτικής καθίζισης που χαρακτηρίζει το πλουτώνιο σύμπλεγμα. Τα πετρώματα αυτά είναι συνήθη στην οροφή πλουτώνιων σωμάτων.

D. Ένα ακόμα πιο λεπτόκοκκο, βασικής σύστασης σύμπλεγμα φλεβών, που επικαλύπτει το πλουτώνιο σύμπλεγμα σε πολλές περιπτώσεις Αποτελείται από φλέβες που έχουν διεισδύσει σε πλουτώνια πετρώματα στη βάση. Η ενδιάμεση ζώνη, που αποτελείται αποκλειστικά από φλέβες (με τις νεότερες να έχουν διεισδύσει μέσα στις παλαιότερες), αποκαλείται σύμπλεγμα φυλλωδών φλεβών (sheeted dike complex). Στην οροφή οι φλέβες διεισδύουν σε έκχυτα πετρώματα, συνήθως pillow βασάλτες.

E. Μια ακολουθία από έκχυτα, βασικής σύστασης, ηφαιστειακά πετρώματα, που επικάθονται με βαθμιαία μετάβαση στο σύμπλεγμα φλεβών. Τα πετρώματα αυτά αποτελούνται από συμπαγείς ή μαξιλαροειδείς (pillowed), λάβες, που συνοδεύονται από λίγες φλέβες ή κοίτες και διάσπαρτα λατυποπαγή. Οι ακολουθίες αυτές θεωρούνται ως το χαρακτηριστικό αποτέλεσμα των υποθαλάσσιων εκχύσεων λάβας.

F. Πελαγικά ιζήματα, με, κατά θέσεις, ενδιαστρώσεις από χημικά ιζήματα πλούσια σε μεταλλικά συστατικά. Περιλαμβάνουν επίσης και πολύ λεπτοστρωματώδεις πυριτιολίθους.




***Εικόνα 4.31*** *Τα επιμέρους μέλη που παρουσιάζει μια ιδανική οφιολιθική ακολουθία. Στη λιθοστρωματογραφική στήλη τα οφιολιθικά στρώματα αριθμούνται (A, B κλπ.), όπως ακριβώς και στην περιγραφή στο κείμενο. Παρατίθεται επίσης και ο συσχετισμός με τα σεισμικά στρώματα (βλπ. Εικ. 4.29). Στη δεξιά εικόνα παρουσιάζεται μια απλοποιημένη τρισδιάστατη απεικόνηση του ωκεάνιου φλοιού και ο συσχετισμός του με την τυπική οφιολιθική ακολουθία.*

Σε ορισμένες περιπτώσεις απαντώνται και ασβεστόλιθοι, να επικάθονται απευθείας στο ηφαιστειακό υπόβαθρο και να επικαλύπτονται από πυριτιολίθους.

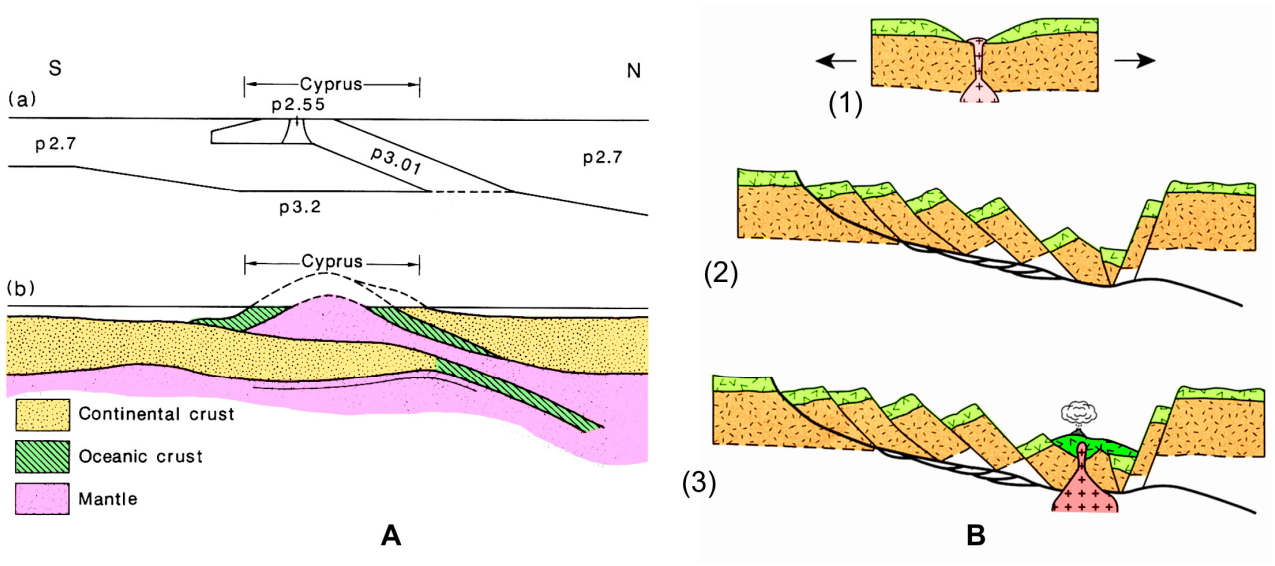
Αυτή η ιδανική οφιολιθική ακολουθία παρουσιάζει πάρα πολλές ομοιότητες με τη δομή του ωκεάνιου φλοιού, που έχει προσδιορισθεί από τα σεισμολογικά δεδομένα αλλά και από τα πετρολογικά δείγματα που έχουν παρθεί (Εικ. 4.31). Τα πάχη των επιμέρους μελών των οφιολιθικών συμπλεγμάτων που έχουν πιστοποιηθεί από έρευνες στην ξηρά, συσχετίζονται με σχετική ακρίβεια με τα στρώματα που έχουν προκύψει από τα σεισμικά προφίλ. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.31, τα ιζήματα (F) ταυτίζονται με το σεισμικό στρώμα 1, οι λάβες (E) με το στρώμα 2, το σύστημα φλεβών (D) και η οροφή του πλουτώνιου συμπλέγματος (C) με τα στρώματα 3A και 3B αντίστοιχα και τα πλούσια σε ολιβίνη πλουτώνια πετρώματα (B) και ο μανδυακός τεκτονίτης (A) με το στρώμα 4. Το σημαντικό στοιχείο του συσχετισμού αυτού είναι η διαπίστωση ότι η επαφή ανάμεσα στον μανδυακό τεκτονίτη και τα μαγματικά πετρώματα, δηλαδή η επαφή ανάμεσα στα οφιολιθικά στρώματα A και B, που καλείται πετρολογική Moho, δεν αντιστοιχεί στη σεισμική Moho, που τοποθετείται ανάμεσα στα σεισμικά στρώματα 3 και 4, επαφή που στην οφιολιθική ακολουθία τοποθετείται μέσα στο στρώμα B και πιο συγκεκριμένα ανάμεσα στα υποκείμενα πλούσια σε ολιβίνη μέλη και στα υπερκείμενα φτωχά σε ολιβίνη (Εικ. 4.31). Το πόσο γρήγορα και απότομα γίνεται αυτή η μετάβαση, δίνει και τα χαρακτηριστικά της σεισμολογικής Moho. Σε πολλά οφιολιθικά συμπλέγματα, η μετάβαση αυτή παρουσιάζει ένα πάχος που κυμαίνεται από 50 m μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα.

Αν οι οφιόλιθοι λοιπόν είναι αδιαμφισβήτητα μέλη του ωκεάνιου φλοιού, που έχουν επωθηθεί σήμερα στις ηπείρους και έχουν διατηρήσει, περισσότερο ή λιγότερο, την αρχική δομή τους, η μελέτη τους θα μας δώσει αρκετά στοιχεία για τις διαδικασίες σχηματισμού των πλακών. Η εσωτερική δομή τους μας αποκαλύπτει πως οι μαγματικές και τεκτονικές διαδικασίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Πολλά οφιολιθικά συμπλέγματα παρουσιάζουν περιστραμμένα ρηξιτεμάχη στα ανώτερα ή ενδιάμεσα τμήματά τους. Τα ρήγματα που οριοθετούν τα ρηξιτεμάχη αυτά δεν φαίνεται να συνεχίζουν και να τέμνουν τα υπερκείμενα ιζήματα. Ως εκ τούτου λοιπόν μπορεί να αντιπροσωπεύουν ρήγματα που δημιουργήθηκαν κατά τη δημιουργία του ωκεάνιου φλοιού. Τα ρήγματα αυτά παρουσιάζουν γεωμετρία λιστρικών ρηγμάτων και σε ορισμένες περιπτώσεις μεταβαίνουν στο βάθος σε σχετικά επίπεδες ζώνες διάτμησης στο ύψος της ζώνης μετάβασης από το πλουτώνιο σύμπλεγμα στο σύμπλεγμα φλεβών (στρώματα C και D). Οι όλκιμου χαρακτήρα αυτές ζώνες συνοδεύονται από μυλονιτικά πετρώματα. Οι δομές αυτές θυμίζουν τα λιστρικά ρήγματα και τα ρήγματα αποκόλλησης, που χαρακτηρίζουν ορισμένες περιοχές με ηπειρωτικό εφελκυσμό, όπως η επαρχία Basin and Range, που περιγράφηκε στα προηγούμενα. Στην Εικ. 4.32 παρουσιάζεται σχηματικά η δομή του οφιολιθικού συμπλέγματος Τρόοδος στην Κύπρο, που αποτελεί ίσως το πιο τυπικό παράδειγμα ενός πλήρους οφιολιθικού συμπλέγματος στην ξηρά. Η μαγματική συσσώρευση που ακολουθήθηκε από εκλέπτυνση του φλοιού με λιστρικά ρήγματα που καταλήγουν σε μια ζώνη διάτμησης που τέμνει όλο το φλοιό και η εκ νέου μαγματική συσσώρευση, όλα σε καθεστώς εφελκυσμού, μπορούν να ερμηνεύσουν τη σημερινή δομή του Τρόοδος.

Από τη λεπτομερή χαρτογράφηση ενός αριθμού οφιολιθικών συμπλεγμάτων, έχει εξακριβωθεί ότι σε ορισμένα από αυτά υφίστανται ξεχωριστοί μαγματικοί θάλαμοι, με πλάτος 1 έως 2 km. Σε ορισμένα επίσης συμπλέγματα παρατηρείται ένα σύνθετο σύστημα διεισδύσεων, που προϋποθέτει πολλαπλές εκχύσεις ξεχωριστών μαγματικών σωμάτων. Αντίθετα άλλα δεν παρουσιάζουν αυτή την πολυπλοκότητα και φαίνεται να έχουν σχηματισθεί από ένα σταθερού καθεστώτος και συνεχή μαγματικό θάλαμο, όπως για την περίπτωση των ταχείας–διάνοιξης ράχεων έχει διαπιστωθεί.

Οι οφιόλιθοι δικαίως θεωρούνται αμφιλεγόμενα συστήματα πετρωμάτων, εν μέρει διότι εμφανίζουν διαφορές ως προς τη δομή και τη σύστασή τους αλλά και διότι αυτές αναμένεται να είναι αντιπροσωπευτικές των σύγχρονων συστημάτων διάνοιξης. Ποτέ δεν παρέχουν ένα τεκτονικό μοντέλο με το οποίο να μπορούν να ερμηνευθούν όλα τα δεδομένα από τα ωκεάνια συστήματα διάνοιξης. Έχοντάς τους, πάντως, ως πρότυπο για τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στα αποκλίνοντα περιθώρια των πλακών, μπορεί να υποστηριχθεί ότι στις περιοχές αυτές λαμβάνει χώρα παραμόρφωση με λιστρικά ρήγματα, ταυτόχρονα με μαγματικά γεγονότα, διαδικασία που έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός φλοιού με πολύπλοκη δομή.

Με δεδομένο αυτό, αποτελεί έκπληξη, ίσως, το γεγονός ότι η δομή του ωκεάνιου φλοιού, που προκύπτει από τα σεισμικά δεδομένα, είναι πολύ ομοιόμορφη σε όλη τη Γη, καθώς και το γεγονός ότι οι απανταχού γραμμικές μαγνητικές ανωμαλίες παρουσιάζουν αξιοθαύμαστη συνέπεια και σταθερότητα. Πιθανά το μέγεθος των τεκτονικά περιστραμμένων ρηξιτεμαχών είναι μικρό, σε σχέση με το πλάτος των μαγνητικών ανωμαλιών και άρα η πολυπλοκότητα που δημιουργούν είναι ένα δεύτερης τάξης γεγονός. Άλλωστε, όπως αναφέρθηκε,




***Εικόνα 4.32*** *Η σημερινή γεωτεκτονική τοποθέτηση της Κύπρου (**A**) και σχηματική τομή του συστήματος φλεβών και εκχύσεων, ενός τμήματος του οφιολιθικού συμπλέγματος Τρόοδος (**B**), που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της Νήσου. Διακρίνεται η παραμόρφωση με περιστραμμένα ρηξιτεμάχη λόγω λιστρικών ρηγμάτων, που στη βάση περνάνε σε μια περίπου οριζόντια ζώνη διάτμησης, στο όριο θραυσιγενούς-όλκιμης παραμόρφωσης των ωκεανικών πετρωμάτων. **(1)**. Εφελκυσμός και μαγματική δράση. **(2)**. Εφελκυσμός και εκλέπτυνση. **(3)**. Εφελκυσμός και νέα μαγματική δράση.*

την κύρια πηγή πληροφοριών για τη δομή του ωκεάνιου φλοιού αποτελεί η μέθοδος σεισμικής διάθλασης, που τείνει να εξομαλύνει την τοπική πολυπλοκότητα, δίνοντας το μέσο όρο των σεισμικών ταχυτήτων για μια μεγάλη περιοχή.

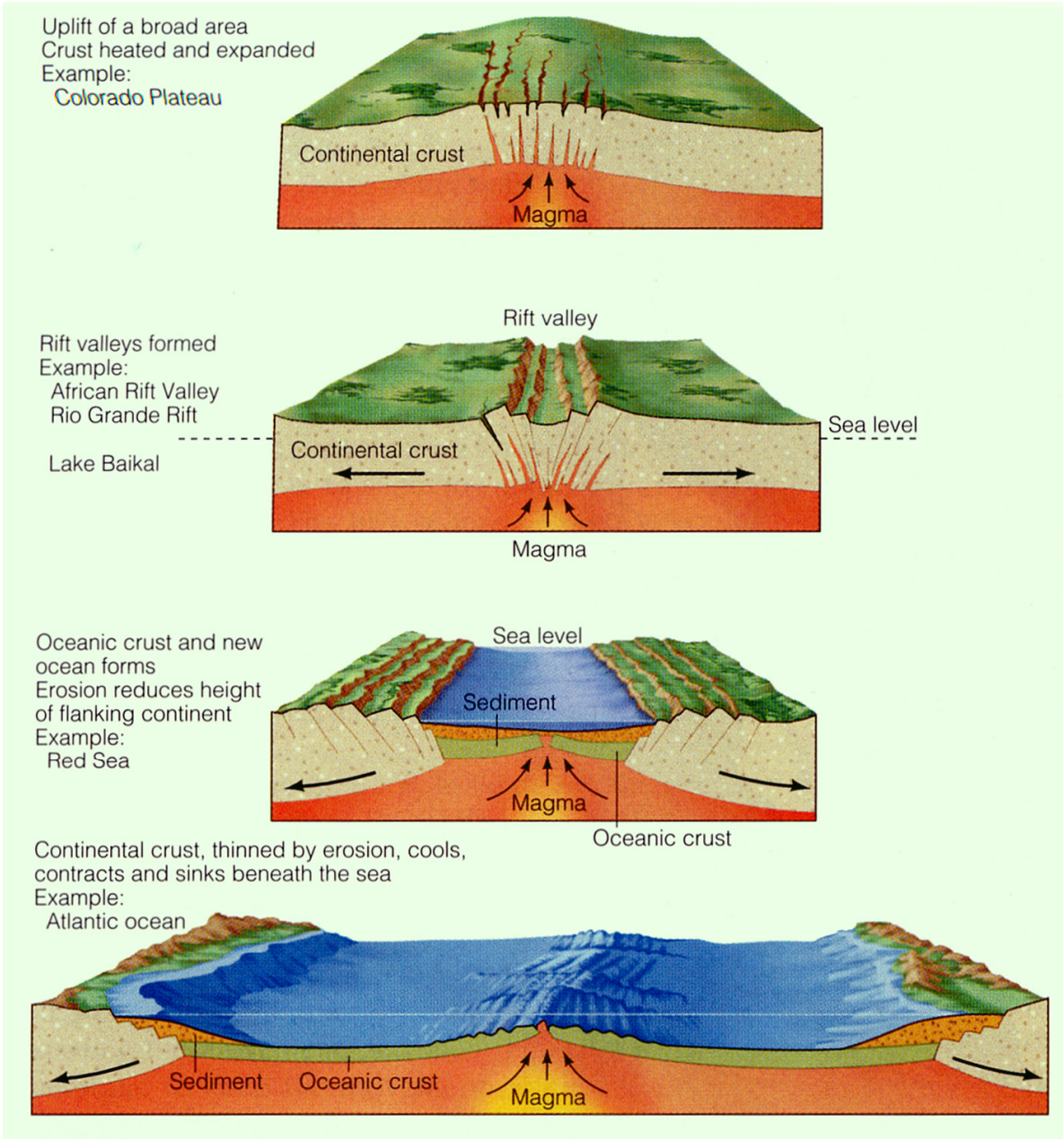
Οι οφιόλιθοι, από την άλλη μεριά, είναι "αναντικατάστατοι" θα λέγαμε, διότι, σε αντίθεση με τον ωκεάνιο φλοιό που δημιουργείται στα κέντρα διάνοιξης, κατάφεραν να προσαρτηθούν στην ξηρά και να διατηρηθούν, παρά να επιστρέψουν και να ανακυκλωθούν βαθειά στο μανδύα, παρασυρμένοι από μια ζώνη υποβύθισης. Λεπτομέρειες για τη σημαντική αυτή γεωδυναμική διαδικασία τοποθέτησης των οφιολίθων, αναφέρονται στο Κεφάλαιο 7 για τη σύγκρουση των λιθοσφαιρικών πλακών.

## 4.6 Η Εξέλιξη από την Ηπειρωτική Ταφρογένεση στον Ωκεανό

Μέχρι στιγμής περιγράφησαν αναλυτικά τα γεωδυναμικά χαρακτηριστικά περιοχών που υπόκεινται σε ηπειρωτικό εφελκυσμό και ταφρογένεση, αλλά και περιοχών που χαρακτηρίζονται από ωκεανική διάνοιξη, είτε σε αρχικό είτε σε ώριμο στάδιο. Η Ανατολική Αφρική και η περιοχή Basin and Range, η Ερυθρά Θάλασσα και ο Ατλαντικός Ωκεανός, αποτελούν χαρακτηριστικά τέτοια παραδείγματα διερρηγμένων ηπειρωτικών περιθωρίων (rifted continental margins), που βρίσκονται σε διαφορετικό στάδιο εξέλιξης. Η μελέτη όλων αυτών των περιοχών, αλλά και άλλων αντίστοιχων από διάφορες περιοχές του πλανήτη, επιτρέπει να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα για την διαδοχή των γεωδυναμικών γεγονότων που χαρακτηρίζει την δημιουργία και εξέλιξη των διερρηγμένων ηπειρωτικών περιθωρίων.

Στην Εικόνα 4.33 παρουσιάζεται σε ένα πολύ απλοποιημένο και γενικό σχήμα, μια ιδεατή εξέλιξη ανάμεσα στα διάφορα στάδια, από την αρχική διάρρηξη του ηπειρωτικού φλοιού και τη δημιουργία της ηπειρωτικής τάφρου, μέχρι την τελική ανάπτυξη ενός εκτεταμένου ωκεανού, βασισμένη ουσιαστικά στα δεδομένα από τις αντιπροσωπευτικές, για κάθε στάδιο, περιοχές που αναλύθηκαν στα προηγούμενα. Σε κάθε στάδιο μάλιστα, αναφέρεται και ποιες είναι οι αντιπροσωπευτικές περιοχές που σήμερα βρίσκονται κάτω από αυτό το γεωτεκτονικό πλαίσιο.

Πολλά ερωτήματα γεννούνται στην προσπάθεια να κατανοηθεί η εξέλιξη αυτή. Ποιος είναι ο αρχικός μηχανισμός που δημιουργεί το σπάσιμο του φλοιού και τη δημιουργία της τάφρου; Πως αυτή εξελίσσεται στη συνέχεια σε στενό ωκεανό και πως σε ώριμο; Η εξέλιξη αυτή γίνεται σε κάθε περίπτωση ή υπάρχουν και εξαιρέσεις; Ποια είναι η




***Εικόνα 4.33*** *Ένα απλοποιημένο σχήμα που παρουσιάζει την εξέλιξη των διερρηγμένων ηπειρωτικών περιθωρίων (rifted continental margins), από το στάδιο της αρχικής αναθόλωσης και έκτασης του ηπειρωτικού φλοιού και τη δημιουργία της ηπειρωτικής τάφρου (rift valley), μέχρι τη δημιουργία της μεσο-ωκεάνιας ράχης και τη διάνοιξη του ωκεανού. Για κάθε ένα στάδιο σημειώνονται οι πιο χαρακτηριστικές περιοχές του πλανήτη που σήμερα βρίσκονται κάτω από το ίδιο γεωτεκτονικό καθεστώς.*

εξέλιξη των περιθωρίων; Ποιά είναι η εξέλιξη του ωκεανού και των κέντρων διάνοιξης; Ποια είναι τα χαρακτηριστικά των ιζημάτων σε κάθε στάδιο; Τι τύπου ηφαιστειότητα απαντάται σε κάθε περίπτωση; Ποια είναι τα χαρακτηριστικά της σεισμικότητας; Και φυσικά μπορούν να διατυπωθούν πάρα πολλά ακόμα ερωτήματα, που θα πρέπει να απαντώνται και να ερμηνεύονται στο μοντέλο που κάθε φορά προτείνεται και αυτός ακριβώς είναι ένας λόγος που κατά καιρούς προτείνονται διάφορα μοντέλα, που ταιριάζουν περισσότερο ή λιγότερο σε κάθε περίπτωση και που φυσικά βελτιώνονται όσο καινούργια στοιχεία βγαίνουν στο φως.

Επισημαίνεται ότι το ενδιαφέρον για την κατανόηση όλων αυτών των διαδικασιών δεν είναι μόνο θεωρητικό, επειδή αποτελούν γεωδυναμικά τεκτονικά γεγονότα που επηρεάζουν ολόκληρη τη λιθόσφαιρα, αλλά και πρακτικό. Από τη μια μεριά σχετίζονται άμεσα με σημαντικούς φυσικούς πόρους (γεωθερμική ενέργεια, μεταλλεύματα, υδρογονάνθρακες, εβαπορίτες, υδάτινοι πόροι κλπ.), από την άλλη συχνά οριοθετούν περιοχές που χα-

ρακτηρίζονται από υψηλούς φυσικούς κινδύνους (κυρίως σεισμοί, ηφαίστεια και συνοδά καταστροφικά φαινόμενα).

## *Η Απαρχή της Ταφρογένεσης*

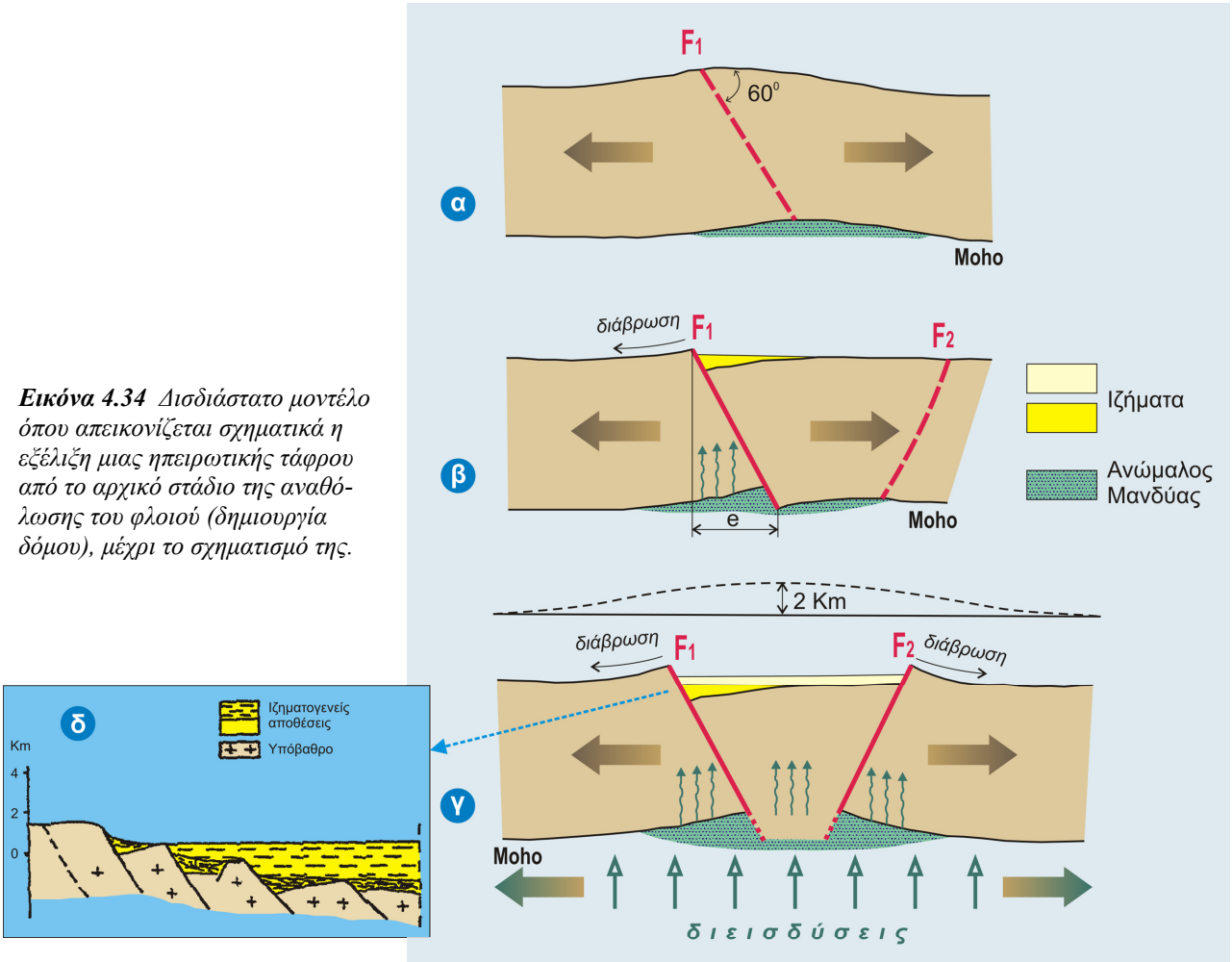
Το πρωταρχικό γεγονός που λαμβάνει χώρα στη διαδικασία της ηπειρωτικής ταφρογένεσης είναι: i) είτε ο σχηματισμός –στο εσωτερικό της ηπειρωτικής πλατφόρμας– μιας μορφολογικής αναθόλωσης (δόμου) που επηρεάζει όλη τη δομή της λιθόσφαιρας, ii) είτε μια επιμήκης καταβύθιση κατά μήκος της ζώνης που δημιουργούνται οι πρώτες διαρρήξεις του φλοιού.

Η πρώτη διαδικασία είναι χαρακτηριστική για τους δόμους: της Βόρειας Αφρικής, των τεκτονικών τάφρων της Ανατολικής Αφρικής, του σημείου τριπλής συμβολής (triple junction) του Αφάρ στη νότια απόληξη της Ερυθράς Θάλασσας και, πιθανά, του σημείου τριπλής συμβολής από το οποίο διαχωρίστηκαν η Βόρεια Αμερική, η Νότια Αμερική και η Αφρική. Όταν η διαδικασία της ταφρογένεσης αρχίζει με αυτή την αναθόλωση, η μαγματική διαδικασία τείνει να ξεκινήσει νωρίς στη χρονική ακολουθία των γεωδυναμικών φαινομένων, δημιουργώντας πετρώματα με υψηλή αλκαλική σύσταση και μικρή περιεκτικότητα σε πυρίτιο, γεγονός που υποδεικνύει προέλευση από μια βαθειά μαγματική πηγή. Όταν η διαδικασία της ταφρογένεσης ξεκινά με καταβύθιση, η ηφαιστειότητα ξεκινά αργότερα στην ιστορία της ταφρογένεσης και είναι βασαλτικής σύστασης, καταδεικνύοντας μια ρηχή μαγματική πηγή.

## *Ο Σχηματισμός της Τάφρου*

Καθώς η διαδικασία του εφελκυσμού προχωρά, το επόμενο γεγονός που ακολουθεί είναι ο σχηματισμός της τάφρου. Στην Εικόνα 4.34, παρουσιάζεται ένα δισδιάστατο μοντέλο για τα εξελικτικά στάδια μιας τάφρου.

Μετά από την πρώτη αναθόλωση (Εικ. 4.34α), εμφανίζεται ένα σύστημα διαρρήξεων $F_1$ που προκαλεί το σχηματισμό μιας ημιτάφρου (Εικ. 4.34β). Στη συνέχεια, όταν αναπτύσσεται ο εφελκυσμός, ένα δεύτερο σύστημα κανονικών ρηγμάτων $F_2$ αρχίζει να εμφανίζεται και σχηματίζεται, έτσι, η τεκτονική τάφρος που περιορίζεται από δύο υπερυ-




***Εικόνα 4.34*** *Δισδιάστατο μοντέλο όπου απεικονίζεται σχηματικά η εξέλιξη μιας ηπειρωτικής τάφρου από το αρχικό στάδιο της αναθόλωσης του φλοιού (δημιουργία δόμου), μέχρι το σχηματισμό της.*

ψωμένες περιοχές, στις οποίες κυριαρχεί μια έντονη διάβρωση (Εικ. 4.34γ).

Η δημιουργία και εξέλιξη του πρώτου συστήματος ρηγμάτων, που δημιουργούν την ημιτάφρο, αντανακλάται και στην ασυμμετρία που παρουσιάζουν τα ιζηματογενή πετρώματα. Στη μία πλευρά της τάφρου, την παλαιότερη (πρώτο σύστημα ρηγμάτων $F_1$), το πάχος των ιζημάτων είναι μεγάλο, ενώ στη νεότερη (δεύτερο σύστημα ρηγμάτων $F_2$), το πάχος είναι μικρό.

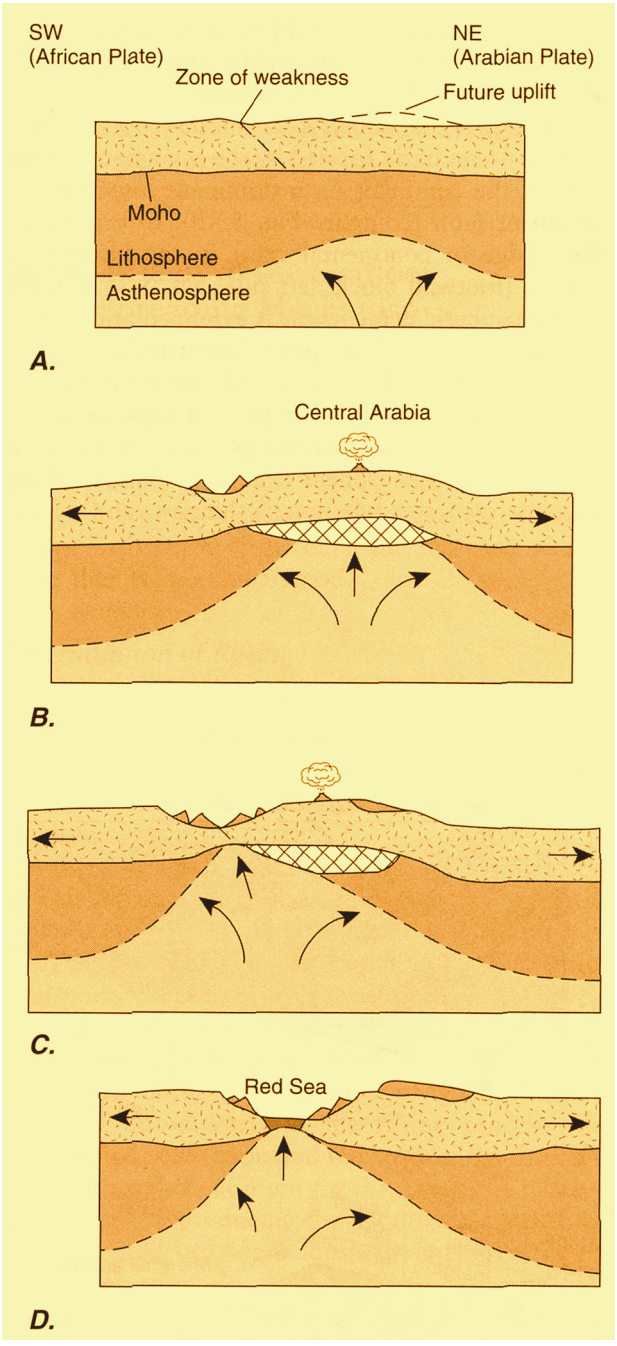
Τα συστήματα αυτά των ρηγμάτων $F_1$ και $F_2$, αν η τάφρος εξελιχθεί σε ωκεανική διάνοιξη, ενσωματώνονται μέσα στα ηπειρωτικά περιθώρια. Μέσα στην τάφρο τα συστήματα αυτά των ρηγμάτων χωρίζουν ένα σύνολο από μετατοπιζόμενα ρηξιτεμάχη που σχηματίζουν μικρότερης κλίμακας τεκτονικές τάφρους (Εικ. 4.34δ).

Οι ρηξιγενείς δομές εκατέρωθεν της τάφρου μπορεί να δίνουν ένα συμμετρικό ή μη συμμετρικό πρότυπο, γεγονός που εξαρτάται από τη γεωμετρία των συστημάτων των ρηγμάτων. Αν μια οριζόντια ζώνη αποκόλλησης, στο όριο θραυσιγενούς-όλκιμης παραμόρφωσης του φλοιού, χωρίζει μια κατώτερη ζώνη που παραμορφώνεται και εκτείνεται με όλκιμη παραμόρφωση από μια ανώτερη ζώνη που παραμορφώνεται και εκτείνεται από λιστρικά, κανονικά ρήγματα, τότε θα αναπτυχθεί μια τάφρος με τεκτονική συμμετρία (βλπ. Εικ. 4.13Α). Στην περίπτωση που ένα μεγάλης κλίμακας και μικρής γωνίας κλίσης ρήγμα αποκόλλησης, διασχίζει ολόκληρο το φλοιό ή και ολόκληρη τη λιθόσφαιρα, θα δημιουργηθεί ένα ασύμμετρο περιθώριο (βλπ. Εικ. 4.13Β).

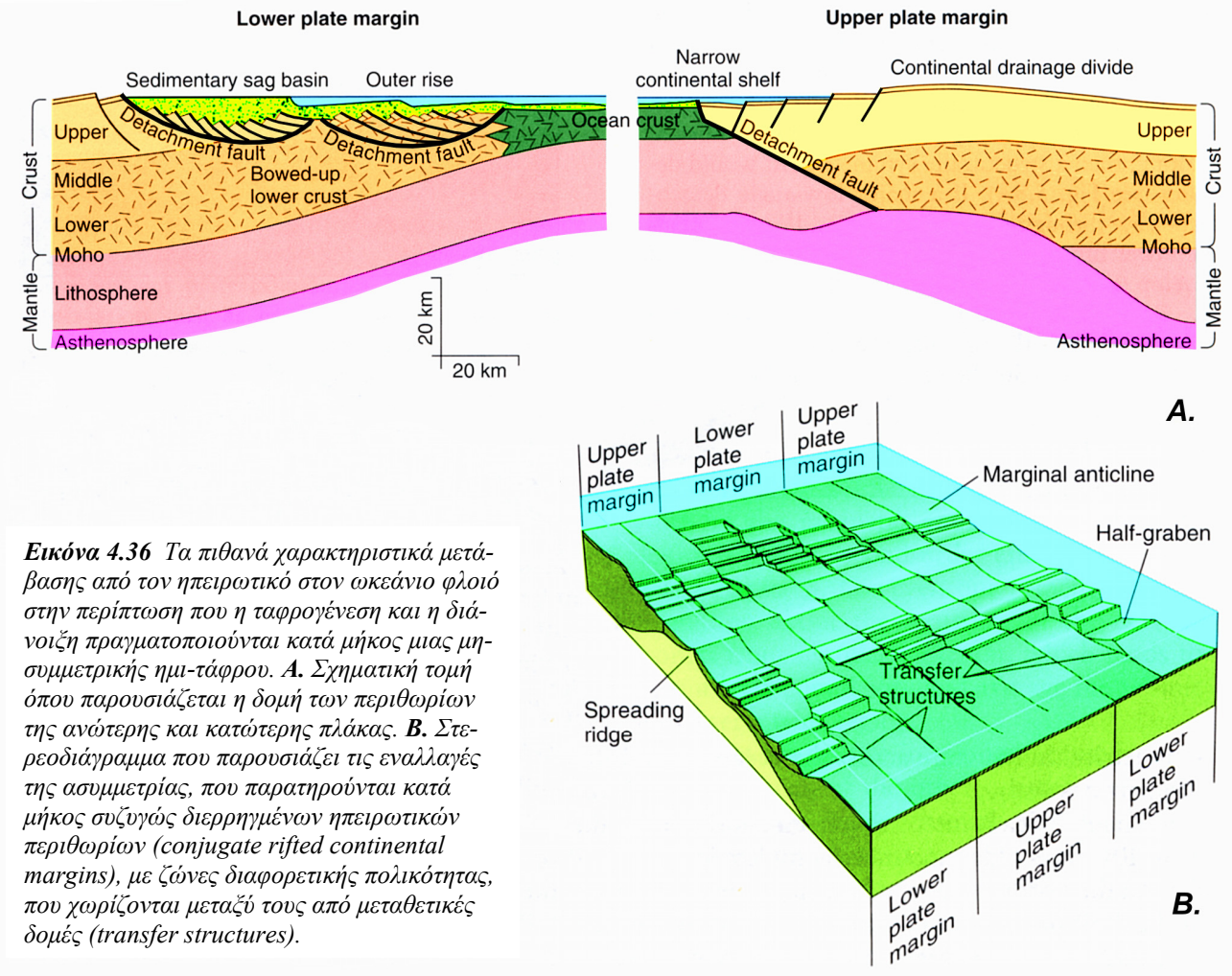
## *Ένα Μοντέλο για την Ερυθρά Θάλασσα*

Για παράδειγμα η Ερυθρά Θάλασσα παρουσιάζει χαρακτηριστικά που συμφωνούν και με τα δύο αυτά μοντέλα (συμμετρικό και μη συμμετρικό). Στην Εικόνα 4.35 παρουσιάζεται ένα μοντέλο της προοδευτικής εξέλιξης της μικρής ωκεάνιας τάφρου της Ερυθράς Θαλάσσης. Η απαρχή της ταφρογένεσης ξεκινάει και στην περίπτωση αυτή με τη δημιουργία ενός μορφολογικού "φουσκώματος", κατά το Ολιγόκαινο, προφανώς λόγω μιας ανόδου της ασθενόσφαιρας (Εικ. 4.35Α). Αυτή η αναθόλωση ταυτίζεται με τη θέση που θα δημιουργηθεί η μελλοντική τάφρος, τουλάχιστον για το νότιο τμήμα της Ερυθράς, δεδομένου ότι στο βόρειο η αναθόλωση βρίσκεται ανατολικότερα από την τάφρο της Ερυθράς, επί της Αραβικής Χερσονήσου.

Πιθανά, η τοποθέτηση μαγματικών πετρωμάτων, κάτω από την ηπειρωτική πλάκα, με προέλευση από τον μανδύα, οδήγησαν στην πάχυνση του φλοιού κάτω από την αναθόλωση (Εικ. 4.35Β). Η δημιουργία της τάφρου της Ερυθράς, πραγματοποιήθηκε δυτικότερα της αναθόλωσης, πιθανά κατά




***Εικόνα 4.35*** *Μοντέλο για την εξέλιξη της ηφαιστειότητας και της δομής εκατέρωθεν της Ερυθράς Θάλασσας.* ***Α.*** *Η αναθόλωση του μανδύα κάτω από τον ηπειρωτικό φλοιό πραγματοποιείται ανατολικότερα από την ασθενή ζώνη που θα αποτελέσει το μελλοντικό σπάσιμο.* ***Β.*** *Η τοποθέτηση μάγματος κάτω από το φλοιό προκαλεί αναθόλωση, πάχυνση του φλοιού και επιφανειακή ηφαιστειότητα. Η ταφρογένεση ξεκινά στην ασθενή ζώνη.* ***C.*** *Ο ηπειρωτικός φλοιός μεταναστεύει πάνω από την αναθόλωση της ασθενόσφαιρας καθώς η ηφαιστειότητα ελαττώνεται και η διάνοιξη συνεχίζει στην περιοχή της τάφρου.* ***D.*** *Ωκεάνιος φλοιός σχηματίζεται πάνω από την ασθενόσφαιρα.*




***Εικόνα 4.36*** *Τα πιθανά χαρακτηριστικά μετάβασης από τον ηπειρωτικό στον ωκεάνιο φλοιό στην περίπτωση που η ταφρογένεση και η διάνοιξη πραγματοποιούνται κατά μήκος μιας μη-συμμετρικής ημι-τάφρου.* ***Α.*** *Σχηματική τομή όπου παρουσιάζεται η δομή των περιθωρίων της ανώτερης και κατώτερης πλάκας.* ***Β.*** *Στερεοδιάγραμμα που παρουσιάζει τις εναλλαγές της ασυμμετρίας, που παρατηρούνται κατά μήκος συζυγώς διερρηγμένων ηπειρωτικών περιθωρίων (conjugate rifted continental margins), με ζώνες διαφορετικής πολικότητας, που χωρίζονται μεταξύ τους από μεταθετικές δομές (transfer structures).*

μήκος μιας προϋπάρχουσας ασθενούς ζώνης στο φλοιό. Από τη στιγμή που δημιουργήθηκε η τάφρος, η θέση της αναθόλωσης της ασθενόσφαιρας μετατέθηκε, έτσι ώστε σήμερα να βρίσκεται ακριβώς κάτω από τον άξονα της Ερυθράς Θάλασσας (Εικ. 4.35B&C). Η δημιουργία κανονικών ρηγμάτων συνοδεύεται από διεισδύσεις βασαλτών, που δημιουργούν μεταβατικό φλοιό, ανάμεσα στον ηπειρωτικό και τον ωκεάνιο (Εικ. 4.35B&C). Τελικά, πραγματικός ωκεάνιος φλοιός αρχίζει να σχηματίζεται στην αξονική ζώνη της τάφρου (Εικ. 4.35D) και τα ηπειρωτικά περιθώρια, που παρουσιάζουν κατά προσέγγιση συμμετρική τεκτονική δομή κατά μήκος της ωκεάνιας λεκάνης, απομακρύνονται μεταξύ τους παθητικά.

Η Ερυθρά Θάλασσα παρουσιάζει ενδιαφέρον και από μια άλλη άποψη. Η ταφρογένεση είναι παλαιότερη και πιο ολοκληρωμένη στο νότιο τμήμα, απ' ότι στο βόρειο. Στον Κόλπο του Σουέζ, στο ΒΔ άκρο της Ερυθράς Θάλασσας βρίσκεται στα αρχικά στάδια εξέλιξης και ο ηπειρωτικός φλοιός είναι συνεχής κάτω από την τάφρο. Ορισμένοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι η θαλάσσια λεκάνη δημιουργήθηκε με την εξάπλωση της ταφρογένεσης από Νότο προς Βορρά.

## *Μοντέλα μη-Συμμετρικού Εφελκυσμού*

Στην Εικόνα 4.36 παρουσιάζεται μια σχηματική τομή μιας ωκεανικής τάφρου, που έχει σχηματισθεί από μη-συμμετρικό εφελκυσμό της λιθόσφαιρας, η οποία διασχίζεται από ένα μεγάλης κλίμακας και μικρής γωνίας κλίσης, ρήγμα αποκόλλησης (low-angle detachment fault). Το τμήμα του φλοιού που βρίσκεται πάνω από το ρήγμα αποκόλλησης θα ονομάζεται upper plate (ανώτερη πλάκα) και αυτό που βρίσκεται από κάτω lower plate (κατώτερη πλάκα – Για λεπτομέρειες στην ορολογία που χρησιμοποιείται στα μοντέλα αυτά βλπ. και Κεφάλαιο 10).

Στο μοντέλο αυτό, η σφήνα (wedge), του ηπειρωτικού φλοιού στο περιθώριο της κατώτερης πλάκας, που βρίσκεται κάτω από το ρήγμα αποκόλλησης (δηλαδή το υποκείμενο τέμαχος του ρήγματος – footwall block), εκτείνεται και εκλεπτύνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό (αριστερό τμήμα της

Εικ. 4.36Α). Το περιθώριο της πάνω πλάκας (δηλαδή το υπερκείμενο τέμαχος του ρήγματος), παραμορφώνεται ελάχιστα στο σύνολό του (δεξιό τμήμα Εικ. 4.36Α). Η εκλέπτυνση στο περιθώριο της κατώτερης πλάκας έχει ως αποτέλεσμα την ισοστατική εξισορρόπηση με άνοδο της Moho και του ορίου λιθόσφαιρας-ασθενόσφαιρας. Ο ηπειρωτικός φλοιός διαχωρίζεται στην περιοχή της μέγιστης εκλέπτυνσης και ωκεάνιος φλοιός δημιουργείται ανάμεσα στα δύο απομακρυνόμενα ηπειρωτικά τεμάχη. Διεισδύσεις φλεβών και κοιτών αναμένονται, ίσως και στα δύο περιθώρια, πιθανότερο όμως είναι τα φαινόμενα αυτά να εκδηλωθούν στο περιθώριο του υποκείμενου ρηξιτεμάχους (κατώτερη πλάκα), όπου η εκλέπτυνση φθάνει σε ακραίες τιμές και η άνοδος της ασθενόσφαιρας είναι μεγαλύτερη.

Τα ηπειρωτικά περιθώρια που προκύπτουν από τη διαδικασία αυτή, στις δύο αντίθετες πλευρές της ωκεάνιας λεκάνης, παρουσιάζουν αξιοσημείωτες διαφορές στη δομή τους. Η μία πλευρά της λεκάνης αποτελείται από το υποκείμενο ρηξιτέμαχος, πάνω στο οποίο απαντώνται θραύσματα από το υπερκείμενο ρηξιτέμαχος, που χωρίζονται μεταξύ τους από αποκομμένα, τοξοειδούς σχήματος, τμήματα του ρήγματος αποκόλλησης (αριστερό τμήμα Εικ. 4.36Α). Ένας αριθμός λιστρικών ή dominotύπου ρηγμάτων, με ίδια φορά κλίσης, καταλήγουν στην επιφάνεια αποκόλλησης και δημιουργούν χαρακτηριστικές ημι-τάφρους (half-grabens).

Η άλλη πλευρά της λεκάνης αποτελείται από το υπόλοιπο τμήμα του υπερκείμενου ρηξιτεμάχους, που είναι ελαφρά καμπυλωμένο από μια πολύ ανοικτή ασύμμετρη μεγα-πτυχή, με το κορυφαίο της να είναι μετατοπισμένο προς την ακτή, που τέμνεται από απότομα κανονικά ρήγματα, με σχετικά μικρές μετακινήσεις. Η δομή αυτή έχει σαν αποτέλεσμα, ο υδροκρίτης του ηπειρωτικού τμήματος του περιθωρίου της ανώτερης πλάκας, να βρίσκεται κοντά στην παραλιακή ζώνη. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων περιθωρίων της ανώτερης πλάκας είναι πιθανά τα περιθώρια της Νότιας Βραζιλίας, που παρουσιάζουν υψηλά υψόμετρα και υδροκρίτες κοντά στις ακτές.

Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 4.36Β, ορισμένες φορές, το σύστημα αυτό των ημιτάφρων, που σχηματίζεται από τη μη-συμμετρική ταφρογένεση, μπορεί να τερματίζεται σε εγκάρσιες δομές μεταθετικών ρηγμάτων (transfer structure), και να συνεχίζει από την άλλη πλευρά με διαφορετική πολικότητα (διαφορετική φορά κλίσης ρηγμάτων και κατερχόμενων ρηξιτεμαχών). Η δομή αυτή φέρνει στο νου το ρηξιγενές πρότυπο που έχει προταθεί για τα συστήματα ρηγμάτων της ηπειρωτικής τάφρου της Ανατολικής Αφρικής (βλπ. Εικ. 4.15). Το μοντέλο αυτό ερμηνεύει και εξηγεί γιατί κατά μήκος του ίδιου ηπειρωτικού περιθωρίου μπορεί να απαντώνται εναλλασσόμενα τμήμα με χαρακτηριστικά της ανώτερης ή της κατώτερης πλάκας.

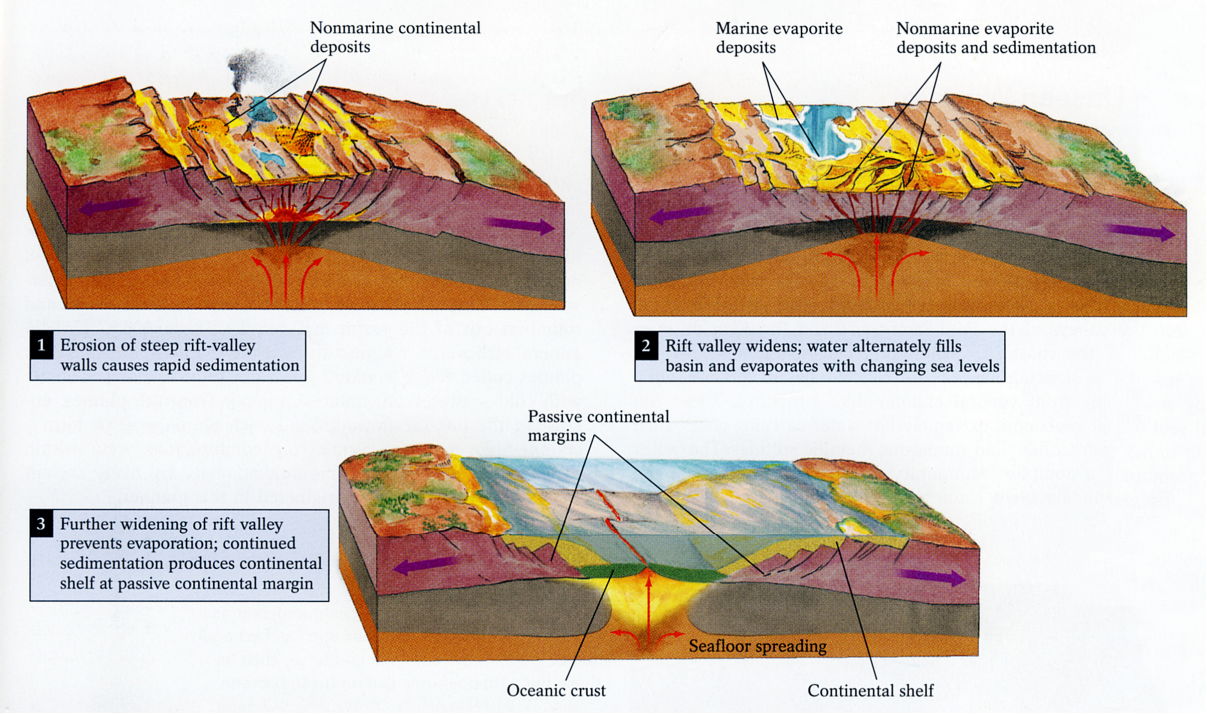
## *Τα Ιζήματα των Σταθερών Ηπειρωτικών Περιθωρίων*

Και στις δύο περιπτώσεις, του συμμετρικού ή μη εφελκυσμού, οι τεκτονικές τάφροι, ή ημι-τάφροι, που δημιουργούνται σχετίζονται με τη δράση κανονικών λιστρικών ρηγμάτων (Εικ. 4.36, βλπ. επίσης Εικ. 4.13). Οι τάφροι αυτοί αποτελούν παγίδες ηπειρωτικών ιζημάτων, που αντιπροσωπεύονται είτε από αδρομερή κλαστικά ιζήματα, κατά μήκος των περιθωρίων, είτε από λεπτομερείς ποτάμιες και λιμναίες αποθέσεις, στις κεντρικές περιοχές της τάφρου (Εικ. 4.37).

Ο εφελκυσμός και η εκλέπτυνση του ηπειρωτικού φλοιού, έχει ως αποτέλεσμα ο πυθμένας της ηπειρωτικής ρηξιγενούς τάφρου να κατεβαίνει σε επίπεδα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, όπως ακριβώς συμβαίνει στην Death Valley στην Καλιφόρνια και την περιοχή του Αφάρ στην Αιθιοπία. Όταν τα νερά του ωκεανού βρίσκουν πρόσβαση στην μορφολογικά ταπεινωμένη τάφρο, δημιουργούνται αβαθείς κλειστές θάλασσες με περιορισμένη κυκλοφορία και έτσι αρχίζει η θαλάσσια ιζηματογένεση (Εικ. 4.37).

Αν οι κλιματικές συνθήκες στην περιοχή της τάφρου, είναι θερμές και ξηρές, τα πρωταρχικά θαλάσσια ιζήματα αντιπροσωπεύονται από αλατούχες αποθέσεις, λόγω της εβαποριτίωσης του θαλασσινού νερού, όπως ακριβώς συνέβη και στα αρχικά στάδια δημιουργίας της Ερυθράς Θαλάσσης και του Κόλπου του Μεξικού. Οι εβαπορίτες μπορεί να φθάσουν στο στάδιο αυτό το πάχος του 1 km, ή και ακόμα περισσότερο, μέχρι η ωκεάνια λεκάνη να γίνει αρκετά μεγάλη ώστε να επιτρέψει την ανοικτή κυκλοφορία που θα εμποδίσει την υψηλή συγκέντρωση των αλάτων. Σε ψυχρότερα και υγρότερα κλίματα, οι εβαπορίτες μπορεί να απουσιάζουν, αλλά και στην περίπτωση αυτή ηπειρωτικά και θαλάσσια ιζήματα μπορεί να διαδέχονται το ένα το άλλο, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση.

Σταδιακά, όσο το πλάτος της λεκάνης αυξάνει, οι συνθήκες ανοικτής θάλασσας επικρατούν. Ο εκλεπτυσμένος ηπειρωτικός φλοιός, μαζί με τις μαγματικές διεισδύσεις, απομακρύνεται μακριά από τα κέντρα διάνοιξης, καθώς σχηματίζεται νέος ωκεάνιος φλοιός, όπως ακριβώς σήμερα συμβαίνει στην Ερυθρά Θάλασσα. Καθώς τα ηπειρωτικά περιθώρια απομακρύνονται, σταδιακά, από το όριο των πλακών στο κέντρο του ωκεάνιου πυθμένα, και αναλαμβάνουν το ρόλο των παθητικών περιθωρίων, η υποκείμενη λιθόσφαιρα ψύχεται και συστέλλεται, με αποτέλεσμα την καταβύθιση των περιθω-




***Εικόνα 4.37*** *Οι διάφοροι τύποι ιζηματογένεσης, που χαρακτηρίζουν την εξέλιξη των σταθερών ηπειρωτικών περιθωρίων, από το στάδιο της ταφρογένεσης, μέχρι τη διάνοιξη του ωκεανού.* ***1.*** *Αδρομερή κλαστικά ιζήματα στα περιθώρια της τάφρου και ποτάμια και λιμναία ιζήματα στην αξονική περιοχή.* ***2.*** *Είσοδος του θαλάσσιου νερού, δημιουργία κλειστών θαλασσών, ιζηματογένεση εβαποριτών.* ***3.*** *Δημιουργία μιας παχιάς ακολουθίας από ιζήματα κρηπίδας, κλιτύων και ρηχής θάλασσας, στα παθητικά περιθώρια.*

ρίων. Η καταβύθιση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας πολύ παχιάς ακολουθίας από ιζήματα κρηπίδας, κλιτύων και ρηχής θάλασσας, που οδηγούν σε αυτό που αποκαλείται ώριμα ηπειρωτικά περιθώρια, όπως αυτά του Ατλαντικού Ωκεανού σήμερα.

Επειδή η εξέλιξη των σταθερών, ή Ατλαντικού-τύπου, περιθωρίων, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, και λόγω της οικονομικής σημασίας τους (υδρογονάνθρακες κλπ.), θα αναφερθούν στη συνέχεια ορισμένες λεπτομέρειες για τα γεωδυναμικά φαινόμενα που τη διαμορφώνουν.

## *Η Καταβύθιση των Σταθερών Ηπειρωτικών Περιθωρίων*

Στα μοντέλα που περιγράφησαν μέχρι στιγμής, γίνεται φανερό ότι τα κύρια αίτια της καταβύθισης των ηπειρωτικών περιθωρίων, τουλάχιστον στα αρχικά στάδια της δημιουργίας και εξέλιξης της τάφρου, είναι κατά κύριο λόγο ο εφελκυσμός και η δράση των λιστρικών κανονικών ρηγμάτων, αλλά και ο μαγματισμός, που αυξάνει την πυκνότητα του φλοιού, με αποτέλεσμα την καταβύθιση για την επίτευξη ισοστατικής ισορροπίας. Αναφέρθηκε επίσης, ότι στο στάδιο της διάνοιξης του ωκεανού, με τη σταδιακή απομάκρυνση των παθητικών περιθωρίων από το κέντρο διάνοιξης, η υποκείμενη λιθόσφαιρα ψύχεται και συστέλλεται, με αποτέλεσμα την καταβύθισή τους. Αυτό το κυρίαρχο αίτιο για την καταβύθιση των παθητικών περιθωρίων, αλλά και άλλα σημαντικά αίτια, σε όλα τα στάδια εξέλιξης των περιθωρίων, όπως η διάβρωση και η φόρτιση από ιζήματα και η εκλέπτυνση του φλοιού, θα αναλυθούν στη συνέχεια.

### *Η Ψύξη της Ηπειρωτικής Λιθόσφαιρας*

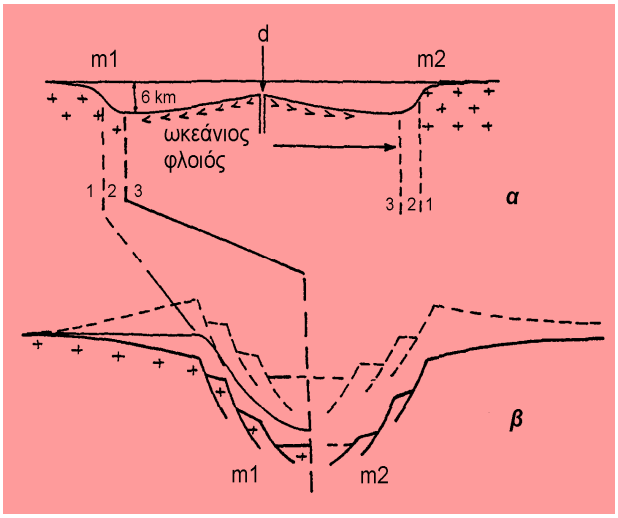
Στην εισαγωγή του Κεφαλαίου 4, δόθηκαν ορισμένα στοιχεία για την ψύξη της ωκεανικής λιθόσφαιρας και τη μεταβολή του βάθους του ωκεάνιου πυθμένα σε σχέση με την ηλικία του φλοιού (βλπ. Εικ. 4.5).

Η ηπειρωτική λιθόσφαιρα διαφέρει ουσιαστικά από την ωκεανική και επομένως οι νόμοι που εφαρμόζονται για να υπολογίσουμε τη θερμική καταβύθιση της ωκεανικής λιθόσφαιρας δεν εφαρμόζονται αυτούσιοι και για την ηπειρωτική, λιθόσφαιρα.

Η ψύξη της ηπειρωτικής λιθόσφαιρας πραγματοποιείται σε δύο περιπτώσεις: Όταν η ηπειρωτική τάφρος παύει να είναι ενεργή (δηλαδή δεν δίνει γένεση σε ένα ωκεανό) και όταν, αντίθετα, μια συνεχής ωκεανική διάνοιξη προκαλεί τη μετανάστευση του φλοιού μακριά από την ωκεανική ράχη και

επομένως την ψύξη των περιθωρίων της αρχικής ηπειρωτικής τάφρου που σήμερα αποτελούν τα παθητικά περιθώρια του ωκεανού (Εικ. 4.38).

Ο ρυθμός της καταβύθισης της ηπειρωτικής λιθόσφαιρας μπορεί να αναπαρασταθεί από τη μεταβολή του συνόλου των νηρητικών ιζημάτων που δημιουργούνται στις κρηπίδες και στις ενδοκρατονικές λεκάνες. Σ' αυτή την περίπτωση και κυρίως στις κρηπίδες, το βάθος της θάλασσας παραμένει σταθερό, από 0-200 μέτρα και το πάχος των ιζηματογενών στρωμάτων, στη μονάδα του χρόνου, εξαρτάται από την καταβύθιση του υποβάθρου τους




***Εικόνα 4.38*** *Σταθερό ηπειρωτικό περιθώριο και παλαιά ηπειρωτική τάφρος.* ***α.*** *Σχηματική τομή ενός ωκεανού που περιβάλλεται από δύο σταθερά περιθώρια m1 και m2 και χαρακτηρίζεται από ωκεανική διάνοιξη στο επίπεδο της ενεργού μεσο-ωκεάνιας ράχης d.* ***β.*** *Λεπτομέρεια του προηγούμενου σχήματος. Με διακεκομμένη γραμμή συμβολίζονται οι δομές της παλαιάς ηπειρωτικής τάφρου, που βυθίστηκαν με θερμική βύθιση (1: παλαιές πλαγιές της τάφρου –σημερινή κρηπίδα, 2: παλαιό βύθισμα – σημερινό παθητικό περιθώριο, 3: ζώνη του νεοσχηματισμένου ωκεάνιου φλοιού).*

λεκάνης και, σε μικρότερη κλίμακα, από τη συμπαγοποίηση των παλαιότερων ιζημάτων. Δεν πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη, τη ζώνη της τεκτονικής τάφρου, όπου η καταβύθιση έχει και άλλες αίτιες εκτός της ψύξης.

Τα αποτελέσματα των μελετών που έγιναν στις διάφορες κρηπίδες και τις ενδοκρατονικές λεκάνες έδειξαν, στις περισσότερες περιπτώσεις, ότι η θερμική καταβύθιση της ηπειρωτικής λιθόσφαιρας είναι περίπου ταυτόσημη με αυτή της ωκεανικής λιθόσφαιρας. Η καμπύλη της καταβύθισης σε σχέση με το χρόνο είναι πολύ γειτονική μιας εκθετικής καμπύλης που η σταθερά της είναι της τάξης των 50 εκατομ. χρόνων.

*<u>Η Διάβρωση των Ηπειρωτικών Τάφρων και η Φόρτιση από Ιζήματα</u>*

Η δομή που παρουσιάζουν η ηπειρωτική τάφρος και η ωκεάνιος ράχη, έχει πολλές ομοιότητες. Μια σημαντική διαφορά είναι, ότι η ωκεάνια ράχη εξελίσσεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και έτσι πρακτικά δεν υπάρχει διάβρωση, ενώ αντίθετα η ηπειρωτική τάφρος σχηματίζει ένα ανάγλυφο που υφίσταται τις δράσεις της διάβρωσης, που έχουν ως αποτέλεσμα την λέπτυνση του φλοιού. Η διάβρωση του επιφανειακού μέρους του φλοιού προκαλεί μια ισοστατική ισορροπία και μια νέα ανύψωση ακολουθεί το επόμενο σχήμα:

***ανύψωση (θερμική) → διάβρωση → ανύψωση (ισοστατική).***

Το πάχος του φλοιού που διαβρώνεται στα χείλη και τις πλαγιές των τάφρων μπορεί να υπολογιστεί. Αν δεχτούμε ότι οι ηπειρωτικές τάφροι έχουν μια δραστηριότητα μεγάλης διάρκειας, η διάβρωση θα καταλήξει προοδευτικά σε ένα χαμήλωμα του ανάγλυφου, σχηματίζοντας ένα πανεπίπεδο πολύ κοντά στο επίπεδο της θάλασσας. Αν x είναι το πάχος του διαβρούμενου φλοιού τότε το x δίνεται από την εξίσωση:

$$(1,5+x)*2,8 = 3,15*x$$

άρα x=12 χιλιόμετρα (Εικ. 4.39). Η εξίσωση αυτή τηρεί την ισοστατική ισορροπία από την αρχική κατάσταση ως την τελική. Η υπόθεση της ολικής καταστροφής των ανάγλυφων δεν είναι πραγματική, αλλά μια ηπειρωτική τάφρος μπορεί να παραμείνει σε δραστηριότητα μεγάλο χρονικό διάστημα, όπως π.χ. η τάφρος του Ρήνου, που άρχισε από το τέλος του Κρητιδικού. Σε τέτοιες συνθήκες μια διάβρωση της τάξεως των 5 km είναι πιθανή.

Όταν μία ηπειρωτική τάφρος παύει να είναι ενεργή, είτε επειδή σταματάει η έκχυση του βασαλτικού υλικού, είτε διότι μετασχηματίστηκε σε σταθερό περιθώριο, κάμπτεται από την επίδραση του λιθοσφαιρικού ξεφουσκώματος και αρχίζει να δέχεται ιζήματα που αυξάνουν την καταβύθισή της:

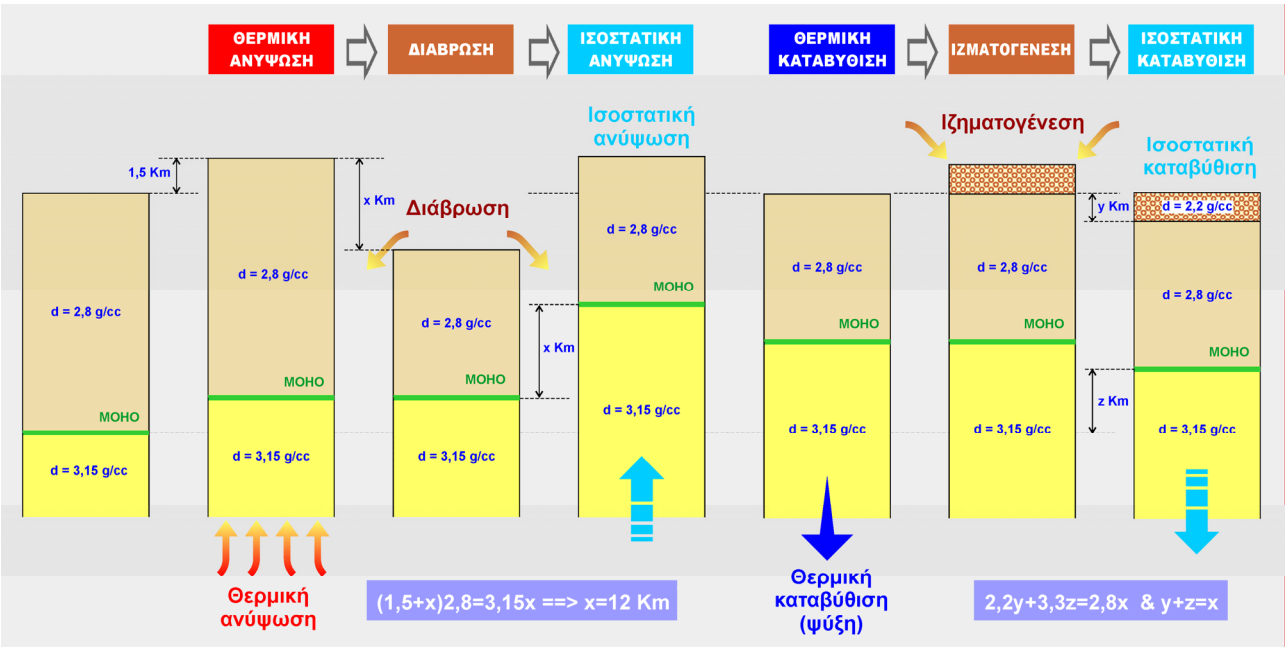
***καταβύθιση (θερμική) → ιζηματογένεση → καταβύθιση (ισοστατική)***

Το πάχος ψ των ιζημάτων που συσσωρεύονται με αυτό τον τρόπο, εξαρτάται από το πάχος x του διαβρούμενου φλοιού κατά τη διάρκεια της ενεργοποίησης της ηπειρωτικής τάφρου (Εικ. 4.39). Το ψ δίνεται από τις εξισώσεις:

$$2,2\psi + 3,32 = 2,8x \qquad \text{και}$$

$$\psi + z = x$$

Οι εξισώσεις αυτές τηρούν όπως και η προηγούμενη την ισοστατική ισορροπία μεταξύ της αρχικής




***Εικόνα 4.39*** *Η διάβρωση και η φόρτιση από ιζήματα σε συνδυασμό με την επακόλουθη θερμική ή ισοστατική ανύψωση και καταβύθιση, αποτελούν γεωδυναμικές διαδικασίες που χαρακτηρίζουν τα παθητικά ηπειρωτικά περιθώρια και μπορούν, εν μέρει, να ποσοτικοποιηθούν.*

κατάστασης και της τελικής. Αν x=12 km (η μέγιστη τιμή που μπορεί να φτάσει), τότε το πάχος των ιζημάτων ψ=5,5 km. Αν x=5 km, πράγμα το οποίο είναι πιθανόν, τότε ψ=2,25km.

Οι προηγούμενες εξισώσεις εφαρμόζονται στις κρηπίδες που καταλαμβάνουν τις πλαγιές από τις παλαιές ηπειρωτικές τάφρους και για μερικές ενδοκρατονικές λεκάνες. Στην περίπτωση των κρηπίδων τα ιζήματα σχηματίζουν ένα πρίσμα που αυξάνει προς τα έξω, δηλαδή εκεί που η διάβρωση του φλοιού ήταν η πιο μεγάλη (παλαιές ράχες των τάφρων).

Στην περίπτωση των ενδοκρατονικών λεκανών το πάχος των ιζημάτων αυξάνεται προς το κέντρο της λεκάνης, όπου κάτω από τις αποθέσεις βρίσκεται καλυμμένη η τάφρος από τα παλαιότερα ιζήματα.

Συνολικά η διάβρωση των ηπειρωτικών τάφρων και η θερμική, βύθιση της ηπειρωτικής λιθόσφαιρας δίνουν καταβυθίσεις της τάξεως των 2-3 χιλιομέτρων. Επομένως και άλλα γεωδυναμικά φαινόμενα πρέπει να λαμβάνουν χώρα στα ηπειρωτικά περιθώρια για να εξηγήσουν τα μεγάλα πάχη των ιζημάτων. Η φόρτιση από το βάρος των ιζημάτων βοηθάει την καταβύθιση χωρίς να είναι η πρωταρχική αιτία. Η αντικατάσταση του θαλασσινού νερού (πυκνότητα 1,03 gr/cm$^3$), από ιζήματα (πυκνότητα 2,2 gr/cm$^3$), προκαλεί αναγκαστικά μια ισοστατική τοπική επανόρθωση και μια καθίζηση του υποβάθρου, που αποτελείται από το φλοιό. Αν αφαιρέσουμε από την κρηπίδα ή από το ηπειρωτικό χείλος ιζήματα πάχους 1km, τότε η Moho θα ανερχόταν κατά 0,5km περίπου.

Γνωρίζουμε ότι όταν στη λιθόσφαιρα εξασκηθεί μια φόρτιση, προκαλείται ένα κοίλωμα με μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας. Το κοίλωμα αυτό γίνεται πιο έντονο όταν η φόρτιση αυξάνει, όπως συμβαίνει στην περίπτωση μιας ιζηματογενούς λεκάνης, που αυξάνεται το πάχος των ιζηματογενών αποθέσεων. Η περιφέρεια της λεκάνης ανυψώνεται, ενώ αντίθετα το κέντρο βυθίζεται. Πάνω στην κρηπίδα, που το βάθος του νερού είναι πάντα μικρό, η προηγούμενη διαδικασία προκαλεί την ανάδυση και διάβρωση των ιζημάτων, που έχουν αποτεθεί προηγουμένως στα όρια της λεκάνης. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξηγείται η διάταξη των ιζημάτων που παρατηρούνται στις κρηπίδες και στις προσκείμενες παράκτιες λεκάνες. Δηλαδή προς την ηπειρωτική κατωφέρεια η στρωματογραφική σειρά είναι σχεδόν πλήρης μέχρι τη σημερινή εποχή, ενώ αντίθετα προς την ακτή και κυρίως πέρα από τις παραλιακές ζώνες, που εξαρτώνται από τη σημερινή αναδυμένη κρηπίδα συναντάμε πετρώματα, προοδευτικά αρχαιότερα λόγω διάβρωσης.

Η απόσυρση της θάλασσας στην περίπτωση αυτή είναι αποτέλεσμα της καταβύθισης. Προς την πλευρά του ωκεανού και κάτω από το χείλος δημιουργούνται ανάλογα φαινόμενα, αλλά η μετάβαση ωκεανού-ηπείρου, που αντιστοιχεί στο όριο μιας απολιθωμένης πλάκας, είναι μια ζώνη κατακερματισμένη από κανονικά ρήγματα, που δρουν κατά τη διάρκεια της ιζηματογένεσης. Έτσι, η καταβύθιση

του χείλους σε κάποια έκταση είναι ανεξάρτητη από την καταβύθιση της κρηπίδας. Το εύρος των κατακόρυφων κινήσεων που δημιουργούνται εξαιτίας του βάρους των ιζημάτων πρέπει να υπολογίζεται χωριστά για την ηπειρωτική και την ωκεανική πλευρά.

*Η Εκλέπτυνση του Φλοιού στα Ηπειρωτικά Περιθώρια και η Μετάβαση Ηπείρου-Ωκεανού*

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα σεισμικά δεδομένα (σεισμική διάθλαση) δείχνουν ότι στις ηπείρους έχουμε παχύ φλοιό, ενώ στις ωκεάνιες λεκάνες λεπτό. Στη ζώνη μετάβασης ηπείρου-ωκεανού υπάρχει ο ενδιάμεσος φλοιός. Η καταβύθιση του υποβάθρου των ηπειρωτικών περιθωρίων μπορεί να εξηγηθεί ως αποτέλεσμα ισοστατικών φαινομένων εξαιτίας της εκλέπτυνσης του φλοιού. Η φύση του ενδιάμεσου φλοιού δεν είναι γνωστή και πολλές υποθέσεις έχουν προταθεί για την εξήγησή του, αλλά δεν έχουν ακόμα επαληθευτεί από γεωτρήσεις.

Είναι γνωστό ότι ο ωκεάνιος φλοιός σε όλους τους ωκεανούς παρουσιάζει τις γραμμικές μαγνητικές ανωμαλίες, που είναι ισόχρονες και έχουν μια ευρύτητα 200-300 γ. Όταν πλησιάζουμε τα σταθερά ηπειρωτικά περιθώρια, αυτές οι μαγνητικές ανωμαλίες δεν είναι έντονες (40-100 γ) και παρουσιάζονται σε ένα πλάτος 100-400 km. Η ζώνη αυτή του φλοιού ονομάζεται "ζώνη των γαλήνιων ανωμαλιών" ή " μαγνητικά ήρεμη ζώνη " (Z.M.C.). Η ζώνη Z.M.C. δεν υπάρχει μόνο σε μια θέση. Αρχικά διαπιστώθηκε ανατολικά των Η.Π.Α, έπειτα στο Νότιο Ατλαντικό, στη θάλασσα της Νορβηγίας που το άνοιγμα έγινε πριν από 60 ma, στην Ερυθρά θάλασσα πριν 5 ma κ.λ.π.

Η αρχική εξήγηση που δόθηκε ήταν ότι η Z.M.C. βρίσκεται πάνω σε ένα ωκεάνιο φλοιό που, όταν σχηματίστηκε, η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου παρέμεινε σταθερή. Αυτή η υπόθεση όμως δεν ευσταθεί, γιατί οι ηλικίες των Z.M.C. δεν είναι παντού ίδιες αλλά διαφορετικές. Επίσης δεν ευσταθεί n υπόθεση ότι οι Z.M.C. σχηματίστηκαν κοντά στον ισημερινό, όπου τα αποτελέσματα από τη θερμική μαγνητοποίηση των πετρωμάτων του φλοιού είναι πολύ ασθενή, γιατί n κατανομή των Z.M.C. στην επιφάνεια της γήινης σφαίρας δεν το επιτρέπει. Μερικοί γεωφυσικοί δέχονται ότι η Z.M.C. είναι ένα τμήμα του ωκεάνιου φλοιού που έχει υποστεί ένα θερμικό μεταμορφισμό, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη του αρχικού μαγματισμού. Η υπόθεση αυτή έρχεται σε αντίθεση με το γεγονός ότι n ζώνη Z.M.C. παρατηρείται μόνο κατά μήκος μιας στενής ωκεανικής λωρίδας παρακείμενης της ηπείρου και περιορισμένης από τις ανωμαλίες μεγάλου εύρους, που είναι ισόχρονες.

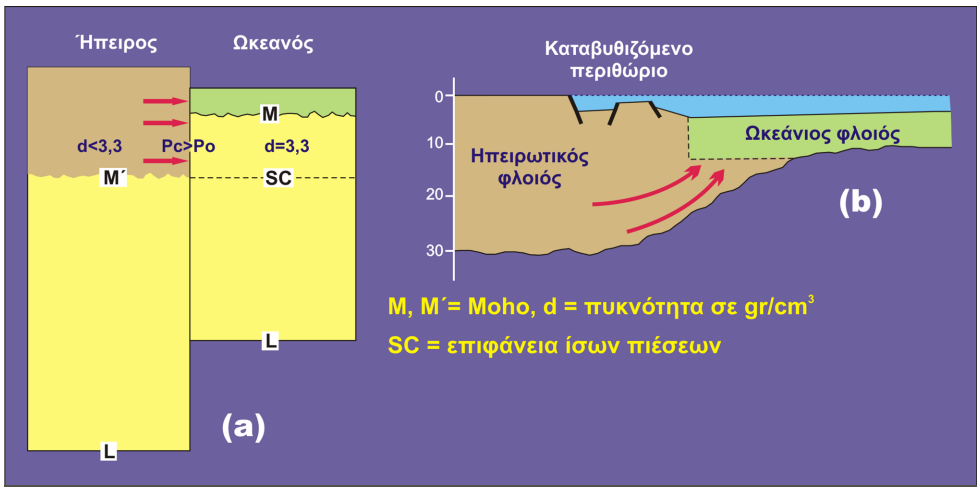
Από άλλους γεωφυσικούς προτάθηκε, ότι η ζώνη Z.M.C. οφείλεται σε ένα αργό ωκεανικό άνοιγμα, όπου οι αρχικές μαγνητικές ανωμαλίες είναι ανακατεμένες. Τελικά η ζώνη Z.M.C. ερμηνεύεται με την υπόθεση ότι αντιστοιχεί σε μια περιοχή του ηπειρωτικού φλοιού, όπου το πάχος του είναι πολύ λεπτό και πρόκειται για το βαθύτερο μέρος των σταθερών ηπειρωτικών περιθωρίων που το υπόβαθρο των ιζημάτων δεν είναι ωκεανικής φύσης.

Στο βόρειο και δυτικό Ατλαντικό ωκεανό, που είναι οι καλύτερα μελετημένες περιοχές, η ζώνη Z.M.C, αποτελείται από δύο τομείς. Προς την ηπειρωτική πλευρά οι ανωμαλίες είναι πολύ ασθενείς, ενώ αντίθετα προς την ωκεανική πλευρά παρατηρούνται καθαρές ανωμαλίες, σχηματίζοντας, κατά κάποιο τρόπο, μετάβαση με το πεδίο της ωκεανικής περιοχής. Έτσι δεχόμαστε ότι ο τομέας, ο πιο κοντινός στο ηπειρωτικό περιθώριο, αντιστοιχεί σε ένα υπόβαθρο ηπειρωτικής φύσης, ενώ ο άλλος σε ένα υπόβαθρο ωκεανικής φύσης. Αυτή. η εξήγηση προϋποθέτει μια προοδευτική εκλέπτυνση του ηπειρωτικού φλοιού προς την κατεύθυνση του ωκεανού, Η διάβρωση που πραγματοποιείται στα χείλη και τις πλευρές της ηπειρωτικής τάφρου, διαβρώνει περιορισμένο πάχος, της τάξεως των 5km και έτσι για να εξηγηθεί το φαινόμενο πρέπει να συμβαίνουν και άλλα αίτια.

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με την υπόθεση της ροής του φλοιού. Η Εικόνα 4.40 παριστάνει μια θεωρητική κατάσταση που λαμβάνει χώρα όταν η απόκλιση μεταξύ δύο πλακών αρχίζει να εμφανίζει το πρώτο νεοσχηματισμένο ωκεάνιο φλοιό. Κατά την περίοδο αυτή βρίσκονται σε επαφή δύο λιθόσφαιρες άνισου πάχους και μεταξύ των επιπέδων M και M΄ (M = ωκεάνια Moho και M΄= ηπειρωτική) ένας ηπειρωτικός και ένας ωκεάνιος φλοιός (Εικ. 4.40α).

Πάνω από μια επιφάνεια SC, που περιέχει την ηπειρωτική Moho M΄, που είναι μια επιφάνεια ίσης πίεσης τοποθετημένη μέσα στο μανδύα, η κάθετη κατανομή των πυκνοτήτων είναι διαφορετική, αφού βρισκόμαστε σε ηπειρωτικό μέσο ή σε ωκεάνιο μέσο. Αν θεωρήσουμε μια οριζόντια επιφάνεια που βρίσκεται μεταξύ της επιφάνειας SC και της επιφάνειας του φλοιού, τότε αυτή θα δέχεται άνισες πιέσεις από τη μια και από την άλλη πλευρά της διαχωριστικής επιφάνειας ηπείρου-ωκεανού. Πάνω από την επιφάνεια SC η πίεση στο ωκεανικό μέσο (πυκνότητα μανδύα 3,3) ελαττώνεται πολύ πιο γρήγορα απ' ότι στο ηπειρωτικό (πυκνότητα 2,8). Με άλλα λόγια, η πίεση Pc είναι πάντα μεγαλύτερη από την Po σε ένα δεδομένο βάθος (n διαφορά μπορεί να φτάσει το όριο των 800 bars).

Κατά το πρώτο στάδιο της εξέλιξης ενός σταθερού ηπειρωτικού περιθωρίου (στάδιο της ηπειρωτικής τάφρου) και στην αρχή της ωκεανικής διά-




***Εικόνα 4.40*** *Η θερμική ροή σε ένα σταθερό ηπειρωτικό περιθώριο και το θεωρητικό μοντέλο hot creep, που εξηγεί την καταβύθιση των σταθερών περιθωρίων, την προοδευτική εκλέπτυνση του ηπειρωτικού φλοιού προς την κατεύθυνση του ωκεανού και μερικές ομοιότητες μεταξύ του ενδιάμεσου φλοιού και της βαθειάς ζώνης του ηπειρωτικού φλοιού.*

νοιξης, η λιθόσφαιρα υφίσταται μια ισχυρή, ανύψωση της θερμοκρασίας. Έτσι οι μηχανικές ιδιότητες αλλάζουν και μερικοί γεωφυσικοί υποθέτουν ότι το βαθύτερο κομμάτι από τον ηπειρωτικό φλοιό μπορεί να ρέει, λόγω των προηγουμένων συνθηκών, από τις περιοχές ισχυρής πίεσης προς τις περιοχές μικρότερης πίεσης, δηλαδή προς την κατεύθυνση της ωκεανικής λιθόσφαιρας (Εικ. 4.40β). Το υποθετικό αυτό φαινόμενο χαρακτηρίστηκε στα αγγλικά με τον όρο "hot creep" (θερμικός ερπυσμός). Αν αυτή η μετατόπιση του κρυσταλλικού υλικού γίνεται στην πραγματικότητα, τότε προκαλεί μια τοπική ανύψωση της Moho κάτω από το ηπειρωτικό περιθώριο και εξαιτίας αυτού του φαινομένου πραγματοποιείται μια ισχυρή καταβύθιση στην περιοχή, με τον σχηματισμό τεκτονικών τάφρων (Εικ. 4.40β).

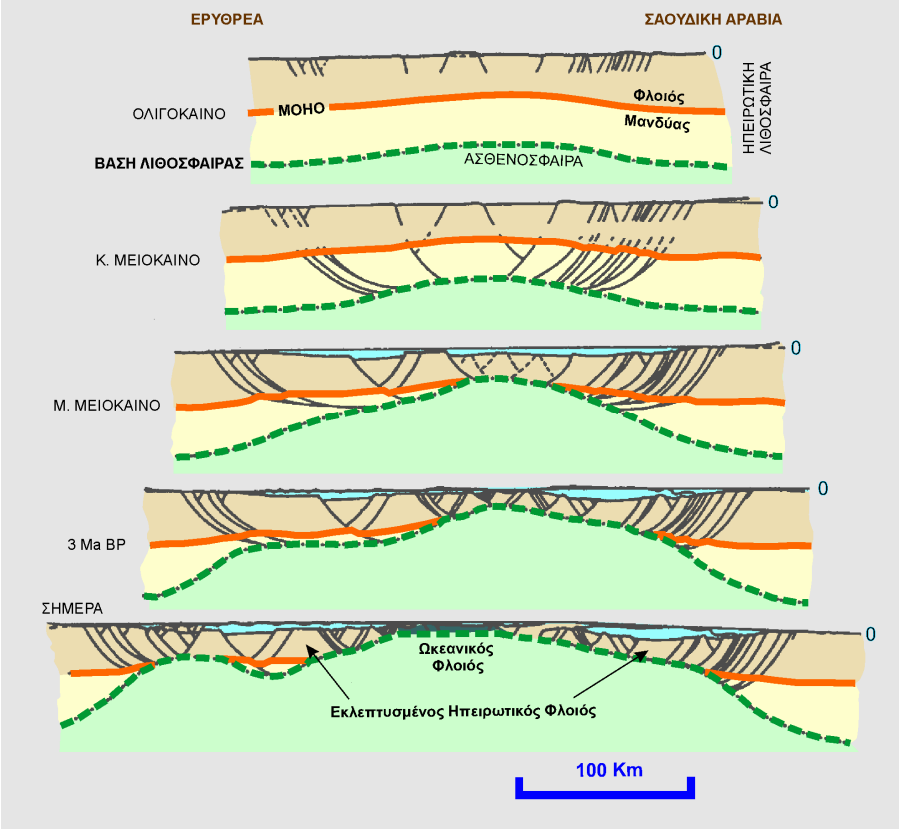
Η υπόθεση αυτή εξηγεί συγχρόνως την καταβύθιση, των σταθερών περιθωρίων, την προοδευτική εκλέπτυνση του ηπειρωτικού φλοιού προς την κατεύθυνση του ωκεανού και μερικές ομοιότητες μεταξύ του ενδιάμεσου φλοιού και της βαθειάς ζώνης του ηπειρωτικού φλοιού. Μέχρι σήμερα καμία παρατήρηση ή γεωφυσική μέτρηση δεν έχει αποδείξει το προτεινόμενο πρότυπο το οποίο έτσι παραμένει θεωρητικό·

Θα ασχοληθούμε στη συνέχεια με μια πιο "χειροπιαστή" υπόθεση, την εκλέπτυνση λόγω εφελκυσμού. Όπως αναφέρθηκε, η τεκτονική τάφρος δημιουργείται από μια ενεργό καταβύθιση στην περιοχή όπου ο ηπειρωτικός φλοιός εκλεπτύνεται κατά πολλά χιλιόμετρα, εξαιτίας της επίδρασης ενός εφελκυστικού τεκτονισμού. Απόδειξη του εφελκυστικού τεκτονισμού είναι τα κανονικά ρήγματα που πιστοποιεί κανείς στην επιφάνεια.

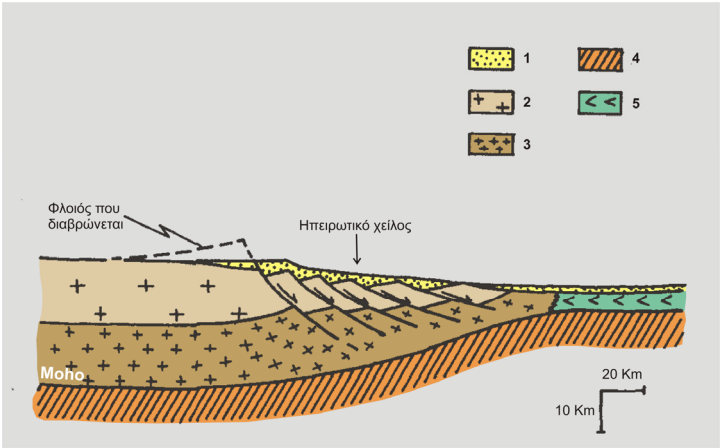
Το φαινόμενο του εφελκυσμού παίρνει μεγάλες διαστάσεις όταν αρχίζει η απόκλιση των δύο τμημάτων της ηπειρωτικής τάφρου και στη συνέχεια η ωκεανική διάνοιξη και, όπως πολλές φορές επισημάνθηκε, γίνεται περισσότερο κατανοητό μελετώντας τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σήμερα στην Ερυθρά Θάλασσα. Στην Εικόνα 4.41 δίνεται ένα μοντέλο συμμετρικού εφελκυσμού για την Ερυθρά Θάλασσα, που θα έχουμε ως οδηγό για την κατανόηση του φαινομένου.

Η προοδευτική μετανάστευση των μεγάλων τεμαχών του φλοιού κατά μήκος των λιστρικών κανονικών ρηγμάτων, που, δηλαδή, έχουν κοίλο σχήμα, εξηγεί με απλό τρόπο τη σύγχρονη προοδευτική ανύψωση της επιφάνειας της Moho, από την ήπειρο μέχρι τον πραγματικό φλοιό και την καταβύθιση των βαθιών τμημάτων του ηπειρωτικού περιθωρίου, που προκύπτουν από την εκλέπτυνση του φλοιού εξαιτίας του εφελκυσμού. Με αυτό το πρότυπο μπορούμε να εξηγήσουμε και μερικούς χαρακτήρες που παρουσιάζει ο ενδιάμεσος φλοιός όπως:

– Η συγγένειά του με τον ωκεάνιο φλοιό, αφού ο εφελκυσμός ευνοεί τη διείσδυση βασαλτικών μαγμάτων, που προέρχονται από τον ανώτερο μανδύα και τα οποία δημιουργούν τις μαγνητικές ανωμαλίες.
– Η συγγένειά του με το βαθύ ηπειρωτικό φλοιό, αφού η περιστροφή των τεμαχών του φλοιού έχει ως αποτέλεσμα να πλησιάζουν στην επιφάνεια τα βαθύτερα στρώματα του φλοιού (Εικ. 4.42), που πιθανόν έχουν σχηματιστεί από υψηλού βαθμού μεταμορφωμένα πετρώματα (κυρίως φάση γρανουλίτη). Τα γρανουλιτικά υπόβαθρα που βλέπουμε σήμερα μέσα στις πτυχωμένες οροσειρές τα θεωρούμε αποδείξεις ενός ενδιάμεσου φλοιού που αντιστοιχούν σε ένα παλαιό σταθερό ηπειρωτικό περιθώριο που έχει παραμορφωθεί εξαιτίας μιας σύγκρουσης των πλακών. Η σημασία τους είναι συγγενική με αυτή των οφιολίθων, γιατί τους οφιολίθους τους θεωρούμε υπολείμματα του ωκεάνιου φλοιού.




***Εικόνα 4.41*** *Ένα συμμετρικό μοντέλο για την εξέλιξη της Ερυθράς Θάλασσας, που δείχνει το ρόλο των λιστρικών κανονικών ρηγμάτων στη λέπτυνση του ηπειρωτικού φλοιού.*




***Εικόνα 4.42*** *Ένα μοντέλο για τη λέπτυνση του ηπειρωτικού φλοιού από εφελκυσμό στο επίπεδο των σταθερών ηπειρωτικών περιθωρίων, που ερμηνεύει και τη συγγένεια του ενδιάμεσου με το βαθύ ηπειρωτικό φλοιό, επειδή η περιστροφή των ρηξιτεμαχών φέρνει στην επιφάνεια τα βαθύτερα στρώματα του φλοιού.*

## *Η Εξέλιξη των Σταθερών Ηπειρωτικών Περιθωρίων*

Η εξέλιξη των σταθερών περιθωρίων βασίζεται στα αποτελέσματα που έδωσαν οι γεωτρήσεις, που έγιναν τις τελευταίες δεκαετίες πάνω στα σταθερά ηπειρωτικά περιθώρια ή πολύ κοντά σε αυτά. Η μελέτη των καρότων (30 γεωτρήσεων) επιτρέπει να περιγραφεί, σχηματικά η ιζηματογενής εξέλιξη των σταθερών ηπειρωτικών περιθωρίων. Οι γεωτρήσεις σπάνια έφτασαν το όριο της βάσης των ιζηματογενών στρωμάτων και έτσι η αρχή της εξέλιξης βασίζεται στη μελέτη των σημερινών ενεργών ηπειρωτικών περιθωρίων.

Κατά τη διάρκεια της εξέλιξης των περιθωρίων, που δημιουργήθηκαν εξαιτίας μιας λιθοσφαιρικής απόκλισης, διακρίνουμε 4 στάδια που είναι αντίστοιχα των σταδίων της ωκεανικής διάνοιξης. Τα 4 αυτά στάδια είναι τα εξής: το στάδιο της *Ηπειρωτικής Τάφρου*, το στάδιο της *Ερυθράς Θάλασσας*, το στάδιο του *Στενού Ωκεανού* ή της *Εσωτερικής Θάλασσας* και το στάδιο του *Ατλαντικού Ωκεανού*.

### *Το Στάδιο της Ηπειρωτικής Τάφρου*

Στο στάδιο αυτό τα προϊόντα της διάβρωσης του αναγλύφου, λόγω του σχήματος της τάφρου, μετα-

φέρονται εκτός αυτής. Μέσα στην κεντρική τάφρο αποτίθενται ιζήματα ηπειρωτικής φάσεως (ποτάμιες και λιμναίες αποθέσεις), υφαλώδους φάσεως (εβαπορίτες) ή θαλάσσιας φάσεως μικρού βάθους. Κατά τη διάρκεια της ιζηματογένεσης η τάφρος παραμένει κλειστή και το γεγονός αυτό επιτρέπει τη διατήρηση του οργανικού υλικού, που σε ορισμένες περιπτώσεις βοηθά στο σχηματισμό σαπροπηλών και πετρελαίου (Εικ. 4.43-1).

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα έχει ως αποτέλεσμα την παρεμβολή εκροών λαβών μέσα στα ιζήματα και τη δημιουργία ηφαιστειοϊζηματογενών ακολουθιών. Το πάχος των ιζημάτων που συσσωρεύονται μέσα στην τάφρο είναι της τάξης των km. Μερικές φορές η τεκτονική τάφρος είναι χωρισμένη σε δύο μέρη, όπως στην Ανατολική Αφρική (βλπ. Εικ. 4.14). Σε αυτές τις περιπτώσεις της διχασμένης τάφρου, όταν αυτή μετασχηματίζεται σε ωκεανική διάνοιξη η μια από τις δύο τάφρους γίνεται όριο των αποκλινουσών πλακών. Έτσι τα ηπειρωτικά περιθώρια, που προκύπτουν από αυτή την εξέλιξη, είναι διαφορετικά από τη μία και την άλλη πλευρά του ωκεανού. Το ένα, το απλούστερο, παρουσιάζει τη δομή μιας τεκτονικής ημιτάφρου, ενώ το άλλο, το σύνθετο, έχει επί πλέον μία τάφρο χωμένη κάτω από τα θαλάσσια ιζήματα.

*Το Στάδιο της Ερυθράς Θάλασσας*

Στο στάδιο αυτό έχει αρχίσει η απόκλιση των πλακών, με τη δημιουργία μιας στενής ζώνης ωκεανικού φλοιού μεταξύ των δύο περιθωρίων που σχηματίζονται. Η θάλασσα έχει κατακλύσει τον άξονα της λεκάνης, αλλά παραμένει στενή και επιμήκης και η επικοινωνία της με τον ανοιχτό ωκεανό είναι δύσκολη.

Οι πλευρές της ηπειρωτικής τάφρου είναι έτσι ώστε τα προϊόντα της διάβρωσης από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα να συσσωρεύονται, όπως και στο προηγούμενο στάδιο, προς τα εξωτερικά της λεκάνης (Εικ. 4.43-2). Χαρακτηριστικό παράδειγμα δεν είναι η Ερυθρά Θάλασσα, αλλά ο Νείλος, που συγκεντρώνει τα κλαστικά ιζήματα από τη βορειοανατολική Αφρική.

Στα άκρα της λεκάνης σχηματίζεται μια πρώτη κρηπίδα. Σήμερα στην Ερυθρά Θάλασσα η κρηπίδα σχηματίζεται από τους οργανισμούς που δημιουργούν τους βιογενείς ασβεστόλιθους. Στο άκρο της κρηπίδας αναπτύσσονται κοραλλιογενείς ύφαλοι, σχηματίζοντας ασβεστόλιθους που δημιουργούν ένα φράγμα. Η ηπειρωτική κατωφέρεια σχηματίζεται εξαιτίας των υφάλων, που αντισταθμίζουν την καταβύθιση του υποβάθρου. Πάνω στην ηπειρωτική κατωφέρεια δημιουργούνται μερικές φορές κατολισθήσεις, σχηματίζοντας ασβεστολιθικούς τουρβιδίτες, που συσσωρεύονται σε βαθύτερες ζώνες. Ο σχηματισμός των υφάλων και των ασβεστολιθικών πετρωμάτων, που αποτελούν τη νεοσχηματισμένη κρηπίδα, προϋποθέτουν ένα θερμό κλίμα.

Στις βαθύτερες ζώνες μετά από 1 km βάθος, τα νερά παραμένουν στάσιμα λόγω της στενότητας της λεκάνης γιατί δεν επικοινωνεί εύκολα με τον ανοικτό ωκεανό. Έτσι δημιουργείται ένα αναγωγικό περιβάλλον για την ιζηματογένεση, που επιτρέπει τη διατήρηση του οργανικού υλικού, όπου η βιολογική δράση είναι έντονη, σχηματίζοντας σαπροπηλούς και μαύρη ιλύ.

Η εξάτμιση του νερού της θάλασσας δεν αντισταθμίζεται από την άφιξη του γλυκού νερού και έτσι η περιεκτικότητα σε αλάτι αυξάνει σχηματίζοντας μερικές φορές άλμες που μένουν στάσιμες στο βάθος της λεκάνης. Αν η επικοινωνία με τον ανοικτό ωκεανό διακοπεί προσωρινά και απομονωθεί η θάλασσα, η εξάτμιση προκαλεί, το σχηματισμό εβαποριτών.

Τα ηφαιστειακά φαινόμενα που παρατηρούνται στα κράσπεδα της λεκάνης και, κυρίως, ο σχηματισμός του ωκεάνιου φλοιού στον άξονα της λεκάνης, σχετίζονται με μια υδροθερμική δραστηριότητα που εμπλουτίζει τα ιζήματα με μεταλλικά άλατα και έτσι δημιουργούνται μεταλλοφόρα στρώματα μεγάλου οικονομικού ενδιαφέροντος.

Το στάδιο της Ερυθράς Θάλασσας χαρακτηρίζεται από μια ισχυρή καταβύθιση. Ο εφελκυσμός του ηπειρωτικού φλοιού, που έχει αρχίσει από το προηγούμενο στάδιο της Ηπειρωτικής Τάφρου, συνεχίζεται σε μεγάλη έκταση. Η περιστροφή των τεμαχών του φλοιού πραγματοποιείται στα κύρια ρήγματα που τείνουν να γίνουν οριζόντια στο κάτω μέρος τους (βλπ. Εικ. 4.41). Στην επιφάνεια η κίνηση των τεμαχών αντισταθμίζεται από τους κοραλλιογενείς υφάλους (Εικ. 4.43-2), δημιουργώντας έτσι ημιτάφρους που συνολικά είναι πληρωμένες από ιζήματα.

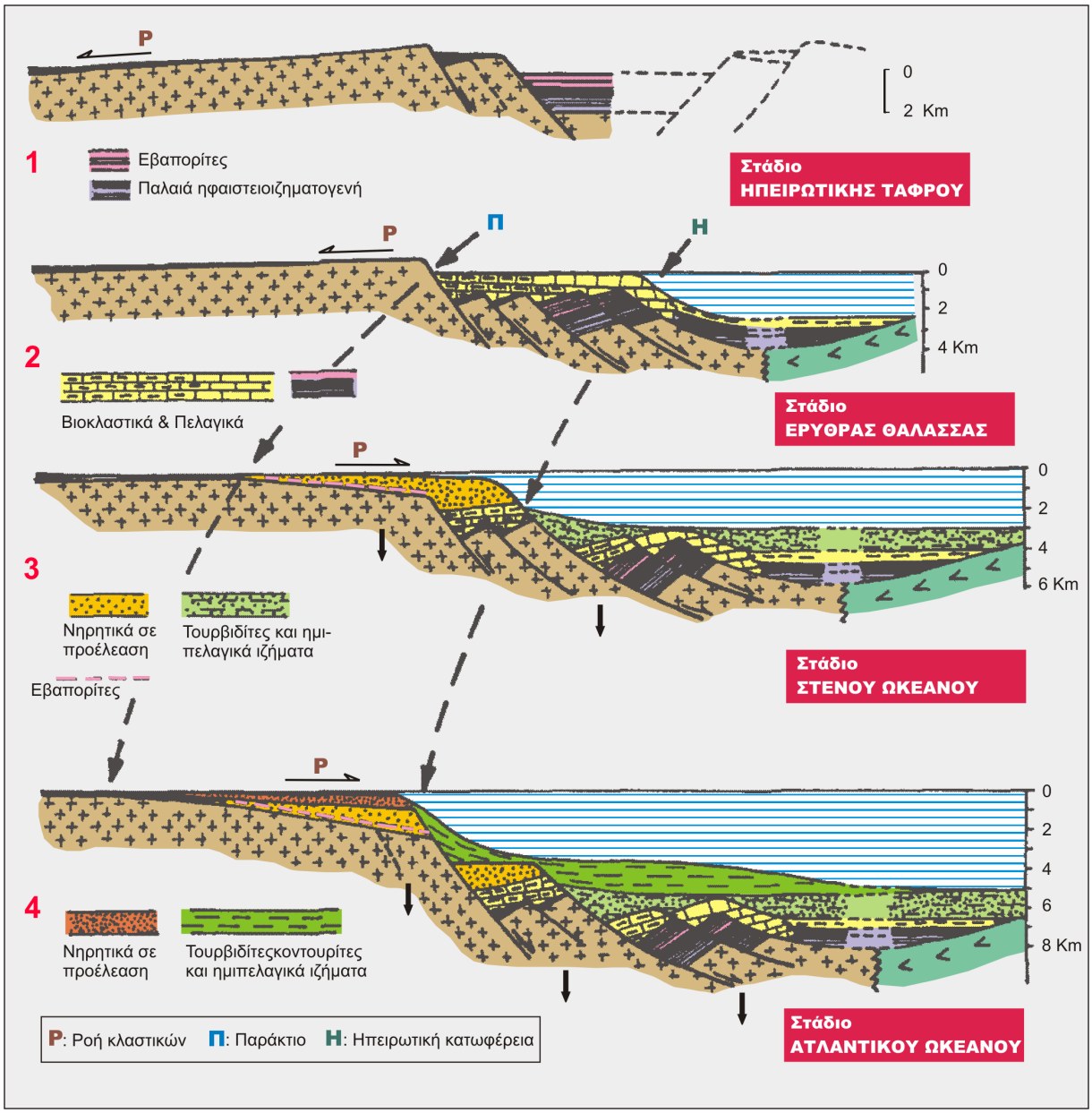
Το στάδιο αυτό της εξέλιξης των σταθερών ηπειρωτικών περιθωρίων είναι σημαντικό για το σχηματισμό των υδρογονανθράκων. Οι σαπροπηλοί και γενικά η μαύρη άργιλος, πλούσιοι σε οργανικό υλικό, είναι τα πετρελαιογενετικά στρώματα, ενώ οι ασβεστολιθικοί τουρβιδίτες, που παρεμβάλλονται μέσα στα βαθειά αυτά ιζήματα και οι ασβεστόλιθοι της κρηπίδας, αποτελούν σχηματισμούς κατάλληλους για την αποθήκευση των υδρογονανθράκων. Η καταβύθιση έχει ως αποτέλεσμα την κάλυψη των ιζημάτων από νεότερα. Τότε αυτά βρίσκονται σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που είναι ικανές για το μετασχηματισμό του οργανικού υλικού που περιέχουν, σε ρευστό ή αέριο. Οι εβαπορίτες, λόγω του βάρους των υπερκείμενων ιζημάτων, κινητοποιούνται κατά τη διάρκεια της γεωλογικής εξέλιξης του περιθωρίου και έτσι δημιουργούνται διαπειρικές δομές, πολύ ευνοϊκές για τον σχηματισμό κοιτασμάτων υδρογονανθράκων.

*Το Στάδιο του Στενού Ωκεανού ή της Εσωτερικής Θάλασσας*

Σε αυτό το στάδιο έχουν εξαλειφθεί τα χείλη της ηπειρωτικής τάφρου και έτσι δεν υπάρχει μορφολογικό φράγμα, όπως στο προηγούμενο στάδιο. Η θάλασσα κατακλύζει τα σκέλη της παλαιάς τάφρου, που ήταν αναδυμένα στο προηγούμενο στάδιο, γιατί η ωκεανική διάνοιξη απομακρύνει τα περιθώρια, τα οποία ψύχονται και καταβυθίζονται.

Η εξαφάνιση του μορφολογικού φράγματος δεν εμποδίζει πια τα κλαστικά ιζήματα και έτσι αυτά συσσωρεύονται στη θαλάσσια λεκάνη (Εικ. 4.43-3). Οι βαθύτερες ζώνες καλύπτονται από τουρβιδίτες που εναλλάσσονται με πελαγικά ιζήματα. Η θάλασσα είναι γενικά ακόμα στενή και το περιβάλλον ιζηματογένεσης παραμένει σχετικά κλειστό και έτσι τα στοιχεία της οργανικής προέλευσης, που αποτίθενται, διατηρούνται. Βρίσκονται διαλελυμένα μέσα στις κλαστικές αποθέσεις, αλλά το πετρελαιογενετικό δυναμικό των ιζημάτων είναι μικρότερο από το προηγούμενο στάδιο της Ερυθράς Θάλασσας. Σχηματίζεται μαύρη ιλύς, που η προέλευση και οι συνθήκες απόθεσης της είναι διαφορετικές από το προηγούμενο στάδιο. Τα οργανικά υλικά αυξάνονται σημαντικά, όταν τα κλαστικά υλικά προέρχονται από την ήπειρο και περιέχουν κομμάτια φυτικής προέλευσης.

Η επίκλυση που καλύπτει τα σκέλη της ηπει-




***Εικόνα 4.43*** *Τα τέσσερα κύρια στάδια εξέλιξης ενός σταθερού ηπειρωτικού περιθωρίου.*

ρωτικής τάφρου, στην αρχή του σταδίου του Στενού Ωκεανού, συνοδεύεται μερικές φορές από απόθεση εβαποριτών. Οι εβαπορίτες αυτοί διακρίνονται ευκρινώς από τούς εβαπορίτες των προηγούμενων σταδίων εξέλιξης. Οι παλαιότεροι εβαπορίτες βρίσκονται στις βαθιές λεκάνες των σταθερών περιθωρίων, ενώ αυτοί που σχηματίζονται κατά το στάδιο του Στενού Ωκεανού, που είναι και νεότεροι, βρίσκονται στη βάση των ιζημάτων της κρηπίδας.

Μετά την ενδεχόμενη απόθεση των εβαποριτών σχηματίζεται η κρηπίδα με τη διαδικασία της προώθησης. Λόγω της κάλυψης του ηπειρωτικού άκρου, αυτό διαβρώνεται κατά τα στάδια της Ηπειρωτικής Τάφρου και της Ερυθράς Θάλασσας και τα νηριτικά ιζήματα σχηματίζουν ένα πρίσμα, που το πάχος του αρχικά αυξάνει με μεγάλη ταχύτητα, ενώ αργότερα η ταχύτητα μικραίνει όσο ελαττώνεται η καταβύθιση. Δημιουργείται έτσι ένα ιζηματογενές κάλυμμα μονοκλινικής δομής, γιατί η κάλυψη του κρυσταλλικού υποβάθρου είναι μεγαλύτερη στην ωκεανική πλευρά απ' ότι στην ηπειρωτική.

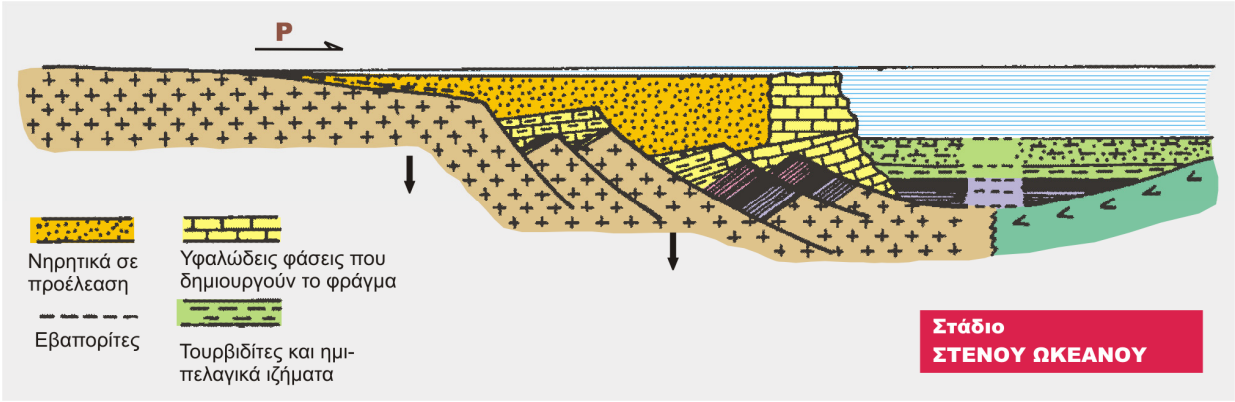
Σε πολλές περιπτώσεις, όπως π.χ. στα περιθώρια του Ανατολικού Ατλαντικού, οι οργανισμοί που ήταν υπεύθυνοι για τη δημιουργία της κρηπίδας στο στάδιο της Ερυθράς Θάλασσας, εξαφανίζονται κατά τη διάρκεια του σταδίου αυτού, πιθανόν εξαιτίας της άφιξης του κλαστικού υλικού που αποτελεί δυσμενή παράγοντα για αυτούς.

Οι κοραλλιογενείς ύφαλοι δεν αντισταθμίζουν πλέον την καταβύθιση και η αρχική κρηπίδα κάμπτεται και καλύπτεται από τουρβιδίτες (Εικ. 4.43-3). Κατά την εξέλιξη αυτή δημιουργείται μία οπισθοδρόμηση της ηπειρωτικής κατωφέρειας, που προκαλείται από τη βύθιση του εξωτερικού τμήματος της κρηπίδας. Έτσι η καταβύθιση λόγω εφελκυσμού (βύθιση και περιστροφή κρυσταλλικών τεμαχών), δεν είναι σταθεροποιημένη ακόμα σε αυτό το στάδιο της εξέλιξης των σταθερών περιθωρίων. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως π.χ. στα περιθώρια του Ατλαντικού Ωκεανού προς την πλευρά των Η.Π.Α., οι κοραλλιογενείς ύφαλοι συνεχίζουν την ανάπτυξη τους και κατά το στάδιο του Στενού Ωκεανού (Εικ. 4.44).

Τα κυριότερα κοιτάσματα υδρογονανθράκων που βρίσκονται κοντά στις αποτιθέμενες σειρές κατά τα στάδια της Ηπειρωτικής Τάφρου και της Ερυθράς Θάλασσας, δε βρίσκονται στα ίδια μέρη όταν εξετάζουμε ένα περιθώριο αμερικανικού τύπου (Εικ. 4.44) και ένα ευρωπαϊκού τύπου (Εικ. 4.43). Στην περίπτωση των περιθωρίων αμερικανικού τύπου οι παραγωγικές γεωτρήσεις πετρελαίου μπορούν να γίνουν πάνω στην σημερινή κρηπίδα, ενώ στα περιθώρια του ευρωπαϊκού τύπου πρέπει να γίνουν σε πολύ μεγαλύτερα βάθη, στους πρόποδες της σημερινής ηπειρωτικής κατωφέρειας (γεγονός που αυξάνει πολύ τις τεχνικές δυσκολίες).

Η ηπειρωτική κατωφέρεια στο στάδιο του Στενού Ωκεανού παίζει ένα σπουδαίο και πολλαπλό ιζηματογενετικό ρόλο, που εξαρτάται από τις περιοχές και το βάθος και μπορεί να είναι:

– Μια ζώνη διαμετακόμισης. Τα τουρβιδιτικά ρεύματα ακολουθούν τα Canyon πριν αποθέσουν το φορτίο τους πάνω στα χείλη ή μέσα στις βαθιές ωκεάνιες λεκάνες.
– Ένα μέτωπο προώθησης, όταν η ιζηματογενής κατωφέρεια της κρηπίδας αναπτύσσεται γρήγορα προς τα ανοικτά.
– Ένας τόπος μιας πολύ αργής πελαγικής ιζηματογένεσης, αν δεν υπάρχει τροφοδοσία κλαστικών υλικών. Σε αυτή την περίπτωση αποτίθενται οι




***Εικόνα 4.44*** *Εναλλακτικό μοντέλο για το στάδιο του Στενού Ωκεανού, στην περίπτωση που δημιουργείται ένα φράγμα από κοραλλιογενείς υφάλους στο άκρο της κρηπίδας, όπως π.χ. στα δυτικά περιθώρια του Ατλαντικού Ωκεανού.*

γνωστές συμπυκνωμένες σειρές ή στρώματα συμπυκνώσεως, που χαρακτηρίζονται από μεγάλο στρωματογραφικό εύρος και μικρό πάχος.
– Μια ζώνη διάβρωσης, όταν η γενική κλίση του πυθμένα αυξάνει κατά τη διάρκεια της καταβύθισης, μέχρις ότου γίνει πολύ μεγάλη για τη σταθερότητα των ιζημάτων.

Στο στάδιο του Στενού Ωκεανού, η φόρτιση που οφείλεται στο νερό της θάλασσας (βάθυνση), και στα ιζήματα, μπορεί να προκαλέσει μια κινητοποίηση των εβαποριτών που είχαν αποτεθεί σε προηγούμενα στάδια και την εμφάνιση διαπειρικών παραμορφώσεων, που προσβάλλουν τα βαθύτερα μέρη του περιθωρίου.

*Το Στάδιο του Ατλαντικού Ωκεανού*

Στο τελευταίο στάδιο της εξέλιξης ο ωκεανός είναι πολύ ανοικτός και η έκταση του πολύ μεγάλη, ώστε να μπορούν να παρουσιάζονται κλιματικές διαφορές. Οι πηγές ψυχρού νερού (περιοχές κοντά στους πόλους), προκαλούν μια κυκλοφορία του νερού, που αλλάζει τελείως τις συνθήκες ιζηματογένεσης. Τα νερά στο βάθος ανανεώνονται από τη βύθιση του ψυχρού και πυκνού νερού, που είναι αρκετά οξυγονωμένο και τα οργανικά υλικά καταστρέφονται συνήθως από την οξείδωση.

Επίσης τα ρεύματα βάθους μπορούν να πάρουν και να μεταφέρουν τα ιζηματογενή στοιχεία σε μεγάλες αποστάσεις. Έτσι σε μερικές περιοχές γίνεται μια διάβρωση, ή στερούνται προσφοράς ιζημάτων για μια μεγάλη χρονική περίοδο, ενώ άλλες αυξάνουν πολύ το ποσοστό ιζηματογένεσης, γιατί εκεί τα ρεύματα επιβραδύνονται και αποθέτουν το φορτίο τους.

Η συσσώρευση των ιζημάτων γίνεται κυρίως πάνω στα ηπειρωτικά χείλη (Εικ. 4.43-4), που δέχονται όχι μόνο τους τουρβιδίτες, αλλά και το μεγαλύτερο μέρος του στερεού φορτίου των ρευμάτων βάθους. Σχηματίζονται έτσι ιζήματα πολύ λεπτοστρωματώδη (conturites), που η κάθε στρώση αποτελείται από ιζηματογενή στοιχεία, καλά ταξινομημένα κοκκομετρικά, που είναι αποτέλεσμα των ρευμάτων βάθους. Κατά περιπτώσεις παρατηρείται μια κανονική, ή ανάστροφη κοκκομετρική ταξιθέτηση, ανάλογα με την επιβράδυνση ή την επιτάχυνση των ρευμάτων.

Τα ιζήματα μεταφέρονται στον πυθμένα των ωκεανών από τους τουρβιδίτες, αλλά ξαναπαίρνονται αμέσως από τα ρεύματα βάθους, που ακολουθούν συνήθως διαφορετικές κατευθύνσεις από τα τουρβιδιτικά ρεύματα και ως προνομιούχες θέσεις απόθεσης είναι τα ηπειρωτικά χείλη. Η θερμική καταβύθιση των περιθωρίων σε αυτό το στάδιο της εξέλιξης είναι επιβραδυνόμενη.

Η κρηπίδα, της οποίας το υπόβαθρο δεν κάμπτεται αλλά έχει σταθεροποιηθεί, υφίσταται την επίδραση των επικλύσεων και αποσύρσεων ευστατικής προέλευσης, που δημιουργείται είτε από κλιματικές αλλαγές (μεγάλοι παγετώνες), είτε από τις μεταβολές στο ρυθμό της ωκεανικής διάνοιξης (μια γρήγορη διάνοιξη στον άξονα των ράχεων, προκαλεί ένα φούσκωμα των ωκεανικών πυθμένων, που έχει ως συνέπεια την επίκλυση της θάλασσας προς τα ηπειρωτικά).

Η προώθηση εξαρτάται από την προσφορά ιζημάτων. Η ηπειρωτική κατωφέρεια στα περιθώρια που έχουν μεγάλο πάχος ιζημάτων, μετατρέπεται σε μια ιζηματογενή κλιτύ, ενώ στα περιθώρια που έχουν μικρό πάχος ιζημάτων, σχηματίζονται στην ηπειρωτική κατωφέρεια στρώματα συμπυκνώσεως ή πραγματοποιείται διάβρωση.

Η ανάπτυξη του ηπειρωτικού χείλους εξαρτάται πολύ από την κατάστασή του μέσα στους ωκεανούς. Για παράδειγμα το αμερικανικό περιθώριο του Ατλαντικού ωκεανού δέχεται πιο πολλά ιζήματα από τα ρεύματα βάθους.

Ο διαπειρισμός, που είχε αρχίσει κατά τη διάρκεια του προηγουμένου σταδίου, συνεχίζεται και σ' αυτό το στάδιο εξαιτίας του βάρους των ιζημάτων που συσσωρεύονται πάνω στο χείλος. Λόγω της φύσης των εβαποριτών και άλλων πλαστικών στρωμάτων που βρίσκονται στη βάση των ιζηματογενών σειρών των σταθερών περιθωρίων, διευκολύνεται η αποκόλληση του ιζηματογενούς καλύμματος και η ολίσθηση και παραμόρφωσή του λόγω βαρύτητας. Οι εφελκυστικές δομές που αναπτύσσονται προς τα πάνω από αυτό το φαινόμενο, δημιουργούν τάφρους ή ημιτάφρους, που γεμίζουν με ιζήματα και έχουν σε πολλές θέσεις περιγραφεί. Αντίθετα δομές συμπίεσης, που θα έπρεπε να αναπτύσσονται στο κάτω μέρος (στους πρόποδες της κατωφέρειας στο επίπεδο του χείλους), δεν έχουν παρατηρηθεί.

## *Η Εξέλιξη της Κρηπίδας των Σταθερών Περιθωρίων*

Είναι γνωστό ότι το ανώτερο όριο της κρηπίδας αποτελεί η παραλία, η οποία όμως έχει μια πρόσκαιρη γεωλογική σημασία, γιατί οι παράκτιες αναδυμένες περιοχές ανήκουν στην κρηπίδα και ως προς τη δομή τους και ως προς την ιζηματολογική τους εξέλιξη. Το κατώτερο όριο, που έχει γεωμορφολογική σημασία, βρίσκεται πολύ συχνά σε ένα βάθος 180 μέτρων περίπου, ή μερικές φορές λιγότερο (120-130 μέτρα στη Μεσόγειο) και άλλες φορές περισσότερο (μέχρι 500 μέτρα).

Η έκταση της κρηπίδας ποικίλλει πολύ. Είναι μικρή έως πολύ μικρή κατά μήκος των ορεινών ακτών, ενώ γίνεται πολύ μεγάλη στις υφαλώδεις

ακτές. Η μέση παγκόσμια τιμή είναι 70-80 χιλιόμετρα πλάτος. Οι διαφορές αυτές εξαρτώνται από την εξέλιξη των περιθωρίων. Οι στενές κρηπίδες που βρίσκονται στις περιοχές με απότομο ανάγλυφο, ανήκουν γενικά στα νέα περιθώρια (στάδιο Ερυθράς Θάλασσας), ή στα ανανεωμένα περιθώρια, δηλαδή σε αυτά που έχουν υποστεί μια πρόσφατη τεκτονική παραμόρφωση. Αντίθετα οι πλατιές κρηπίδες ανήκουν σε ένα στάδιο εξέλιξης πιο προχωρημένο, όπως το στάδιο του Στενού Ωκεανού ή του Ατλαντικού Ωκεανού.

*Τα Νηριτικά Ιζήματα*

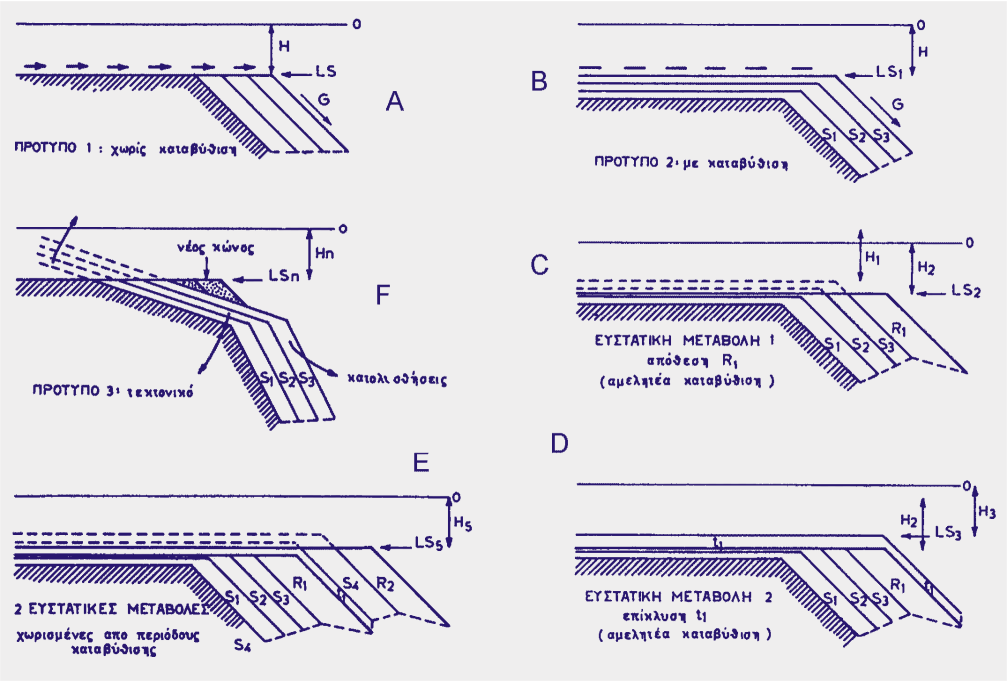
Η κρηπίδα λόγω της θέσης της είναι ο καταλληλότερος τόπος που πολλαπλασιάζονται οι οργανισμοί. Το μικρό βάθος επιτρέπει τη διείσδυση του φωτός, που είναι απαραίτητο για τους χλωροφυλλικούς οργανισμούς. Η παρακείμενη ήπειρος είναι η κύρια πηγή τροφοδοσίας των αναγκαίων φωσφορικών και νιτρικών αλάτων για τη βιολογική δράση. Η αναταραχή του νερού επιτρέπει μια καλή και μόνιμη οξυγόνωση του μέσου. Έτσι η περιοχή της κρηπίδας είναι πολύ ευνοϊκή για βιοκλαστικά ιζήματα. Στα θερμά και εύκρατα κλίματα παράγονται ανθρακικά ιζήματα (κυρίως ασβεστόλιθοι) ενώ στα ψυχρά η ανθρακική ιζηματογένεση είναι περιορισμένη και η βιογενής ιζηματογένεση γίνεται περισσότερο πυριτική (σχηματισμός διατομών).

Στην κρηπίδα δημιουργείται πολλές φορές μια υποθαλάσσια διάβρωση, που καταστρέφει παλαιότερα ιζήματα (ασβεστόλιθους), ή σχετικά πιο πρόσφατα (τεταρτογενείς αποθέσεις) και τα επαναϊζηματοποιεί. Τα κλαστικά ιζήματα προέρχονται από τη διάβρωση των αναδυμένων περιοχών. Έτσι αποτίθενται π.χ. πηλίτες πολύ ή λίγο ανθρακικοί (οι οποίοι γίνονται στη συνέχεια μάργες), ή πυριτικοί άμμοι κατά την υδροδυναμική ενέργεια του μέσου. Τα αυτόχθονα ιζήματα (φωσφορίτες, γλαυκονίτες κλπ.), σχηματίζονται πάνω στο βυθό από τις διαλελυμένες ουσίες που περιέχει το θαλασσινό νερό. Τελικά οποιαδήποτε και αν είναι η προέλευση των ιζημάτων όλα χαρακτηρίζονται ως νηριτικά.

*Η Προώθηση της Κρηπίδας*

Με τον όρο προώθηση εννοούμε την επέκταση της κρηπίδας προς τα ανοιχτά, λόγω διαδοχικών ιζηματογενών προσφορών στο μέτωπό της (Εικ. 4.45). Οι παράγοντες που καθορίζουν το φαινόμενο αυτό είναι πέντε:

1. Το βάθος Η της σταθερότητας LS των τεμαχιδίων. Για μια δεδομένη κοκκομετρική τάξη (π.χ. τέλειοι άμμοι), το βάθος αυτό ποικίλλει ανάλογα με τις θάλασσες και τις τοπικές συνθήκες. Δηλαδή εξαρτάται από τη σπουδαιότητα των ρευμάτων στην παλίρροια, από τη μορφή της ακτής και το γεωγραφικό πλάτος. Αρχικά το Η μεταβάλλεται, όπως μεταβάλλεται το βάθος της κρηπίδας. Όταν τα τεμαχίδια βρίσκονται σε μικρότερο βάθος από το Η, παραμένουν κινούμενα και μεταφέρονται προς τον ωκεανό ακολουθώντας τη γραμμή της μεγαλύτερης κλίσης. Αντίστροφα, όταν τα ίδια τεμαχίδια βρίσκονται σε βάθος μεγαλύτερο από το Η, σταθεροποιούνται σχηματίζοντας ένα στρώμα ψηλά στην ηπειρωτική κατωφέρεια. Για απλο-




***Εικόνα 4.45*** *Τα στάδια και οι διαδικασίες που καθορίζουν την προώθηση της κρηπίδας.*

ποίηση το Η θεωρείται σταθερό στην Εικόνα 4.45.

2. Όταν η καταβύθιση της κρηπίδας είναι σχεδόν μηδενική, η ιζηματογένεση είναι πολύ μικρή πάνω στην κρηπίδα και αντίθετα βοηθάει σε μια γρήγορη προώθηση της κρηπίδας προς τα ανοιχτά με την απόθεση των στρωμάτων $S_1$, $S_2$ και $S_3$ (Εικ. 4.45A). Η κοκκομετρία G των αποτιθεμένων τεμαχιδίων ελαττώνεται με το βάθος. Αντίθετα, όταν το περιθώριο καταβυθίζεται, το βάθος Η παραμένει σταθερό, γιατί η καταβύθιση αντισταθμίζεται από την απόθεση των ιζημάτων πάνω στη κρηπίδα (Εικ. 4.45B). Η προώθηση της κρηπίδας είναι τότε πιο αργή, αφού ένα μέρος των ιζημάτων δεν φτάνει στο άκρο της.
3. Οι απόλυτες μεταβολές της στάθμης της θάλασσας παίζουν ρόλο στην προώθηση της κρηπίδας. Όταν το βάθος του νερού ελαττωθεί από ένα ευστατισμό, προκαλείται μία σημαντική διάβρωση πάνω στην κρηπίδα, που οδηγεί στην αποκατάσταση του βάθους Η (Εικ. 4.45C). Το διαβρούμενο υλικό δημιουργεί ένα παχύ στρώμα $R_1$ που αυξάνει προς τα ανοιχτά. Αντίστροφα, αν το βάθος της θάλασσας αυξάνει, τότε δημιουργείται πάνω στην κρηπίδα ένα παχύ στρώμα, ενώ στην κατωφέρεια το δημιουργούμενο στρώμα είναι σχετικά λεπτό. Έτσι ξαναποκαθίσταται το βάθος Η (Εικ. 4.45D). Τις περισσότερες φορές η καταβύθιση και ο ευστατισμός μπορεί να συνυπάρχουν.
4. Οι τεκτονικές κινήσεις παίζουν σπουδαίο ρόλο. Η Εικόνα 4.45F δείχνει το αποτέλεσμα από μια μετακίνηση με περιστροφή. Το μέρος της κρηπίδας που ανυψώνεται, το πιο κοντινό προς την ακτή, διαβρώνεται, ενώ δημιουργείται ένα νέο πρίσμα προώθησης πάνω από το τμήμα που κάμπτεται. Η αύξηση της κλίσης της παλαιάς κλιτύος $S_1$-$S_3$ μπορεί να προκαλέσει καταπτώσεις που ανανεώνουν την ηπειρωτική κατωφέρεια. Τέτοιες κινήσεις προκαλούνται από τοπικές παραμορφώσεις του περιθωρίου.
5. Η σημασία των προσφερομένων ιζημάτων, τέλος, παίζει σπουδαίο ρόλο. Η έκταση της προώθησης εξαρτάται από την ποσότητα των προσφερομένων ιζημάτων στην κρηπίδα. Αν δεν έχουμε καμία σημαντική κλαστική προσφορά, είτε επειδή η ήπειρος δε διαβρώνεται, είτε επειδή η ροή των κλαστικών υλικών εκτρέπεται προς το χείλος από τα Canyons, η προώθηση της κρηπίδας είναι πολύ αργή ή μηδενική και πάνω στην κρηπίδα αποτίθεται ένα λεπτό στρώμα από πελαγικά ιζήματα. Αντίθετα η προώθηση είναι πολύ σημαντική αν έχουμε μεγάλη προσφορά ιζημάτων, όπως στα παχιά περιθώρια. Σε αυτή την περίπτωση η κρηπίδα αναπτύσσεται προς τα έξω, καθ' όλη τη διάρκεια της γεωλογικής ιστορίας του περιθωρίου. Το εξωτερικό της μέρος μπορεί να κάθεται πάνω στον ενδιάμεσο φλοιό, είτε πάνω στον ωκεάνιο φλοιό.

*Η Ανάδυση της Κρηπίδας*

Όταν αναδύεται η κρηπίδα, τότε εξασκούνται οι παράγοντες της διάβρωσης και της χερσαίας ιζηματογένεσης. Καταβυθισμένη εκ νέου, αποτυπώνει τα ίχνη της απόσυρσης μέσα στα ιζήματα αλλά και τη μορφολογία της (ποτάμιες κοιλάδες γεμάτες με ιζήματα, καρστικές κοιλότητες, παγετώδεις αύλακες κλπ.).

Η ανάδυση της κρηπίδας διευκολύνει τη λιθοποίηση των ιζημάτων. Στην περίπτωση μιας απόσυρσης στα ανθρακικά πετρώματα που έχουν αποτεθεί, κυκλοφορεί κατακόρυφα φρεάτιο νερό και τα συνδέει, επειδή καθιζάνουν τα διαλελυμένα ανθρακικά άλατα. Έτσι δημιουργείται ένα είδος στρώματος που σχηματίζει γωνία με τη στρώση και καλύπτει τα ιζήματα που είναι μάλλον συνεκτικοποιημένα, αλλά όχι συνδεδεμένα σε συνδετικό υλικό. Όταν ξαναγίνει επίκλυση, το χείλος του στρώματος αυτού σχηματίζει ένα δόντι, γιατί αντιστέκεται στους παράγοντες της διάβρωσης. Συμπερασματικά οι κρηπίδες μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες:

- στις κρηπίδες που σχηματίζονται από τη σύγχρονη ιζηματογένεση (Εικ. 4.45B), που ανήκουν γενικά σε νέα και καταβυθιζόμενα περιθώρια, ή ανανεωμένα από τεκτονικές κινήσεις και,
- στις κρηπίδες που διαβρώνονται και ανήκουν αντίθετα σε παλαιά περιθώρια όπου η καταβύθιση έχει σχεδόν τελείως σταματήσει (Εικ. 4.45A).

## *Η Εξέλιξη της Ηπειρωτικής Κατωφέρειας των Σταθερών Περιθωρίων*

Η ηπειρωτική κατωφέρεια δεν έχει παντού την ίδια κλίση. Η μέση παγκόσμια τιμή της είναι $4^o$ και 17΄ (στον Ειρηνικό Ωκεανό, που κυριαρχούν τα ενεργά περιθώρια είναι $5^o$ και 20΄, στον Ατλαντικό, που ανήκουν τα ώριμα σταθερά περιθώρια $3^o$ και 05΄ και στα ανοιχτά των υποθαλάσσιων δέλτα οι κλίσεις είναι μικρές της τάξης της 1° και 20΄). Το όριο της ηπειρωτικής κατωφέρειας και του χείλους βρίσκεται γενικά σε ένα βάθος 3.000-4.000 μέτρων περίπου και μερικές φορές ψηλότερα.

*Τα Υποθαλάσσια Canyons*

Σε πολλές περιοχές της γήινης σφαίρας η ηπειρωτική κατωφέρεια είναι σκαμμένη από υποθαλάσσιες κοιλάδες, τα διάσημα "canyons", των οποίων η φύση και η προέλευση αποτέλεσαν ένα από τα μεγα-

λύτερα προβλήματα της γεωλογίας και της υποθαλάσσιας γεωμορφολογίας. Τα υποθαλάσσια canyons μπορεί να είναι βυθισμένες ηπειρωτικές κοιλάδες ή δομές που δημιουργήθηκαν από υποθαλάσσια διάβρωση.

Στις βυθιζόμενες κοιλάδες η μορφολογία δείχνει χωρίς καμία αμφιβολία ότι έχουν διαμορφωθεί από εναέριους παράγοντες. Μερικοί γεωλόγοι υποστηρίζουν την άποψη ότι μια τεράστια αποχώρηση της θάλασσας έφερε στον ελεύθερο αέρα ολόκληρη την ηπειρωτική κατωφέρεια και μια διάβρωση από τους χείμαρρους δημιούργησε τις κοιλάδες. Άλλοι, αντίθετα, υποστηρίζουν ότι λόγω τεκτονικών μηχανισμών προκλήθηκε μια προοδευτική βύθιση της ηπείρου και του υδρογραφικού της δικτύου.

Οι κοιλάδες που οφείλονται σε υποθαλάσσια διάβρωση τοποθετούνται κοντά στις μεγάλες τεκτονικές ρηξιγενείς επιφάνειες. Μέσα στη θάλασσα, όπως και στη χέρσο, η διάβρωση διευκολύνεται εκεί που τα πετρώματα έχουν ελαττωμένη αντίσταση, για λόγους τεκτονικούς ή λιθολογικούς. Οι διαρρήξεις και όλες οι τεκτονικές ρηξιγενείς επιφάνειες προκαλούν τοπικά το σπάσιμο των πετρωμάτων, τα οποία σε αυτό το μέρος διαβρώνονται πολύ πιο εύκολα από τις άλλες θέσεις.

Τα τουρβιδιτικά ρεύματα έχουν μια διαβρωτική δύναμη και ακλουθούν ακριβώς τα υποθαλάσσια canyons, μέσα στις κοίτες των οποίων προκαλούν συχνά το σπάσιμο των υποθαλάσσιων τηλεφωνικών καλωδίων. Το γεγονός ότι οι κοιλάδες δεν είναι γεμάτες από ιζήματα, δείχνει ότι τα τουρβιδιτικά ρεύματα είναι ικανά να ξαναπαίρνουν τα κινητά ιζήματα και να συντηρούν τα canyons, τα οποία χωρίς αμφιβολία είναι ένας σημαντικός τόπος ιζηματογενούς διαμετακόμισης.

Η σεισμικότητα είναι συνδεδεμένη με τις ενεργές ρηξιγενείς επιφάνειες και έτσι διευκολύνονται όλες οι διαδικασίες κυλίσματος και διάβρωσης μέσα στα Canyons.

*Τα Φράγματα και τα Περιθωριακά Plateaus*

Μερικές φορές η ηπειρωτική κατωφέρεια παρουσιάζει απότομες κλίσεις και ενδιάμεσες τραπεζοειδείς επιφάνειες, που τοποθετούνται σε βάθη από 500-4.000 μέτρα. Αυτά τα ανάγλυφα ονομάζονται "περιθωριακά plateaus".

Μερικά από αυτά αντιστοιχούν σε τεκτονικά κέρατα, που δημιουργήθηκαν κατά τη στιγμή της ταφροποίησης. Οι υψηλές περιοχές, που βρίσκονται μεταξύ των τεκτονικών τάφρων, σχημάτιζαν μεγάλα ανάγλυφα που δεν εξαλείφθηκαν από τη μεταγενέστερη καταβύθιση του περιθωρίου, αλλά βυθίστηκαν μαζί με τις λεκάνες που τα πλαισιώνουν. Αρχικά καλύφτηκαν από νηριτικά ιζήματα και στη συνέχεια από πελαγικές ή ημι-πελαγικές αποθέσεις, όταν τα τεμάχη βυθίστηκαν αρκετά. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα περιθωριακά plateaux δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια του σταδίου της ηπειρωτικής τάφρου.

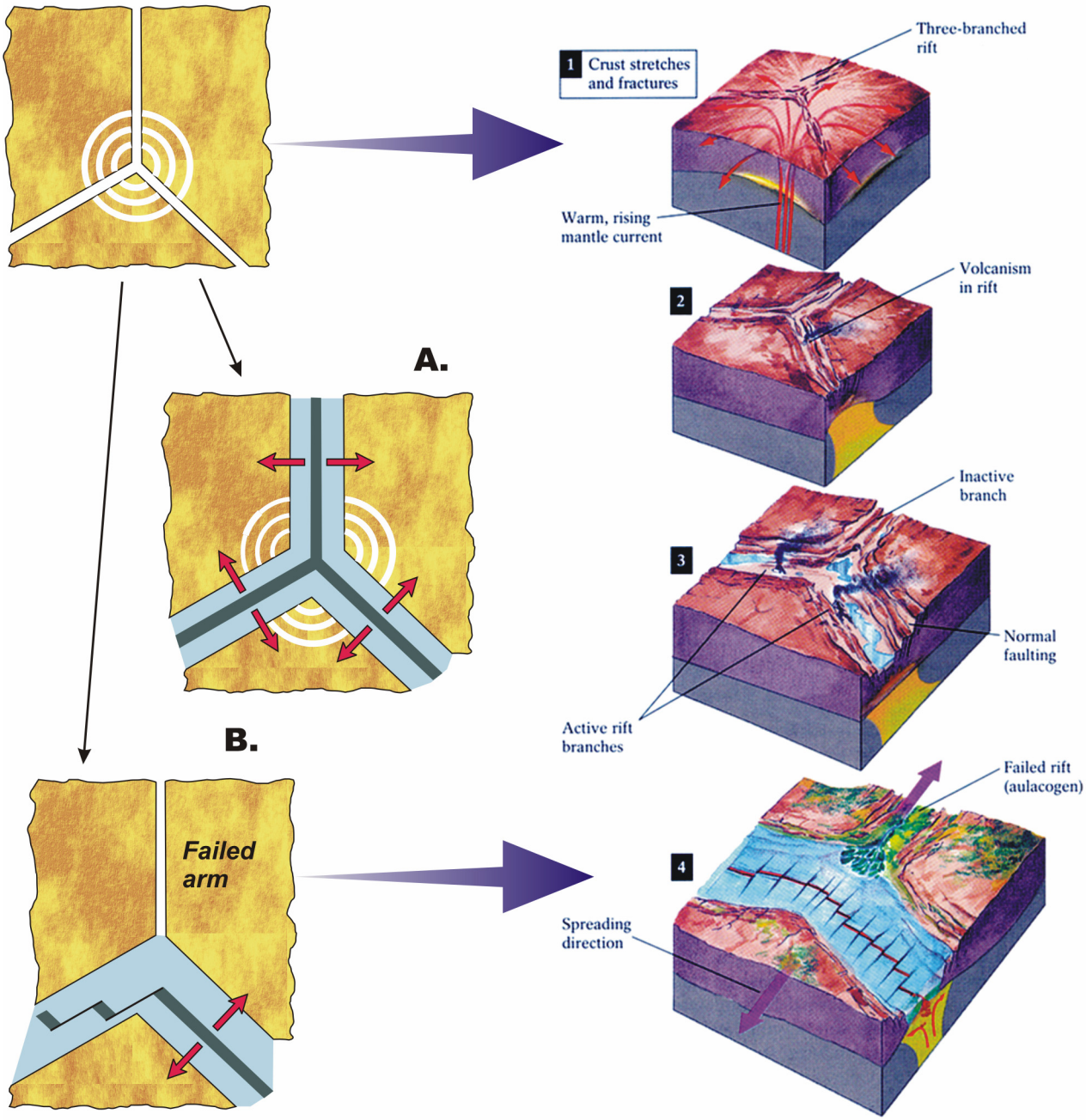
Η εκτεταμένη καταβύθιση του περιθωρίου από τη συνεχή δράση των κανονικών ρηγμάτων, κυρίως κατά τη διάρκεια των σταδίων της Ηπειρωτικής Τάφρου και της Ερυθράς Θάλασσας, αλλά επίσης και του Στενού Ωκεανού, δημιουργεί τεμάχη που περιστρέφονται και σχηματίζουν έτσι ανάγλυφο πίσω από το οποίο συσσωρεύονται ιζήματα. Το σχηματιζόμενο σύνολο από τη λεκάνη και το φράγμα, αποτελεί ένα δεύτερο τύπο περιθωριακών plateaus, νεότερο από τα προηγούμενα.

Η δημιουργία ενός φράγματος προκαλεί το σχηματισμό μιας ιζηματογενούς λεκάνης που βρίσκεται ψηλότερα από άλλες. Μερικά φράγματα αποτελούνται από κοραλλιογενείς υφάλους που αυξάνονται στα άκρα της κρηπίδας και συγκρατούν τα ιζήματα μεταξύ αυτών και της ακτής (Εικ. 4.44). Άλλα πάλι φράγματα είναι γενικά ηφαιστειακά οικοδομήματα, που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια των πρώτων σταδίων της εξέλιξης του περιθωρίου. Επίσης φράγματα δημιουργεί και ο διαπειρισμός των εβαποριτών που βρίσκονται στη βάση της ιζηματογενούς σειράς των περιθωρίων, όταν σχηματίζει ανάγλυφα (δόμοι \ τοίχοι άλατος), που παγιδεύουν τα ιζήματα.

Μερικά περιθώρια χωρίς να γίνουν ενεργά, παραμορφώνονται σε κάποιο στάδιο της ιστορίας τους και οι παλαιές δομές αναζωπυρώνονται και τα τεκτονικά κέρατα εμφανίζονται νεοσχηματισμένα, με την έννοια της γεωμορφολογίας.

## 4.7 Ωκεανός ή Αποτυχημένος Κλάδος (Failed Arm) και Αυλακογενές (Aulacogene) ?

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, η απαρχή της ηπειρωτικής ταφρογένεσης χαρακτηρίζεται από μια αναθόλωση του φλοιού και τη δημιουργία ενός δόμου. Τα μοντέλα που περιγράφησαν μέχρι τώρα παρουσιάζουν την εξέλιξη μιας ηπειρωτικής τάφρου σε μια εγκάρσια, ως προς αυτήν, τομή, που στην ουσία αντιπροσωπεύει, ένα μόνο σημείο της τάφρου. Η τάφρος όμως είναι μια μεγάλης κλίμακας επιμήκης δομή και ο ωκεανός που θα προκύψει από αυτή εκτείνεται σε κλίμακα τεκτονικών πλακών. Πως λοιπόν οργανώνεται όλο αυτό το σύστημα; Πως ξεκινάει το αρχικό σπάσιμο, κατά μήκος όλης της τάφρου; Ποιοι κλάδοι εξελίσσονται σε ωκεανό και ποιοι αποτυγχάνουν και γιατί; Αρκετά στοιχεία για την απάντηση των ερωτημάτων αυτών έχουν ήδη δοθεί στα προηγούμενα (θερμές κηλίδες – hot spots, δόμοι, σημεία τριπλής συμβολής – tri-




***Εικόνα 4.46*** *Η εξέλιξη της ταφρογένεσης που αρχίζει με μία τάφρο με τρεις κλάδους πάνω σε ένα δόμο.* ***Α.*** *Τεμαχισμός της ηπείρου σε τρία τεμάχη, και ανάπτυξη ενός σημείου τριπλής συμβολής (triple junction), τύπου RRR (Ράχη-Ράχη-Ράχη).* ***Β.*** *Τεμαχισμός της ηπείρου σε δύο τεμάχη, και σχηματισμός: i) ενός ορίου απόκλισης όπου κυριαρχεί η ράχη, ii) ενός ορίου απόκλισης με κυρίαρχα τα ρήγματα μετασχηματισμού και iii) ενός αποτυχημένου κλάδου (failed arm), η τάφρος του οποίου ξεκινάει από το κοίλο τμήμα της γωνίας που σχηματίζει το ηπειρωτικό περιθώριο. Στο διπλανό σχήμα αναπαρίσταται στις τρεις διαστάσεις η δεύτερη περίπτωση.*

ple junctions, αποτυχημένοι κλάδοι – failed arms, αυλακογενή – aulacogens κλπ.), στη συνέχεια όμως θα γίνει μια προσπάθεια σύνθεσης όλων αυτών, ώστε να γίνει κατανοητό, πως μια ολόκληρη ήπειρος σπάει κατά μήκος μιας ζώνης αρκετών χιλιάδων χιλιομέτρων, που μελλοντικά εξελίσσεται στο κέντρο διάνοιξης ενός ωκεανού και στο όριο ανάμεσα σε δύο λιθοσφαιρικές πλάκες που αποκλίνουν.

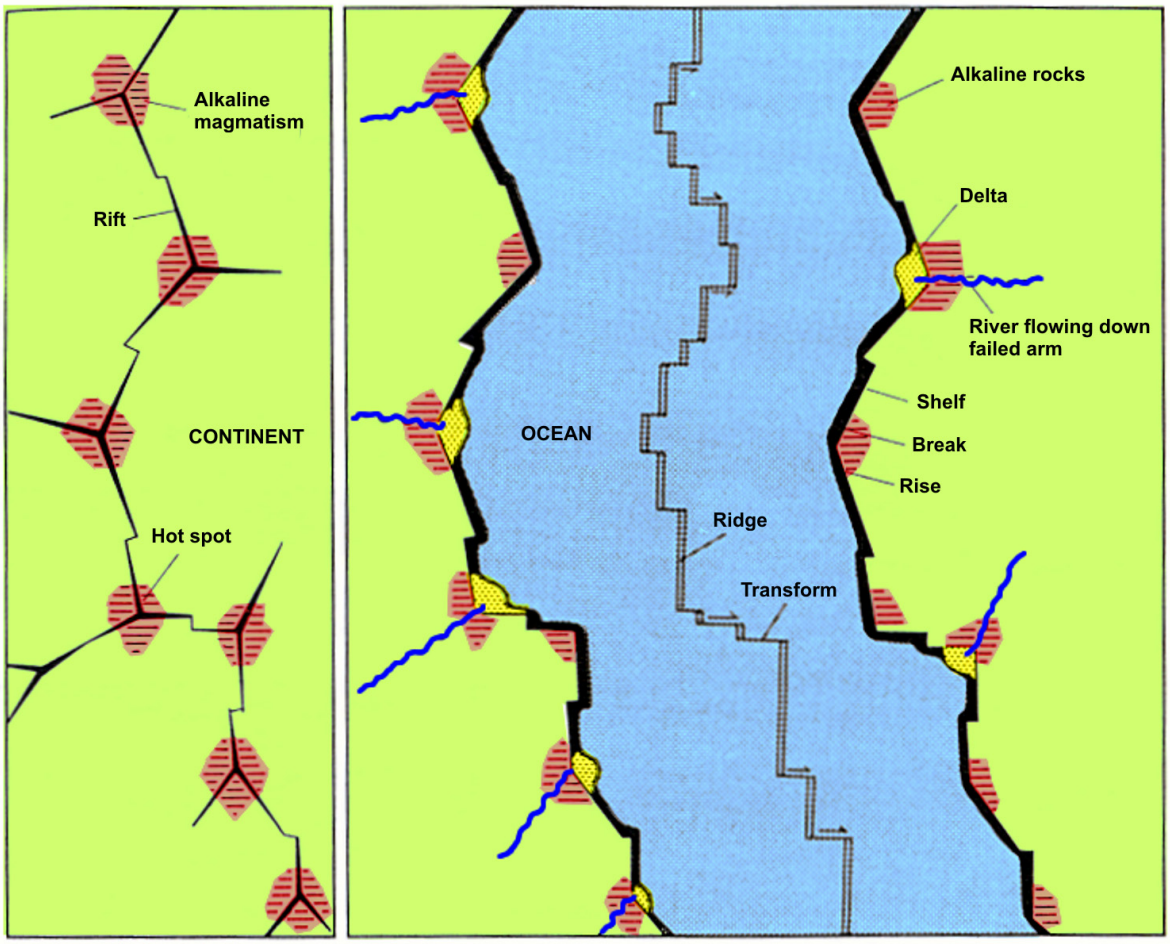
Η άνοδος του μανδύα πάνω από μια θερμή κηλίδα (hot spot) και τα ανοδικά θερμικά ρεύματα μεταφοράς (convection cells), "σπρώχνουν" και παραμορφώνουν τον υπερκείμενο φλοιό (βλπ. και Κεφ. 3.5 και 3.6). Στο πρωταρχικό στάδιο δημιουργείται μια αναθόλωση του φλοιού και ένας μεγάλης κλίμακας δόμος. Το επακόλουθο σπάσιμο περιλαμβάνει τρεις μεγάλες διαρρήξεις σε επίπεδο φλοιού, που σε γωνία $120^0$ μεταξύ τους, συγκλίνουν στο ίδιο σημείο στο κέντρο του δόμου (Εικ. 4.46). Οι διαρρήξεις αυτές εξελίσσονται σε ένα σύστημα η-

πειρωτικών τάφρων που περιλαμβάνει τρεις κλάδους. Από το σημείο αυτό και μετά δύο "ιστορίες" μπορούν να εξελιχθούν. Αν όλοι οι κλάδοι συνεχίσουν τη διάνοιξή τους, το αποτέλεσμα που θα προκύψει (Εικ. 4.46Α), θα είναι τρεις χωριστοί ήπειροι και ένα σημείο τριπλής συμβολής των τριών μεσοωκεάνιων ραχών, του τύπου RRR (Ridge-Ridge-Ridge, βλπ. και Κεφ. 3.3). Αντίθετα, αν κάποιος κλάδος σταματήσει τη διάνοιξή του και παραμείνει ένα απλό ηπειρωτικό επίμηκες βύθισμα (Εικ. 4.46Β), τότε θα αντιπροσωπεύει αυτό που αποκαλείται αποτυχημένος κλάδος (failed arm), ή κάτω από κάποιες προϋποθέσεις, αυλακογενές (aulacogene, βλπ. στη συνέχεια αλλά και Πίνακα 4.1 στο Κεφ. 4.2). Οι δύο κλάδοι, που συνεχίζουν τη διάνοιξή τους, θα σχηματίσουν το μελλοντικό ωκεανό. Μάλιστα η διάνοιξη στον ένα από αυτούς γίνεται περίπου εγκάρσια στα ηπειρωτικά περιθώρια, ενώ στον άλλο πλάγια (Εικ. 4.46Β).

Το πιο χαρακτηριστικό σημερινό ακτουαλιστικό πρότυπο, για τη δεύτερη "ιστορία", δηλαδή για τη συνέχιση της διάνοιξης μόνο στους δύο κλάδους και την αποτυχία του ενός, αποτελεί το σημείο συμβολής της Ερυθράς Θαλάσσης, του Κόλπου του Aden και των ηπειρωτικών τάφρων της Ανατολικής Αφρικής, που αποτελούν τους τρεις κλάδους της αρχικής ταφρογένεσης (Εικ. 4.47). Η συνεχιζόμενη διάνοιξη κατά μήκος της Ερυθράς Θαλάσσης και του Κόλπου του Aden, έχει ήδη χωρίσει την Αραβία από την Αφρική. Μάλιστα, σύμφωνα με το μοντέλο που περιγράφηκε προηγουμένως, η διάνοιξη γίνεται εγκάρσια ως προς τα ηπειρωτικά περιθώρια στην Ερυθρά Θάλασσα και πλάγια στον Κόλπο του Aden. Πλήρης ωκεάνιος φλοιός, με τις χαρακτηριστικές μαγνητικές ανωμαλίες, έχει ήδη δημιουργηθεί, ή αρχίζει να δημιουργείται και στις δύο αυτές θαλάσσιες λεκάνες. Όπως προαναφέρθηκε, στο νότιο τμήμα των δύο αυτών κλάδων η διάνοιξη έχει ξεκινήσει νωρίτερα και προχωρά με ταχύτερο ρυθμό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, στο πρότυπο της εξέλιξης μιας ηπειρωτικής τάφρου σε ωκεανό, η Ερυθρά Θάλασσα να βρίσκεται στο ομώνυμο στάδιο της "Ερυθράς Θαλάσσης" και ο Κόλπος του Aden, στα νότια στο πιο προχωρημένο στάδιο του "Στενού Ωκεανού" (βλπ. Κεφ. 4.6). Όπως φαίνεται λοιπόν, η Ερυθρά Θάλασσα και ο Κόλπος του Aden, θα εξελιχθούν στην πορεία τους σε πραγματικό ωκεανό. Όταν η διάνοιξη προχωρήσει βορειότερα και αποκόψει και τη Χερσόνησο του Σινά, η Ερυθρά Θάλασσα θα ενώσει τη Μεσόγειο Θάλασσα με τον Ινδικό Ωκεανό.

Από την άλλη μεριά, ο αποτυχημένος κλάδος

***Εικόνα 4.47*** *Από τους τρεις αρχικούς κλάδους της ταφρογένεσης, οι δύο (Ερυθρά Θάλασσα και Κόλπος του Aden), συνεχίζουν τη διάνοιξη και στον πυθμένα τους έχει ήδη σχηματισθεί ωκεάνιος φλοιός. Αντίθετα η ηπειρωτική τάφρος της Ανατολικής Αφρικής αποτελεί τον αποτυχημένο κλάδο (failed arm), που δεν θα εξελιχθεί ποτέ σε ωκεανό. Η περίπτωση αυτή παρουσιάζει όλα τα χαρακτηριστικά του μοντέλου της Εικ. 4.46Β.*




***Εικόνα 4.48*** *Ένα μοντέλο για τον αποχωρισμό των ηπείρων μέσα από την γραμμική, περίπου, ανάπτυξη μιας σειράς σημείων τριπλής συμβολής (τύπου RRR), πάνω από θερμές κηλίδες. Το μοντέλο αυτό ερμηνεύει τη δημιουργία ηπειρωτικών περιθωρίων με ακανόνιστο σχήμα, αλλά και τη θέση των αποτυχημένων κλάδων (failed arms) στα κοίλα σημεία καμπής τους.*

(failed arm), της Ανατολικής Αφρικής (Εικ. 4.47), αποτελεί μεν μια χαρακτηριστική ζώνη ηπειρωτικής ταφρογένεσης, αλλά δεν έχει διαπλατυνθεί και δεν έχει συνεχίσει τη διάνοιξή του για αρκετά εκατομμύρια χρόνια. Έχει παραμείνει στο στάδιο της Ηπειρωτικής Τάφρου, πληρωμένης με ηπειρωτικά και λιμναία ιζήματα, με την ανάπτυξη μεγάλων λιμνών στο εσωτερικό της, κοντά στις οποίες βρέθηκαν τα απολιθωμένα κρανία των προγόνων του ανθρώπινου γένους. Οι γεωλογικές ενδείξεις δείχνουν ότι η ταφρογένεση στην Ανατολική Αφρική είτε πλέον έχει διακοπεί εντελώς, είτε έχει μειώσει κατά πολύ τον ρυθμό εξέλιξής της. Κατά τα φαινόμενα, δεν θα εξελιχθεί ποτέ σε ωκεανό και θα παραμείνει μια εντυπωσιακή μορφολογική ταπείνωση πληρωμένη με ιζήματα, που κάποια μέρα, πιθανά, θα φιλοξενήσει το επόμενο μεγάλο ποτάμιο σύστημα της Αφρικής.

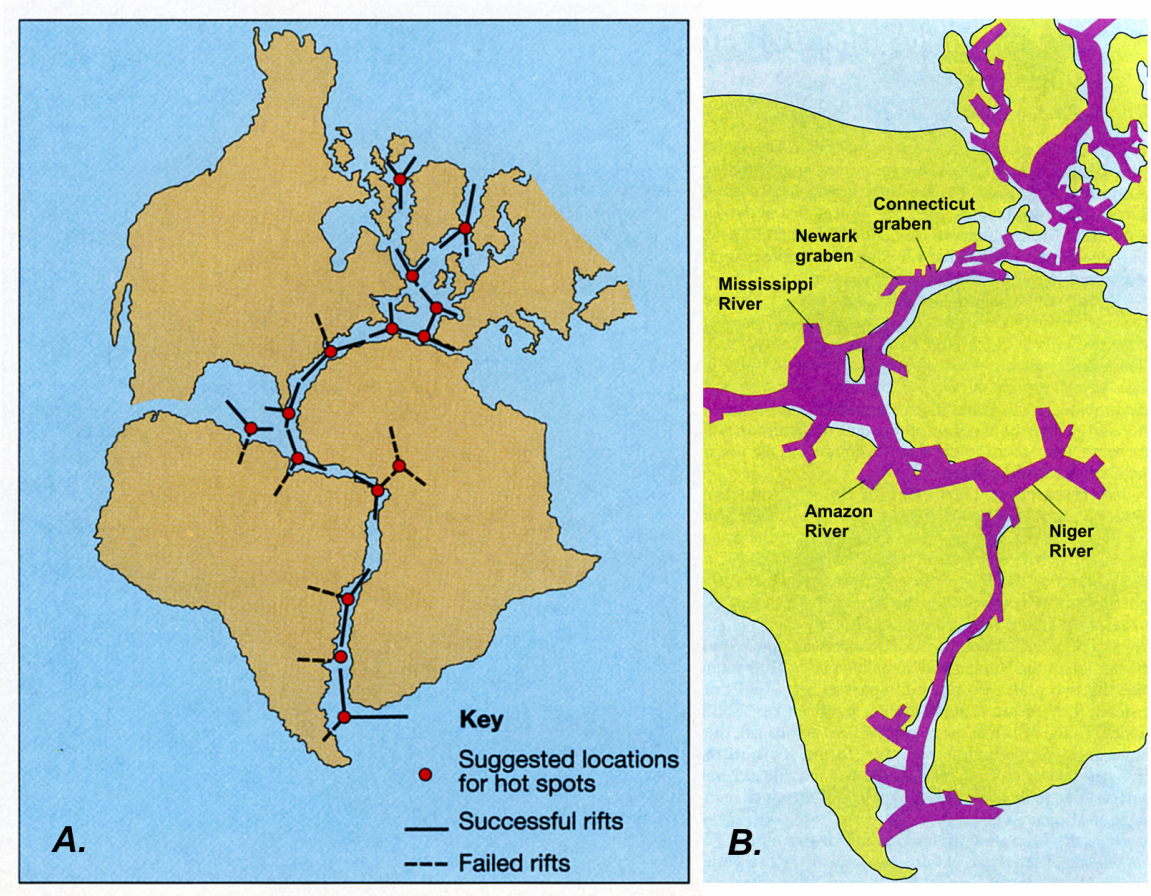
Πηγαίνοντας πίσω στο παρελθόν, άλλη μια τυπική περίπτωση αντίστοιχης εξέλιξης αποτελεί ο Ατλαντικός Ωκεανός. Όπως είναι γνωστό, περίπου 180 εκ. χρόνια πριν, η Βόρεια και Νότια Αμερική ήταν ενωμένες με την Ευρώπη και την Αφρική, αποτελώντας τμήμα μιας ενιαίας ηπείρου, της Παγγαίας. Το ταξίδι για τη σημερινή τους θέση ξεκίνησε όταν ένα μεγάλο σπάσιμο, μια μεγάλη διάρρηξη (rift), έκοψε όλο το φλοιό και διαχώρισε την Αμερική Από την Ευρώπη και την Αφρική. Στην περίπτωση αυτή βέβαια χρειάστηκαν περισσότερες από 20 θερμές κηλίδες, για να σπάσει η Παγγαία στις σημερινές μεγάλες ηπείρους, οι περισσότερες από τις οποίες είχαν πάρει το σχήμα τους περίπου 65 εκ. χρόνια πριν. Οι ήπειροι είναι πιθανότερο να σπάσουν στην περίπτωση που οι θερμές κηλίδες ευθυγραμμίζονται, δηλαδή, για να γίνει πιο κατανοητό, όπως ακριβώς συμβαίνει με τις διάτρητες γραμμές που χωρίζουν τα γραμματόσημα!

Ήδη 2-3 δεκαετίες πριν, έχουν προταθεί μοντέλα που υποστηρίζουν ότι ο διαχωρισμός των ηπείρων συμβαίνει ως άμεση αντίδραση στην ανάπτυξη μιας σειράς σημείων τριπλής συμβολής RRR-τύπου, πάνω από θερμές κηλίδες, που δια-

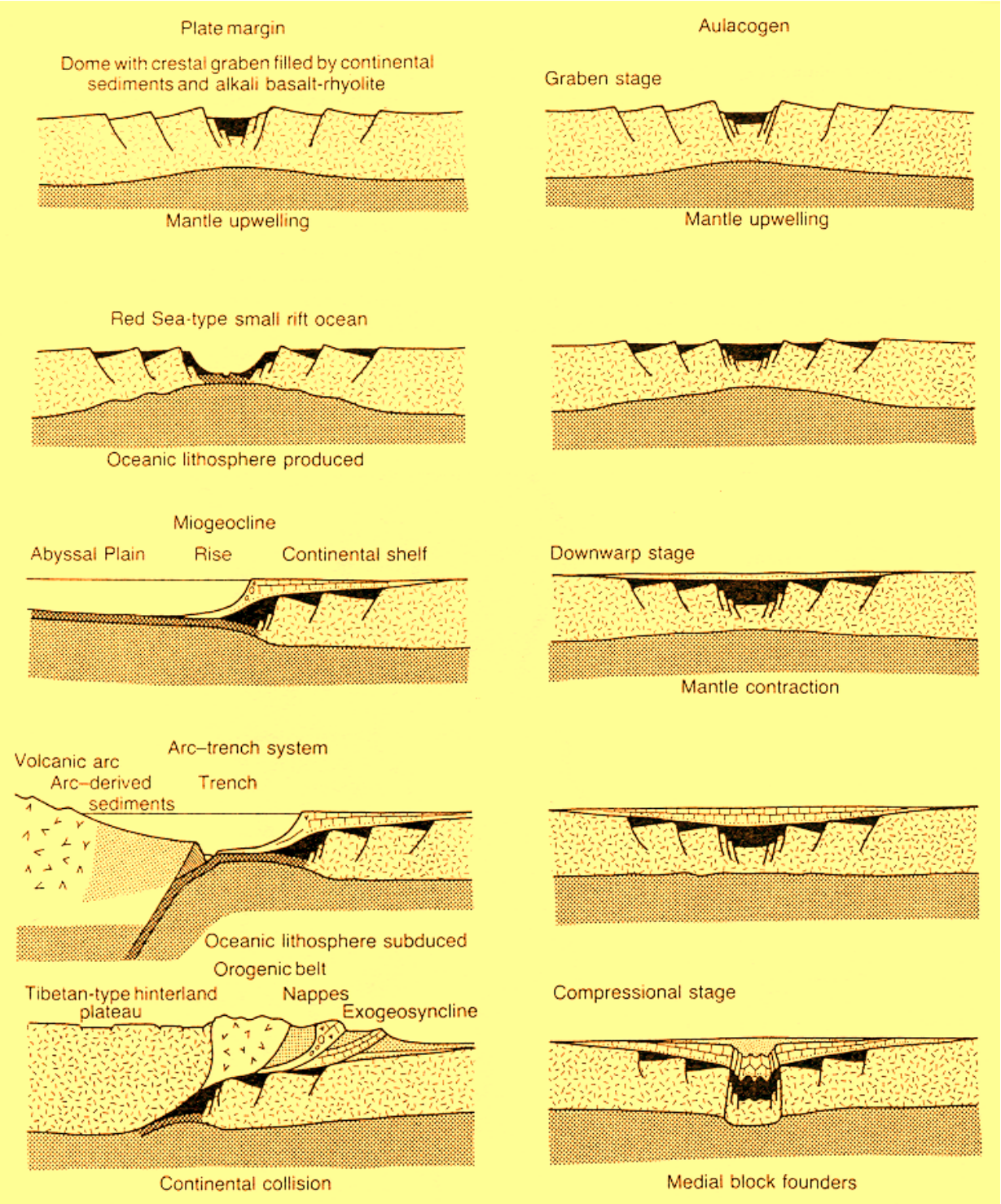
τάσσονται περίπου γραμμικά στο εσωτερικό μιας ηπείρου (Εικ. 4.48). Πάνω από κάθε θερμή κηλίδα οι δύο από τις τρεις τάφρους που έχουν σχηματισθεί, εκτείνονται και σε πλάτος, αλλά κυρίως σε μήκος, μέχρι να συνδεθούν με αντίστοιχες τάφρους γειτονικών θερμών κηλίδων και όλες μαζί ποια να συνεχίσουν το ταξίδι της διάνοιξης, μέχρι τη δημιουργία του ωκεανού. Ο τρίτος κλάδος κάθε θερμής κηλίδας, που δεν εξελίσσεται, αντιπροσωπεύει τον αποτυχημένο κλάδο (failed arm), που συνήθως μετατρέπεται σε αυλακογενές (aulacogen, βλπ. στα επόμενα). Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηπειρωτικών περιθωρίων με ακανόνιστο σχήμα, το οποίο όμως καθορίζεται από την θέση των σημείων τριπλής συμβολής. Από τη θέση των ίδιων σημείων καθορίζεται επίσης και η θέση των αποτυχημένων κλάδων, που συνήθως αναπτύσσονται προς την μεριά της ηπείρου στα κοίλα σημεία καμπής των ηπειρωτικών περιθωρίων και περίπου εγκάρσια προς αυτά, φιλοξενώντας συνήθως μεγάλους ποταμούς (Εικ. 4.48).

Η εξέλιξη του Ατλαντικού Ωκεανού ταιριάζει πολύ καλά στο μοντέλο αυτό, δεδομένου ότι παρουσιάζει το σύνολο σχεδόν των χαρακτηριστικών που περιγράφησαν προηγουμένως. Και έτσι, από την αρχική ευθυγράμμιση των θερμών κηλίδων στην παλαιά Παγγαία και το αρχικό σπάσιμο από την συνένωση των δύο κλάδων κατά μήκος μιας "τεθλασμένης" γραμμής (Εικ. 4.49Α), περνάμε στην ανάπτυξη του Ωκεανού, με τη διάνοιξη να γίνεται αλλού εγκάρσια και αλλού πλάγια, και στη σημερινή εικόνα των παθητικών ηπειρωτικών περιθωρίων και στις δυο μεριές του Ατλαντικού, σε συγκεκριμένες θέσεις των οποίων καταλήγουν τα μορφολογικά βυθίσματα των αποτυχημένων κλάδων, συνήθως κοιλάδες μεγάλων ποταμών (Εικ. 4.49Β, Νίγηρας, Αμαζόνιος, Μισισιπής κλπ.).

Πολύ συχνά στη βιβλιογραφία οι αποτυχημένοι αυτοί κλάδοι (failed arms), του Ατλαντικού, αναφέρονται και ως αυλακογενή (aulacogens), κυρίως γιατί αποτελούν αδρανείς πια τάφρους (paleorifts), που η ιστορία της εξέλιξής τους όμως περιλαμβάνει και ένα συμπιεστικό επεισόδιο (βλπ. Πίνακα 4.1, Κεφ. 4.2), όπως έχει δείξει η αναλυτι-




***Εικόνα 4.49*** *Το σπάσιμο της Παγγαίας και η δημιουργία του Ατλαντικού.* ***Α.*** *Πιθανή διάταξη των θερμών κηλίδων και των σημείων τριπλής συμβολής (triple junctions), που ήταν υπεύθυνα για τη δημιουργία του Ατλαντικού Ωκεανού και τη σημερινή εικόνα των παθητικών ηπειρωτικών περιθωρίων του Ατλαντικού.* ***Β.*** *Οι αποτυχημένοι κλάδοι (failed arms), που δεν εξελίχθηκαν σε ωκεανό, αποτελούν σήμερα μεγάλες τοπογραφικές ταπεινώσεις, που συνήθως φιλοξενούν μεγάλους ποταμούς.*




***Εικόνα 4.50*** *Σύγκριση της εξέλιξης ανάμεσα στα όρια των πλακών και ενός αυλακογενούς (aulacogen). Η αρχή της διαδρομής τους είναι κοινή, αφού αποτελούν κλάδους του ίδιου συστήματος ταφρογένεσης, που αναπτύσσεται στο εσωτερικό μιας ηπείρου. Η μετέπειτα εξέλιξή τους όμως είναι τελείως διαφορετική.*

κή μελέτη αρκετών από αυτές τις περιοχές, που άλλωστε παρουσιάζουν και αυξημένο οικονομικό ενδιαφέρον (υδρογονάνθρακες). Για να γίνει πιο κατανοητός ο ορισμός του αυλακογενούς, παρατίθεται το σχήμα της Εικόνας 4.50, όπου παρουσιάζεται η αντιστοιχία της εξέλιξης ανάμεσα στους 2 κλάδους της αρχικής ταφρογένεσης, που θα εξελιχθούν σε παθητικά περιθώρια και θα δώσουν τελικά ωκεανό, ο οποίος στη συνέχεια θα κλείσει με τη μετατροπή του ενός παθητικού περιθωρίου σε ενεργό, και στον τρίτο κλάδο που θα παραμείνει μια ηπειρωτική τάφρος, που παθητικά θα ακολουθήσει κάποια, αντίστοιχα, επεισόδια εφελκυσμού και συμπίεσης, μέχρι την οριστική αδρανοποίησή της.

## 4.8 Μοντέλα για το Μηχανισμό Διάνοιξης του Θαλάσσιου Πυθμένα

Τα δεδομένα που παρουσιάσθηκαν μέχρι στιγμής δίνουν μια αληθοφανή εικόνα για τη διαδοχή των γεγονότων και τα στάδια εξέλιξης των ηπειρωτικών τάφρων και των ηπειρωτικών περιθωρίων, αλλά δεν αποσαφηνίζουν τους μηχανισμούς που υποκινούν τις διαδικασίες αυτές. Στη συνέχεια θα αναφερθούν ορισμένα από τα πιο επικρατέστερα μοντέλα, που συμφωνούν με τα περισσότερα δεδομένα που υφίστανται μέχρι στιγμής, επισημαίνεται όμως ότι υπάρχουν πολλές διαστάσεις του θέματος, που δεν έχουν γίνει ακόμα κατανοητές.

### *Το Ξεκίνημα της Ταφρογένεσης*

Με δεδομένο ότι σε άλλες περιπτώσεις η απαρχή της ταφρογένεσης ξεκινάει με αναθόλωση – δημιουργία δόμου και σε άλλες με καταβύθιση, αλλά και με δεδομένες τις διαφορές στο χρόνο έναρξης της ηφαιστειότητας, γίνεται φανερό ότι διαφορετικοί μηχανισμοί πρέπει να λειτουργούν, τουλάχιστον σε τοπικό επίπεδο, κατά μήκος μιας ηπειρωτικής τάφρου.

Η αρχική αναθόλωση με τη μορφή ενός δόμου μπορεί να προκληθεί από μια στήλη θερμικής μεταφοράς (convective plume, βλπ. και Κεφ. 3.6), που ξεκινάει από τα βάθη του μανδύα, τον διασχίζει και προσκρούει στη βάση του φλοιού. Τα θερμικά αυτά ρεύματα μεταφέρουν βαθύτερα και θερμότερα πετρώματα σε ανώτερους ορόφους, προκαλώντας την τήξη των εκεί πετρωμάτων. Επειδή ο μηχανισμός είναι τα ρεύματα θερμικής μεταφοράς, που φυσικά είναι ενεργός πριν την εκδήλωση του δόμου και την έναρξη της ταφρογένεσης, η μαγματική δραστηριότητα ξεκινάει νωρίς στο πλαίσιο της εξέλιξης των φαινομένων. Η τοποθέτηση της πηγής των θερμικών ρευμάτων σε μεγάλα βάθη και το μεγάλο αρχικό πάχος της λιθόσφαιρας, εξηγούν την προέλευση των μαγμάτων από βαθείς ορίζοντες και ως εκ τούτου την πλούσια αλκαλική σύστασή τους. Ο μηχανισμός αυτός των θερμικών ρευμάτων μεταφοράς, μπορεί κάλλιστα να είναι η αιτία της δημιουργίας των δυνάμεων που προκαλούν την επακόλουθη ταφρογένεση.

Από την άλλη μεριά, η καταβύθιση του φλοιού στην αρχή της ταφρογένεσης, μπορεί να ερμηνευθεί αν αυτή ξεκινάει με έκταση και εκλέπτυνση του φλοιού, που προκαλεί και την επακόλουθη μορφολογική ταπείνωση. Το μοντέλο αυτό προϋποθέτει ότι οι δυνάμεις που είναι υπεύθυνες για την ταφρογένεση δρουν σε απομακρυσμένα όρια λιθοσφαιρικών πλακών, με αποτέλεσμα σε τοπικό επίπεδο να λαμβάνει χώρα μια παθητική απομάκρυνση. Η οριζόντια αυτή απομάκρυνση, που χωρίζει την ενιαία ήπειρο σε δύο πλάκες, είναι η αιτία της έναρξης μιας ανοδικής ροής στο μανδύα ακριβώς κάτω από την τάφρο, με τον ανώτερο μανδύα να επηρεάζεται περισσότερο και πιο νωρίς από τον κατώτερο μανδύα. Επειδή η ανοδική αυτή ροή του μανδύα υποκινείται από την οριζόντια κίνηση των πλακών, ξεκινάει μετά την έναρξη της ταφρογένεσης. Άρα λοιπόν η μαγματική δραστηριότητα ξεκινάει, ορισμένες φορές, μετά την ταφρογένεση και επειδή η ροή του μανδύα γίνεται σε ρηχούς ορόφους και η λιθόσφαιρα είναι ήδη μερικώς εκλεπτυσμένη, η προέλευση του μάγματος είναι ρηχή και γι' αυτό η σύστασή του είναι βασαλτική.

Τα υπάρχοντα δεδομένα, υποστηρίζουν μια εναλλαγή αυτών των δύο μηχανισμών κατά μήκος μιας ηπειρωτικής τάφρου, ανάμεσα σε περιοχές κάτω από τις οποίες βρίσκονται θερμικές στήλες, που παράγουν από νωρίς εκτεταμένη αλκαλική ηφαιστειότητα και σε περιοχές που υπόκεινται σε παθητικό εφελκυσμό και χαρακτηρίζονται από μια, βραδύτερης έναρξης, βασαλτική ηφαιστειότητα. Η διατήρηση τέτοιων διαφοροποιήσεων και μετά το άνοιγμα της ωκεάνιας λεκάνης, ερμηνεύει διαφορές που παρουσιάζονται κατά μήκος των μεσωκεάνιων ράχεων.

### *Μαγνητικές Ανωμαλίες*

Ο ωκεανικός φλοιός δημιουργείται από διεισδύσεις και εκχύσεις μάγματος που προέρχεται από αποσυμπιεστική τήξη, κατά τη διάρκεια διαπειρικής ανόδυο του μανδύα. Ο δημιουργούμενος φλοιός μαγνητίζεται παράλληλα με το περιρρέον μαγνητικό πεδίο της Γης, τη στιγμή που το κρυσταλλωνόμενο μάγμα ψύχεται κάτω από το σημείο Curie και απομακρύνεται από το κέντρο διάνοιξης, μαζί με τον υποκείμενο μανδύα, καθώς νέος φλοιός δημιουργείται. Τα δεδομένα από τη μελέτη των πετρωμάτων του ωκεάνιου φλοιού και των οφιολίθων, υποστηρίζουν ότι η περισσότερη από τη μαγνήτιση πραγματοποιείται στις λάβες και τους "φρέσκους γάββρους"!

### *Θερμική Ροή και Μορφολογία*

Τα πιο θερμά τμήματα του μανδύα που υπόκειται αμέσως του φλοιού, παρατηρούνται εκεί που τα ρεύματα μεταφοράς φέρνουν θερμό υλικό από το εσωτερικό της Γης κοντά στην επιφάνεια. Ως εκ τούτου λοιπόν, η θερμική ροή αναμένεται να είναι μέγιστη στην κορυφή της μεσο-ωκεάνιας ράχης. Κατά τη διάρκεια της επακόλουθης διάνοιξης, ο φλοιός και ο ανώτερος μανδύας ψύχονται, λόγω μεταφοράς θερμότητας και λόγω της κυκλοφορίας του ωκεάνιου νερού, που εισχωρεί στο φλοιό, πιθα-

νά σε βάθος που φθάνει τον ανώτερο μανδύα. Χαμηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες, σημαίνουν χαμηλότερες θερμικές διαβαθμίσεις και μια επακόλουθη πτώση στη θερμική ροή, όπως άλλωστε παρατηρείται.

Το όριο λιθόσφαιρας-ασθενόσφαιρας είναι ένα ρεολογικό όριο, που εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Στον άξονα της ράχης, η βάση της λιθόσφαιρας είναι σχεδόν στην επιφάνεια. Καθώς η λιθόσφαιρα και η υποκείμενη ασθενόσφαιρα ψύχονται, το όριο αυτό μετακινείται προς τα κάτω, κάνοντας τη λιθόσφαιρα παχύτερη.

Η ψύξη, επίσης, έχει ως αποτέλεσμα τη θερμική συστολή, που κατεβάζει το επίπεδο ισορροπίας του ωκεάνιου πυθμένα. Έτσι λοιπόν, το τοπογραφικά υψηλό σημείο των μεσο-ωκεάνιων ραχών και η μείωση του υψομέτρου, ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της ηλικίας του ωκεάνιου πυθμένα, μπορούν να ερμηνευθούν από την δι' απαγωγής, ψύξη της λιθόσφαιρας. Η μεγάλης κλίμακας τοπογραφία του ωκεάνιου πυθμένα, ως εκ τούτου, αντανακλά το θερμικό καθεστώς της υποκείμενης λιθόσφαιρας, που συσχετίζεται άμεσα με την ηλικία της λιθόσφαιρας, για ηλικίες μικρότερες από 60 έως 80 Ma (βλπ. Εικ. 4.5). Για παλαιότερες ηλικίες η λιθόσφαιρα δεν συνεχίζει να αυξάνει το πάχος της, αλλά ούτε και το βάθος του ωκεάνιου πυθμένα συνεχίζει να αυξάνεται, καταδεικνύοντας ότι η λιθόσφαιρα έχει φθάσει σε ένα θερμικά σταθερό καθεστώς, που επιτρέπει τη σταθερή δι' επαγωγής μεταφορά της θερμότητας, από το εσωτερικό της Γης προς τα έξω.

## *Βαρύτητα*

Τα βαρυτικά δεδομένα από τις μεσο-ωκεάνιες ράχεις, μπορούν επίσης να ερμηνευθούν με ένα παρόμοιο μοντέλο θερμικής στήλης στο στερεό μανδύα, κάτω από τα ενεργά κέντρα διάνοιξης. Ο θερμός ανερχόμενος μανδύας, είναι λιγότερο πυκνός από τον γειτονικό μανδύα, προξενώντας την αρνητική ανωμαλία Bouger. Η ανοδική δύναμη, που δημιουργείται από το, με θερμική μεταφορά, ανερχόμενο υλικό, είναι υπεύθυνη, εν μέρει, για τη μορφολογία της ράχης, ερμηνεύοντας ταυτόχρονα και τη μικρή θετική ανωμαλία ελεύθερου αέρα.

Η ένδειξη αυτή τείνει να υποστηρίξει το μοντέλο κατά το οποίο η θερμική μεταφορά κάτω από τη ράχη οδηγεί τον διαχωρισμό των πλακών, παρά το μοντέλο κατά το οποίο ο διαχωρισμός των πλακών οδηγείται από απομακρυσμένες δυνάμεις και ο μανδύας ανέρχεται παθητικά στις ράχεις για να πληρώσει το κενό που δημιουργείται. Αν ίσχυε η δεύτερη περίπτωση θα αναμενόταν μια μικρή αρνητική ανωμαλία ελεύθερου αέρα (και όχι θετική, όπως παρατηρείται).

## *Προβλήματα και Διαφωνίες*

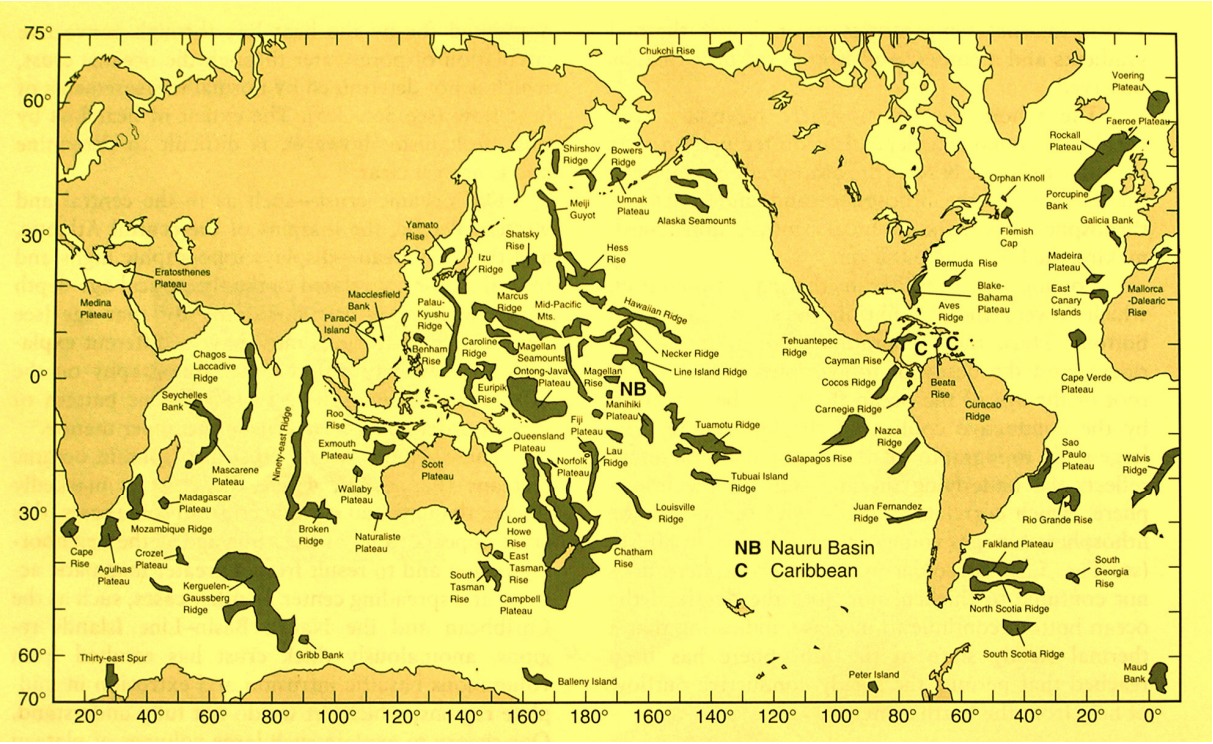
Το μοντέλο που περιγράφηκε στα προηγούμενα, συμφωνεί σε γενικές γραμμές με τα διαθέσιμα δεδομένα. Όπως κάθε μοντέλο, όμως, αποτελεί μια απλοποιημένη εκδοχή. Υπάρχουν όμως δεδομένα που περιπλέκουν τα πράγματα, δημιουργώντας προβλήματα που είναι αξιοσημείωτα.

Η απώλεια θερμότητας, που προσδιορίζεται από τις μετρήσεις της θερμικής ροής στις ράχεις, αν και υψηλή, είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή που θεωρητικά προβλέπεται από μοντέλα, που προϋποθέτουν την άνοδο του μανδύα κάτω από τη ράχη, με θερμικά ρεύματα μεταφοράς. Η διαφορά θα μπορούσε να ερμηνευθεί με τη θερμότητα που χάνεται από την κυκλοφορία του νερού των πόρων δια μέσου του ωκεάνιου φλοιού, η οποία δεν προσδιορίζεται από τις συνήθεις μετρήσεις της θερμικής ροής (βλπ. Κεφ. 4.5). Το ποσό όμως της θερμότητας που χάνεται από αυτό το μηχανισμό είναι δύσκολο να υπολογισθεί και τα πράγματα δεν έχουν αποσαφηνισθεί ακόμα.

Παλαιός ωκεάνιος φλοιός –όπως αυτός στον κεντρικό και δυτικό Ειρηνικό, στα περιθώρια του κεντρικού Ατλαντικού και στην Καραϊβική– παρουσιάζει τοπογραφικά υψηλά και χαμηλά, που δεν σχετίζονται με τη θεωρητική καμπύλη "Ηλικίας-Βάθους", που είναι περίπου οριζόντια για τις ηλικίες αυτές (βλπ. Εικ. 4.5). Τέτοιες δομές πρέπει να έχουν μια διαφορετική ερμηνεία. Μπορεί να αντανακλούν είτε την τοπογραφία της επιφάνειας ανάμεσα στη λιθόσφαιρα και την ασθενόσφαιρα, ή το πρότυπο των δεύτερης τάξης θερμικών ρευμάτων μεταφοράς στον ανώτερο μανδύα.

Οι περιοχές αυτές με παλαιό φλοιό περιλαμβάνουν επίσης ωκεανικά plateaus, όπου ο φλοιός είναι αξιοσημείωτα παχύτερος, απ' ότι ο κανονικός ωκεάνιος φλοιός (Εικ. 4.51). Σε ορισμένες περιπτώσεις ο ανώμαλος αυτός φλοιός εμφανίζεται να έχει την ίδια ηλικία με τον γειτονικά ευρισκόμενο κανονικό φλοιό και δείχνει να έχει προέλθει από μια μεγαλύτερη μαγματική δραστηριότητα στο κέντρο διάνοιξης. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως η περιοχή Nauru Basin – Line Islands και η Καραϊβική, ο ανώμαλα παχύς φλοιός έχει προέλθει από ογκώδεις βασαλτικές διεισδύσεις και εκχύσεις στο μέσο των πλακών, διαδικασίες που ακόμα δεν έχουν κατανοηθεί. Μια θεωρία που προσπαθεί να εξηγήσει αυτούς τους μεγάλους όγκους των βασαλτικών plateaus, υποστηρίζει ότι αντανακλούν την άφιξη στη βάση της λιθόσφαιρας μιας πολύ μεγάλης θερμικής στήλης (plume) από τον κατώτατο μανδύα.

Οι μηχανισμοί που αιτιολογούν το σταθερό καθεστώς που είναι υπεύθυνο για την δημιουργία αξονικής κοιλάδας στην κορυφή των αργής-διάνοιξης ραχών και την απουσία της στις ταχείας-

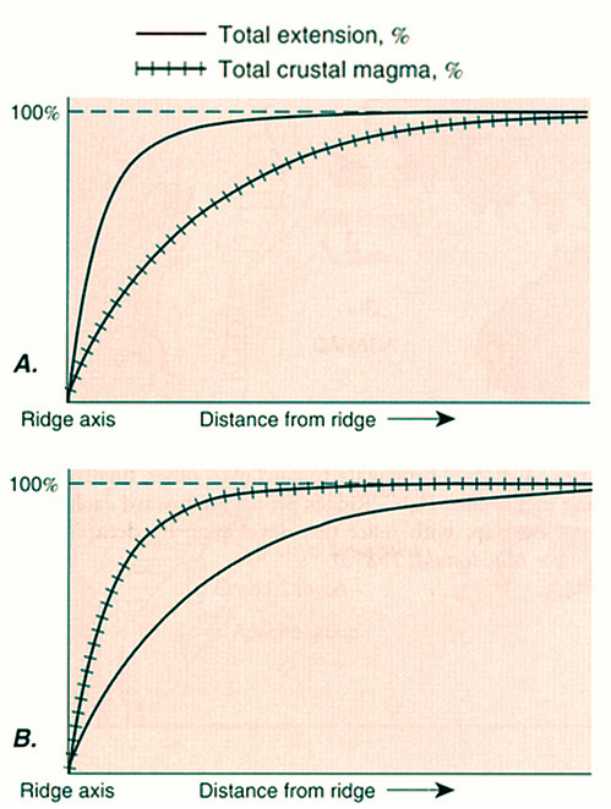



***Εικόνα 4.51*** *Κατανομή των περιοχών που χαρακτηρίζονται από ανώμαλα παχύ ωκεάνιο φλοιό, στις ωκεάνιες λεκάνες όλης της Υδρογείου. Οι περιοχές αυτές περιλαμβάνουν μεγάλες τράπεζες (plateaus) αλλά και στενότερες ασεισμικές ράχεις.*

διάνοιξης ράχεις, δεν έχουν ακόμα πλήρως κατανοηθεί. Είναι γνωστό ότι στις αργής-διάνοιξης ράχεις, καθώς ένα δεδομένο σημείο μετακινείται μακριά από τον άξονα της ράχης, η επιφάνεια του φλοιού πρέπει να αυξήσει το υψόμετρό της από αυτό της αξονικής κοιλάδας σε αυτό της κορυφής της ράχης, γιατί μόνο με αυτό τον τρόπο μπορεί να διατηρηθεί ως μια σταθερού καθεστώτος δομή στην τοπογραφία. Είναι γνωστό επίσης ότι η αξονική κοιλάδα είναι μια τάφρος που χαρακτηρίζεται από κανονικά λιστρικά ρήγματα λόγω της έκτασης και της εκλέπτυνσης του φλοιού. Τέτοια ρήγματα έχουν επιβεβαιωθεί από τους μηχανισμούς γένεσης των ρηχών σεισμών που εκδηλώνονται στις ράχεις, από παλαιο-μαγνητικά δεδομένα που δείχνουν την περιστροφή των ρηξιτεμαχών, από τη λεπτομερή μελέτη των οφιολιθικών συμπλεγμάτων και από τις γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του ODP (Ocean Drilling Project).

Το πρόβλημα στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι πρέπει να αιτιολογηθεί η τοπογραφική άνοδος με την ταυτόχρονη δράση των λιστρικών ρηγμάτων. Μια πιθανότητα είναι η τοπογραφία να είναι το αποτέλεσμα ανταγωνιστικών διαδικασιών, που τείνουν να την αυξήσουν ή να την μειώσουν. Η σχέση που παρουσιάσθηκα στο διάγραμμα της Εικ. 4.5 (καμπύλη "Ηλικίας-Βάθους"), δείχνει ότι η θερμική διαστολή του νέου θερμού φλοιού εξηγεί τη συνολική αύξηση του υψομέτρου στον άξονα της ράχης καθώς και ότι η θερμική συστολή της λιθόσφαιρας κατά τη διάρκεια της ψύξης επηρεάζει την τοπογραφία της ράχης στη μεγάλη κλίμακα. Η ισοστατική άνοδος του φλοιού λόγω της πάχυνσης από τις μαγματικές εκχύσεις και διεισδύσεις, μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μια αύξηση του υψομέτρου, πλησίον του άξονα της ράχης, όπου ο νέος φλοιός σχηματίζεται. Από την άλλη μεριά πάλι, μια λιθόσφαιρα που βρίσκεται σε καθεστώς ενεργού έκτασης και απομάκρυνσης από τότε που σχηματίζεται, θα δημιουργήσει ένα τοπογραφικό βύθισμα πάνω από τη ζώνη του ενεργού εφελκυσμού. Η έκφραση αυτού του εφελκυσμού στον ανώτερο φλοιό μπορεί να είναι η δημιουργία ενός συστήματος κανονικών λιστρικών ρηγμάτων.

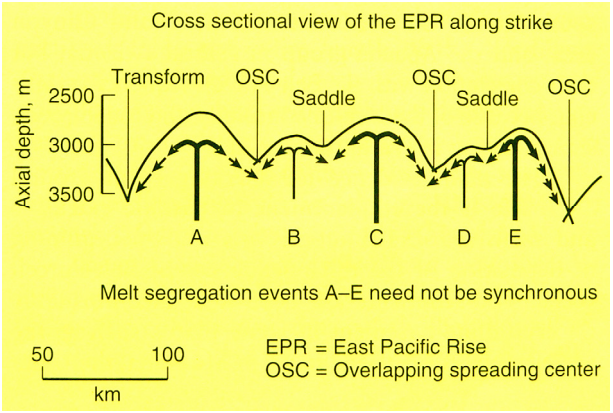
Ως εκ τούτου λοιπόν, αν όλος ο εφελκυσμός συγκεντρώνεται σε μια στενή ζώνη κοντά στη ράχη και αν η πάχυνση του φλοιού από τις μαγματικές διαδικασίες λαμβάνει χώρα σε μια πλατύτερη ζώνη (Εικ. 4.52Α), τότε ο εφελκυσμός κυριαρχεί τοπικά και σχηματίζει ένα τοπογραφικό βύθισμα στον άξονα της ράχης και η ισοστατική άνοδος του πεπαχυμένου φλοιού δημιουργεί τις πλευρές της αξονικής λεκάνης. Αυτές οι ανταγωνιστικές διαδικασίες μπορούν να διατηρούν μια σταθερού καθεστώτος αξονική κοιλάδα. Από την άλλη, αν ο εφελκυσμός κατανέμεται σε μια πλατύτερη ζώνη απ' ότι η ζώνη



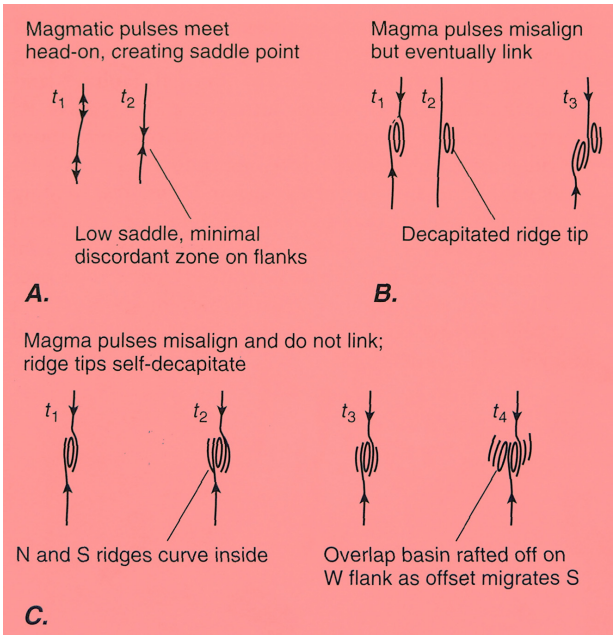

***Εικόνα 4.52*** *Η παρουσία ή απουσία αξονικής κοιλάδας σε ένα ωκεάνιο κέντρο διάνοιξης, μπορεί να εξαρτάται από τις ανταγωνιστικές διαδικασίες της έκτασης του φλοιού από κανονικά ρήγματα, ή τις πάχυνσης του φλοιού από μαγματικές διεισδύσεις και εκχύσεις.* ***A.*** *Ο εφελκυσμός του φλοιού κατανέμεται σε μια στενή ζώνη κατά μήκος της ράχης και η πάχυνση σε μια ευρύτερη. Τοπικά επικρατεί ο εφελκυσμός που σχηματίζει την τοπογραφική ταπείνωση, αλλά η ισοστατική άνοδος λόγω πάχυνσης του φλοιού, ανυψώνει τις πλευρές του βυθίσματος.* ***B.*** *Ο εφελκυσμός του φλοιού κατανέμεται σε μια πλατιά ζώνη πάνω από τον άξονα της ράχης και η πάχυνση του φλοιού, από μαγματισμό, σε μια στενή. Κάτω από αυτές τις συνθήκες δεν αναπτύσσεται αξονική κοιλάδα.*

της πάχυνσης (λόγω μαγματισμού) του φλοιού (Εικ. 4.52Β), η τοπογραφική ταπείνωση είναι μικρή και πλατιά και έτσι δεν σχηματίζεται ευδιάκριτη αξονική κοιλάδα.

Η σχέση ανάμεσα στις ασυνέχειες που παρατηρούνται κατά μήκος των αξόνων των ράχεων και την τοπογραφία (βλπ. Κεφ. 4.5 και Εικ. 4.25) υποστηρίζει ένα μοντέλο που συσχετίζει αυτές τις δομές με την παρουσία μεγάλων μαγματικών θαλάμων. Οι περιοχές ανάμεσα σε δεύτερης τάξης ασυνέχειες ή ανάμεσα σε πρώτης και δεύτερης τάξης ασυνέχειες, πιστεύεται ότι αντιπροσωπεύουν ξεχωριστούς μαγματικούς θαλάμους, που είναι παχύτεροι (και πιο ρηχοί), ανάμεσα στις ασυνέχειες και λεπτότεροι (και πιο βαθειά) κοντά σε αυτές (Εικ. 4.53). Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, νέες ποσότητες μάγματος προστίθενται κατά παλμούς, διογκώνουν τον μαγματικό θάλαμο και διαδίδονται κατά μήκος της διεύθυνσης της ράχης. Καθώς δύο τέτοιοι "μαγματικοί παλμοί " (magmatic pulses), μεταδίδονται ο ένας προς τον άλλο, θα αλληλεπιδράσουν με έναν από τρεις πιθανούς τρόπους (Εικ. 4.54). Αν συναντηθούν μετωπικά, θα συνδεθούν σχηματίζοντας έναν αυχένα κατά μήκος της ράχης (Εικ.




***Εικόνα 4.53*** *Δημιουργία επικαλυπτόμενων τάφρων από την εξάπλωσή τους εκτός των μαγματικών κέντρων.*




***Εικόνα 4.54*** *Μοντέλο για την εξέλιξη των ασυνεχειών των αξόνων των ράχεων* ***A.*** *Οι ράχες εξαπλώνονται η μία προς την άλλη και τελικά συναντώνται σχηματίζοντας έναν αυχένα.* ***B.*** *&* ***C.*** *Οι ράχες εξαπλώνονται η μία προς την άλλη και επικαλύπτονται, αφήνοντας υπολείμματα των αποκομμένων απολήξεών τους.*

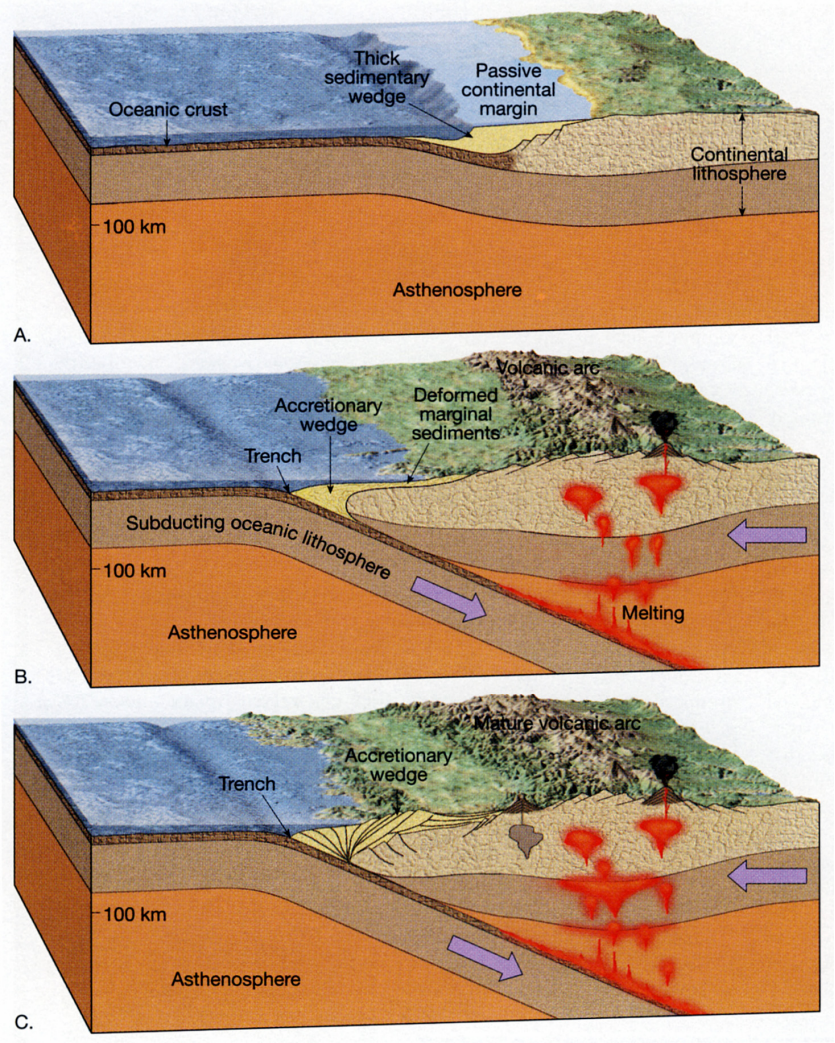
4.54A). Αν αυτοί δεν είναι καλά ευθυγραμμισμένοι, καθώς συνεχίζουν να διαδίδονται, μπορεί να συνδεθούν (Εικ. 4.54B) ή όχι (Εικ. 4.54C). Σε κάθε περίπτωση, η απόληξη μιας ράχης κόβεται ή "αποκεφαλίζεται". Καθώς η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, αλληλουχίες από "αποκεφαλισμένες" απολήξεις ράχεων με σχήμα V, διατηρούνται στον ωκεάνιο φλοιό ($t_n$ στις Εικ. 4.54B και 4.54C). Οι δομές αυτές μπορεί να αντιστοιχούν στα V-σχήματος ψευδορήγματα των εξαπλωνόμενων ράχεων (propagating rift, βλπ. Κεφ. 4.5, Εικ. 4.27 και 4.28).

## 4.9 Μετασχηματισμός Σταθερού Περιθωρίου σε Ενεργό

Το μικρό κείμενο που ακολουθεί στην ουσία αποτελεί τη σύνδεση ανάμεσα στα αποκλίνοντα περιθώρια των πλακών, που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο αυτό και στα συγκλίνοντα που θα περιγραφούν στη συνέχεια, αφού προηγηθεί η περιγραφή των ρηγμάτων μετασχηματισμού.

Είδαμε ότι, κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του φαινομένου της απόκλισης των πλακών, έχουμε μια νεοσχηματισμένη λιθόσφαιρα που προέρχεται από το μανδύα (ωκεάνιος φλοιός), η οποία αρχικά είναι ζεστή και ψύχεται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου. Η ψύξη του ωκεάνιου φλοιού, προκαλεί μια αύξηση της πυκνότητας του όπου οφείλεται και η θερμική καταβύθιση (αύξηση του βάθους της θάλασσας). Η νεοσχηματισθείσα λιθόσφαιρα θεωρείται εντελώς ψυχρή στο στάδιο της Ερυθράς Θάλασσας. Η υπερκείμενη της ασθενόσφαιρας ψυχρή ωκεανική λιθόσφαιρα, είναι βαρύτερη της ασθενόσφαιρας και έχει την τάση να καταδυθεί μέσα σ' αυτή.

Με αυτές τις συνθήκες μπορεί, σε θεωρητικό, πάντα επίπεδο, να γίνει ένας αποχωρισμός των δύο διαφορετικών ειδών της λιθόσφαιρας, ηπειρωτικής και ωκεανικής, στο όριο τους. Με αυτό τον τρόπο πρωτοξεκινάει η υποβύθιση (subduction), της ωκεανικής λιθόσφαιρας κάτω από την ηπειρωτική. Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα το μετασχηματισμό ενός παλαιού σταθερού περιθωρίου σε ενεργό περιθώριο (Εικ. 4.55).




***Εικόνα 4.55*** *Μετατροπή σταθερού ηπειρωτικού περιθωρίου σε ενεργό. Το συγκεκριμένο παράδειγμα αναφέρεται σε μια ζώνη υποβύθισης τύπου Άνδεων (βλπ. Κεφ. 5, Κεφ. 9 και Κεφ. 11).* ***Α.*** *Παθητικό ηπειρωτικό περιθώριο που συνοδεύεται από εκτεταμένη σφήνα ιζημάτων.* ***Β.*** *Η σύγκλιση των πλακών δημιουργεί μια ζώνη υποβύθισης και η μερική τήξη της υποβυθιζόμενης ωκεανικής λιθόσφαιρας δημιουργεί ένα ηφαιστειακό τόξο.* ***C.*** *Η συνεχιζόμενη σύγκλιση και μαγματική δραστηριότητα παραμορφώνει και παχαίνει το φλοιό, ανυψώνοντας μια οροσειρά (Άνδεις).*

Οι γεωφυσικοί υπολόγισαν ότι ο χρόνος, που απαιτείται για να ψυχθεί η νεοσχηματισμένη ωκεανική λιθόσφαιρα, ώστε να αυξηθεί η πυκνότητα της και να αρχίσει το φαινόμενο της βύθισης, είναι της τάξης των 180-200 εκατομμυρίων ετών. Έτσι εξηγούν και την απουσία παλαιών ωκεανών στην υδρόγειο δηλαδή μεγαλύτερης ηλικίας από 200 εκατομ. χρόνια.

Ο μετασχηματισμός από ένα σταθερό περιθώριο σε ενεργό μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε στάδιο εξέλιξης του ωκεανού. Το όριο μεταξύ της ηπειρωτικής και της ωκεανικής λιθόσφαιρας αποτελεί μια ζώνη αδυναμίας μέσα στη λιθόσφαιρα, που κινείται κατά τη διάρκεια της εξέλιξης ενός σταθερού περιθωρίου. Στην περίπτωση μιας συμπίεσης αυτό το όριο μπορεί να επαναδραστηριοποιηθεί και να μετασχηματιστεί σε μια επιφάνεια επώθησης της ηπειρωτικής ελαφριάς λιθόσφαιρας πάνω στη βαριά ωκεανική. Κατ' αυτό τον τρόπο αρχίζει η βύθιση, που μπορεί να συνεχιστεί γιατί η πυκνότητα της βυθιζόμενης λιθόσφαιρας είναι μεγαλύτερη από αυτή της ασθενόσφαιρας και της επιτρέπει να βυθίζεται μέσα σε αυτή λόγω του βάρους της.

Βλέπουμε ότι ένα σταθερό περιθώριο, που είχε μια καθορισμένη εξέλιξη από τα φαινόμενα του εφελκυσμού, μπορεί να μετασχηματιστεί από την επίδραση μιας συμπίεσης, όταν πρωταρχίζει η βύθιση της ωκεανικής λιθόσφαιρας. Τα κανονικά ρήγματα του σταθερού περιθωρίου εξελίσσονται τότε σε ανάστροφα και τα κρυσταλλικά τεμάχη που προηγουμένως καταβυθίζονταν μπορούν να μετασχηματιστούν σε τεκτονικά λέπη και καλύμματα. Έτσι αρχίζει μια άλλη μορφή εξέλιξης αυτή των ενεργών ηπειρωτικών περιθωρίων.