

*Βασίλης Παπαζάχος  
Κατερίνα Παπαζάχου*

# ΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ της ΕΛΛΑΔΑΣ

*Γ' ΕΚΔΟΣΗ*



*Κάθε γνήσιο αντίτυπο φέρει την υπογραφή του συγγραφέα*

ISBN 960-431-847-0

© Copyright: Βασίλης Παπαζάχος - Κατερίνα Παπαζάχου, Εκδόσεις Ζήτη,  
Μάρτιος 2003, Θεσσαλονίκη

---

*Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του Ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.*

---



Φωτοστοιχειοθεσία  
Εκτύπωση

**Π. ΖΗΤΗ & ΣΙΑ ΟΕ**

18ο χλμ Θεοφάνειας-Περαιάς  
Τ.Θ. 171 • Νέοι Επιβάτες Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19  
Τηλ.: 03920 72.222 (5 γραμ.) - Fax: 03920 72.229  
e-mail: [info@ziti.gr](mailto:info@ziti.gr)

Βιβλιοπωλείο

**ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ**

Αρμενοπούλου 27 • 546 35 Θεσσαλονίκη  
Τηλ. 0310 203.720, Fax 0310 211.305  
e-mail: [sales@ziti.gr](mailto:sales@ziti.gr)

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

**Ο** τίτλος του παρόντος βιβλίου υιοθετήθηκε, γιατί στο κεφάλαιο 10, που είναι ένα σημαντικό κεφάλαιο και καλύπτει μεγάλο μέρος του βιβλίου, περιγράφονται τα μακροσεισμικά αποτελέσματα όλων των γνωστών ισχυρών σεισμών ( $M \geq 6.0$ ) της Ελλάδας από τον 6<sup>ο</sup> π.Χ. αιώνα. Ένας πρόσθετος λόγος για την επιλογή του τίτλου «Οι Σεισμοί της Ελλάδας» είναι η ιστορική πληροφορία ότι ένα βιβλίο με τον ίδιο περίπου τίτλο, που έγραψε ο Δημήτριος Καλατιανός τον 3<sup>ο</sup> π.Χ. αιώνα, χάθηκε.

Από την πρώτη έκδοση του βιβλίου (1989) στα Ελληνικά καθώς και από την δεύτερη έκδοση του (1997) στα Αγγλικά και του (2002) στα Ελληνικά, διάφοροι επιστήμονες (σεισμολόγοι, γεωφυσικοί, γεωλόγοι, μηχανικοί, ιστορικοί, αρχαιολόγοι) και άλλοι επικοινωνήσαν μαζί μας και μας έκαναν διάφορες υποδείξεις. Αυτές οι υποδείξεις αφορούν πρόσθετες πληροφορίες για σεισμούς για τους οποίους υπάρχουν στοιχεία στις προηγούμενες εκδόσεις καθώς και πληροφορίες για ισχυρούς σεισμούς που ήταν άγνωστοι σ' εμάς στις προηγούμενες εκδόσεις του βιβλίου. Δηλαδή, οι προηγούμενες εκδόσεις αποτέλεσαν σοβαρό κίνητρο για παραπέρα προσπάθεια βελτίωσης των γνώσεών μας για τους ιστορικούς σεισμούς στην Ελλάδα. Η τρίτη αυτή έκδοση του βιβλίου οφείλεται επίσης στο γεγονός ότι υπήρξε από τότε παραγωγή νέας σημαντικής σεισμολογικής γνώσης.

Το βιβλίο αποτελείται από δέκα κεφάλαια. Στα εννέα κεφάλαια γίνεται προσπάθεια να παρουσιαστεί συνοπτικά η σύγχρονη επιστημονική γνώση στα κύρια γνωστικά αντικείμενα της Σεισμολογίας που αφορούν την Ελλάδα και στο δέκατο κεφάλαιο περιγράφονται τα μακροσεισμικά αποτελέσματα των ισχυρών σεισμών στη χώρα μας.

Το **πρώτο κεφάλαιο** είναι εισαγωγικό και περιλαμβάνει γενικές πληροφορίες για: τη θέση της Ελλάδας στο παγκόσμιο σύστημα διάρρηξης του φλοιού, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά τεκτονικής προέλευσης της Ελλάδας και των γύρω περιοχών, την ηφαιστειακή δρα-

ση στο νότιο Αιγαίο και τις βασικές γεωφυσικές ιδιότητες της περιοχής.

Το **δεύτερο κεφάλαιο** αφορά την ιστορία της Σεισμολογίας στην Ελλάδα. Σ' αυτό περιγράφονται τόσο η εξέλιξη των ιδεών πάνω στη γένεση των σεισμών από τον 6<sup>ο</sup> π.Χ. αιώνα μέχρι σήμερα όσο και η παρατηρησιακή δουλειά που έχει πραγματοποιηθεί στο χώρο αυτό. Δίνονται επίσης στο κεφάλαιο αυτό βασικές πληροφορίες σχετικά με την παρούσα κατάσταση της Σεισμολογίας στην Ελλάδα.

Το **τρίτο κεφάλαιο** είναι αφιερωμένο στη μέτρηση του μεγέθους των σεισμών στην Ελλάδα. Παρέχονται οι διαθέσιμες πληροφορίες που αφορούν το μέγεθος των σεισμών, τις διαστάσεις των σεισμικών ρηγμάτων, τη μετάθεση στις σεισμικές εστίες και το χρόνο διάρρηξης. Δίνονται επίσης στο κεφάλαιο αυτό σχέσεις που συνδέουν το μέγεθος με άλλες σεισμικές παραμέτρους.

Το **τέταρτο κεφάλαιο** καλύπτει το θέμα της σεισμικότητας στην Ελλάδα και τις γύρω περιοχές. Γίνεται αρχικά μια σύντομη ανασκόπηση της ερευνητικής δουλειάς που έχει πραγματοποιηθεί στο αντικείμενο αυτό και παρουσιάζεται η γεωγραφική κατανομή των επιφανειακών και ενδιάμεσου βάθους σεισμών με ποιοτικό τρόπο (χάρτες επικέντρων) και με ποσοτικό τρόπο (μέση περίοδος επανάληψης) με βάση τους πιο πρόσφατους καταλόγους σεισμών.

Το **πέμπτο κεφάλαιο** αναφέρεται στα θαλάσσια κύματα βαρύτητας (τσουνάμι) που σχετίζονται με σεισμούς στην Ελλάδα και τις γύρω περιοχές. Παρουσιάζεται ένας αναθεωρημένος κατάλογος των γνωστών τσουνάμι και δίνονται ορισμένα βασικά στοιχεία που αφορούν την επικινδυνότητα των τσουνάμι σ' αυτή την περιοχή.

Το **έκτο κεφάλαιο** αφορά την ενεργό τεκτονική της Ελλάδας και των γύρω περιοχών. Δίδονται οι μηχανισμοί γένεσης 177 ισχυρών επιφανειακών σεισμών ( $M \geq 5.5$ ) και δέκα πέντε ομάδων επιφανειακών μικροσεισμών καθώς και οι μηχανισμοί γένεσης 18 ισχυρών σεισμών ( $M \geq 5.5$ ) ενδιάμεσου βάθους και εξετάζεται η σεισμοτεκτονική σημασία των μη-

χανισμών αυτών. Παρουσιάζεται χάρτης 160 ρηγμάτων επιφανειακών σεισμών και χάρτης τεσσάρων ρηγμάτων σεισμών ενδιαμέσου βάθους, όπου γεννήθηκαν σεισμοί κατά τους ιστορικούς χρόνους και τα οποία καθορίστηκαν με σεισμολογικές και άλλες μεθόδους. Περιγράφονται τέλος, στο κεφάλαιο αυτό, οι λιθοσφαιρικές πλάκες και οι κινήσεις τους που επηρεάζουν την ενεργό τεκτονική της Ελλάδας.

Το **έβδομο κεφάλαιο** αφορά τη σεισμική επικινδυνότητα στην Ελλάδα. Δίνονται αρχικά πληροφορίες για τον τρόπο καθορισμού της επικινδυνότητας. Παρέχονται πληροφορίες για τις σεισμογόνες πηγές και τα σεισμογόνα ρήγματα καθώς και για τις σχέσεις απόσβεσης της ισχυρής σεισμικής κίνησης που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της σεισμικής επικινδυνότητας στην Ελλάδα. Περιγράφεται ο χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας ο οποίος περιλαμβάνεται στο Νέο Αντισεισμικό Κανονισμό και δίνονται τα τυπικά φάσματα απόκρισης που ισχύουν για τον ελληνικό χώρο καθώς και ορισμένες πληροφορίες που αφορούν τον νέο αντισεισμικό κανονισμό που ισχύει σήμερα στη χώρα μας.

Το **όγδοο κεφάλαιο** αναφέρεται στο σεισμικό κίνδυνο στην Ελλάδα. Μελετώνται οι επιδράσεις των σεισμών στις τεχνικές κατασκευές της Ελλάδας και δίνονται πληροφορίες για τα ανθρώπινα θύματα από τους σεισμούς στη χώρα μας. Δίνονται επίσης ορισμένες πληροφορίες για άλλες κοινωνικές επιπτώσεις των σεισμών στην Ελλάδα.

Στο **ένατο κεφάλαιο** περιγράφεται η ερευνητική προσπάθεια για την πρόγνωση των σεισμών στην Ελλάδα. Γίνεται σύντομη ανασκόπηση της σχετικής έρευνας και αναλύονται λεπτομερέστερα το μοντέλο πρόγνωσης του χρόνου και του μεγέθους των ισχυρών κύριων σεισμών, η μετανάστευση της σεισμικής δράσης, η μέθοδος της επιταχυνόμενης σεισμικής παραμόρφωσης, η μεταβολή της στατικής τάσης από τη γένεση των ισχυρών σεισμών και οι ιδιότητες των προσεισμών και των μετασεισμών. Δίνονται επίσης ορισμένες πληροφορίες για τα μακροσκοπικά πρόδρομα φαινόμενα.

Στο **δέκατο κεφάλαιο** του βιβλίου δίνονται μακροσεισμικές πληροφορίες για όλους τους γνωστούς σ' εμάς ισχυρούς κύριους σεισμούς ( $M \geq 6.0$ ) οι οποίοι έγιναν στην Ελλάδα και τις γύρω περιοχές ( $34^\circ \text{N} - 43^\circ \text{N}$ ,  $18^\circ \text{E} - 30^\circ \text{E}$ ) κατά την περίοδο 550 π.Χ. – 2001. Δίνονται επίσης οι βασικές παράμετροι (ημερομηνία, επίκεντρο, μέγεθος) για κάθε έναν από τους σεισμούς αυτούς.

Το ιστορικό υλικό που περιλαμβάνεται σ' αυτό το βιβλίο είναι αποτέλεσμα συνεργασίας πολλών ειδικών στο αντικείμενο αλλά και απλών πολιτών. Η σημαντικότερη συμβολή στη συλλογή του ιστορικού υλικού

οφείλεται στους Μητροπολίτες Ξάνθης Αντώνιο και Λέσβου Καλλίνικο καθώς και σε πανεπιστημιακούς δασκάλους και άλλους επιστήμονες όπως είναι οι: Π. Κομνηνάκης, Γ. Καρακαϊσής, Ε. Παπαδημητρίου, Χ. Παπαϊωάννου, Π. Χατζηδημητρίου, Δ. Παναγιωτόπουλος, Α. Κυρατζή, Α. Κυριακίδης, Δ. Μουντράκης, Β. Κοντονάσιος, Α. Πετρονώτης, Ι. Σκούρτης, Ε. Γιαλύτη, Σ. Στείρος, Γρ. Σίσκας, Σ. Καδάς, Σ. Κίσσας, Γ. Χιονίδης, Γ. Χουτζαΐος.

Διάφορα τμήματα του βιβλίου βασίζονται σε επιστημονική δουλειά που δημοσιεύθηκε πρόσφατα ή που βρίσκεται υπό δημοσίευση των Β. Παπαζάχου, Κ. Παπαζάχου, Χ. Παπαϊωάννου, Α. Κυρατζή, Γ. Καρακαϊσής, Ε. Παπαδημητρίου, Ν. Θεοδουλίδης, Δ. Παπαναγιωτόπουλου, Π. Χατζηδημητρίου, Θ. Τσάπανου, Ε. Σκορδύλη, Β. Μάργαρη και Β. Καρακώστα.

Τα κείμενα διάβασαν και έκαναν διάφορες παρατηρήσεις οι Γ. Καρακαϊσής, Ε. Παπαδημητρίου, Κ. Παπαζάχος, Χ. Παπαϊωάννου, Α. Κυρατζή, Ν. Θεοδουλίδης, Π. Χατζηδημητρίου. Η εκπόνηση των σχημάτων έγινε από τον Κ. Παπαζάχο αλλά βοήθησαν και οι Χ. Παπαϊωάννου, Γ. Καρακαϊσής και Α. Σαββαΐδης. Ο Κώστας Παπαζάχος συμμετείχε στην επεξεργασία του υλικού, στη συγγραφή πολλών τμημάτων του βιβλίου και στη διαμόρφωση του κειμένου για την εκτύπωση. Η Ελευθερία Παπαδημητρίου έγραψε το τμήμα 9.5 του 9ου κεφαλαίου. Πολλά σχήματα του βιβλίου έγιναν με τη χρήση του GMT (Generic Mapping Tools, Wessel and Smith 1995). Η τεχνική υποστήριξη (δακτυλογράφηση, κλπ) της Δ. Βλάχου και Ε. Κωνσταντινίδης αποτέλεσε σημαντική βοήθεια.

Είμαστε ευγνώμονες σ' όλους που αναφέρονται παραπάνω γιατί χωρίς τη βοήθειά τους δε μπορούσε να δημοσιευθεί το βιβλίο αυτό.

Μεταξύ της προηγούμενης και της παρούσας έκδοσης του βιβλίου έφυγαν από κοντά μας τρεις διακεκριμένοι σεισμολόγοι, οι καθηγητές Σεισμολογίας Α. Γαλανόπουλος και Ι. Δρακόπουλος και ο στενός μας φίλος ερευνητής Π. Κομνηνάκης. Η συμβολή και των τριών στην ανάπτυξη της Σεισμολογίας στη χώρα μας υπήρξε καθοριστική. Στο παρόν βιβλίο περιέχεται σημαντικό μέρος από την επιστημονική γνώση που έχει παραχθεί από τους διαπρεπείς αυτούς επιστήμονες. Τους ευγνωμονούμε γι' αυτό και εκφράζουμε τη βαθειά μας λύπη για το θάνατό τους.

Ευχαριστούμε θερμά τον εκδοτικό οίκο ΖΗΤΗ και όλους που συνέβαλαν στη γρήγορη και άριστη εκτύπωση του βιβλίου.

**Βασίλης Παπαζάχος**  
**Κατερίνα Παπαζάχου**

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	9
1.1. Τα Δύο Συστήματα Διάρρηξης του Φλοιού της Γης και η Θέση της Ελλάδας στο Ηπειρωτικό Σύστημα Διάρρηξης	9
1.2. Οι Σεισμικές Ζώνες της Γης και η Σεισμική Δράση στην Ελλάδα	10
1.3. Τοπογραφικά Χαρακτηριστικά Τεκτονικής Προέλευσης στην Ελλάδα	13
1.4. Ηφαιστειακή Δράση στην Ελλάδα	14
1.5. Δομή του Φλοιού και του Πάνω Μανδύα στην Ελλάδα	15
1.6. Άλλες Γεωφυσικές Ιδιότητες του Ελλαδικού Χώρου	19
Βιβλιογραφία	19
<b>2. ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ</b>	23
2.1. Εισαγωγή	23
2.2. Κλασική Περίοδος, 550π.Χ. – 300μ.Χ.	26
2.3. Βυζαντινή Περίοδος, 300 – 1550	30
2.4. Περίοδος Εμφάνισης της Νέας Επιστήμης, 1550 – 1845	30
2.5. Η Νέα Περίοδος της Σεισμολογίας στην Ελλάδα, 1845 – 2001	31
Βιβλιογραφία	37
<b>3. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ</b>	39
3.1. Εισαγωγή	39
3.2. Μέγεθος Βασισμένο σε Καταγραφές των Σεισμογράφων Mainka ή Wiechert	40
3.3. Μακροσεισμικό Μέγεθος	40
3.4. Τοπικό Μέγεθος	41
3.5. Υπολογισμός του Μεγέθους Ροπής των Σεισμών της Ελλάδας	42
3.6. Διαστάσεις των Ρηγμάτων και Μεταθέσεις στις Εστίες των Σεισμών	44
3.7. Χρόνος Διάρρηξης	45
Βιβλιογραφία	46

<b>4. Η ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ</b>	49
4.1. Εισαγωγή	49
4.2. Νέος Κατάλογος Σεισμών και Μελέτη της Σεισμικότητας στην Ελλάδα	50
4.3. Γενικές Πληροφορίες για τη Σεισμικότητα της Ελλάδας	53
4.4. Γεωγραφική Κατανομή της Επιφανειακής Σεισμικότητας στην Ελλάδα	55
4.5. Γεωγραφική Κατανομή της Σεισμικότητας Ενδιαμέσου Βάθους στο Ελληνικό Τόξο	56
<i>Βιβλιογραφία</i>	58
<b>5. ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΚΥΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΖΟΜΕΝΑ ΜΕ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ</b>	61
5.1. Εισαγωγή	61
5.2. Κατάλογος των Τσουνάμι στην Ελλάδα	61
5.3. Επικινδυνότητα των Τσουνάμι στην Ελλάδα	62
<i>Βιβλιογραφία</i>	66
<b>6. ΕΝΕΡΓΟΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΓΥΡΩ ΠΕΡΙΟΧΕΣ</b>	67
6.1. Εισαγωγή	67
6.2. Η Σεισμική Ζώνη Benioff στο Νότιο Αιγαίο	68
6.3. Μηχανισμοί Γένεσης των Σεισμών στην Ελλάδα	69
6.3.1. Λύσεις μηχανισμών γένεσης επιφανειακών σεισμών	69
6.3.2. Λύσεις μηχανισμών γένεσης σεισμών ενδιαμέσου βάθους στο νότιο Αιγαίο	78
6.4. Τα Σεισμικά Ρήγματα των Επιφανειακών Σεισμών στην Ελλάδα	79
6.4.1. Σεισμικά ρήγματα με επιφανειακή διάρρηξη	79
6.4.2. Σεισμικά ρήγματα που καθορίστηκαν από τη χωρική κατανομή των εστιών μικρών σεισμών	80
6.4.3. Τα κύρια ρήγματα των επιφανειακών σεισμών στην Ελλάδα	81
6.4.4. Τα κύρια ρήγματα των σεισμών ενδιαμέσου βάθους	84
6.5. Ενεργός Τεκτονική Παραμόρφωση του Φλοιού στην Ελλάδα	84
6.6. Λιθοσφαιρικές Πλάκες και οι Κινήσεις τους που Επηρεάζουν την Ενεργό Τεκτονική στην Ελλάδα	86
<i>Βιβλιογραφία</i>	91
<b>7. Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ</b>	97
7.1. Εισαγωγή	97
7.2. Βασικές Σχέσεις για την Εκτίμηση της Σεισμικής Επικινδυνότητας	98
7.3. Σεισμογόνες Πηγές και Σεισμογόνα Ρήγματα	99
7.4. Απόσβεση της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης στην Ελλάδα	101
7.5. Γεωγραφική Κατανομή της Σεισμικής Επικινδυνότητας	101

7.6. Φάσματα Απόκρισης στην Ελλάδα	103
7.7. Μερικά Στοιχεία για τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό	104
Βιβλιογραφία	104
<b>8. Ο ΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ</b>	107
8.1. Εισαγωγή	107
8.2. Κατανομή της Συχνότητας των Μέγιστων Μακροσεισμικών Εντάσεων	107
8.3. Βλάβες Κτιρίων στην Ελλάδα	108
8.4. Ανθρώπινα Θύματα από Σεισμούς στην Ελλάδα	110
8.5. Άλλες Κοινωνικές Συνέπειες των Σεισμών στην Ελλάδα	116
Βιβλιογραφία	118
<b>9. ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ</b>	119
9.1. Εισαγωγή	119
9.2. Το Περιοχικό Μοντέλο Πρόγνωσης του Χρόνου και του Μεγέθους των Σεισμών	120
9.3. Μετανάστευση της Σεισμικής Δράσης	121
9.4. Μέθοδος της Επιταχυνόμενης Σεισμικής Παραμόρφωσης	122
9.5. Μεταβολή της Στατικής Τάσης λόγω Γένεσης Προηγούμενων Σεισμών	127
9.6. Προσεισμοί στην Ελλάδα	130
9.7. Μετασεισμοί στην Ελλάδα	131
9.8. Μακροσκοπικά Πρόδρομα Φαινόμενα των Σεισμών στην Ελλάδα	135
Βιβλιογραφία	136
<b>10. ΜΑΚΡΟΣΕΙΣΜΙΚΑ ΚΑΙ ΑΛΛΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΙΣΧΥΡΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΓΥΡΩ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 550π.Χ. – 2001 μ.Χ.</b>	141
10.1. Εισαγωγή	141
10.2. Καθορισμός των Παραμέτρων των Σεισμών	143
10.2.1. Χρόνος γένεσης σεισμών	143
10.2.2. Μακροσεισμική ένταση	144
10.2.3. Επίκεντρα και εστιακά βάθη	145
10.2.4. Μεγέθη σεισμών	147
10.3. Παράμετροι Ρηγμάτων Επιφανειακών Σεισμών	147
10.4. Παράμετροι Ρηγμάτων Σεισμών Ενδιαμέσου Βάθους	157
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΙΣΧΥΡΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	159
Βιβλιογραφία	278

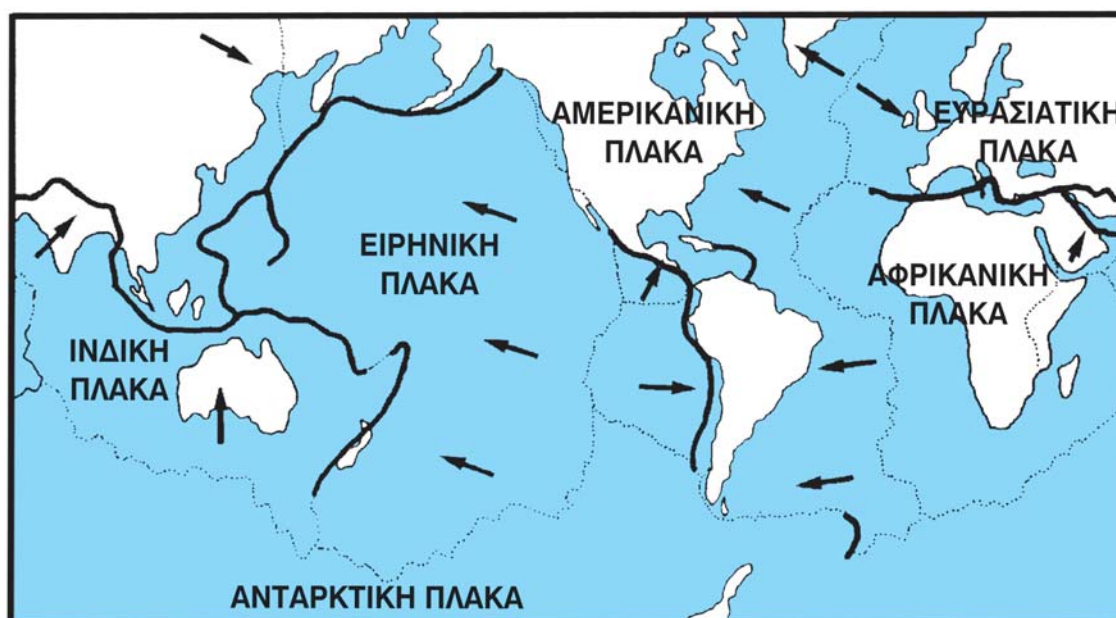


## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

**1.1. Τα Δύο Συστήματα Διάρρηξης του Φλοιού της Γης και η Θέση της Ελλάδας στο Ηπειρωτικό Σύστημα Διάρρηξης**

**Ο**ι σεισμοί είναι γεωδυναμικά φαινόμενα, όπως είναι τα ηφαίστεια, τα τεκτονικής προέλευσης τοπογραφικά χαρακτηριστικά (όρη, ηπειρωτικές λεκάνες, ωκεάνιες τάφροι, κλπ), οι παραμορφώσεις και διαρρήξεις του γήινου φλοιού, οι γεωθερμικές εκδηλώσεις (θερμές πηγές, γεωθερμικά πεδία), κλπ. Πολλά από τα φαινόμενα αυτά που παρατηρούνται σήμερα είναι συνέπειες παλαιότερων γεωλογικών διαδι-

κασιών και για το λόγο αυτό δε συνδέονται άμεσα με την παρούσα σεισμική δράση. Η παρούσα σεισμική δράση σε μια περιοχή και τα άλλα γεωδυναμικά φαινόμενα τα οποία συνδέονται άμεσα με τη δράση αυτή είναι αποτέλεσμα σχετικά πρόσφατης γεωλογικής διαδικασίας που συνήθως ονομάζεται **ενεργός τεκτονική** της περιοχής. Η ηλικία αυτής της διαδικασίας είναι σχετικά μικρή (<10 εκατομμύρια χρόνια)



*Σχ. 1.1. Τα δύο συστήματα των ζωνών διάρρηξης της Γης (με παχιές γραμμές παριστάνεται το ηπειρωτικό σύστημα διάρρηξης και με στιγμένες το σύστημα των μεσοωκεάνιων ράχων). Η Ελλάδα βρίσκεται στο τμήμα του ηπειρωτικού συστήματος διάρρηξης που χωρίζει την Ευρασιατική λιθοσφαιρική πλάκα από την Αφρικανική λιθοσφαιρική πλάκα.*



σε σχέση με την ηλικία της Γης (4.6 δισεκατομμύρια χρόνια) και με την ηλικία γένεσης του πρώτου ηπειρωτικού φλοιού (3.8 δισεκατομμύρια χρόνια).

Τα αίτια των σεισμών και των άλλων γεωδυναμικών φαινομένων βρίσκονται στο εσωτερικό της Γης και ειδικά μέσα στο **φλοιό**, ο οποίος έχει ένα μέσο πάχος ίσο προς 35km κάτω από τις ηπείρους και 7km κάτω από τους ωκεανούς, καθώς και κάτω από το φλοιό στο **μανδύα** της Γης.

Η ένταση και η μορφή της ενεργού τεκτονικής διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή. Υπάρχουν περιοχές όπου η τεκτονική δράση είναι υψηλή σήμερα και άλλες περιοχές όπου είναι ασθενής σήμερα αλλά σ' ορισμένες απ' αυτές ήταν υψηλή στο γεωλογικό παρελθόν. Τα σημαντικότερα γεωδυναμικά φαινόμενα που παρατηρούνται σήμερα στην επιφάνεια της Γης είναι αποτέλεσμα της ενεργού τεκτονικής δράσης που λαμβάνει χώρα σε ορισμένες ζώνες της Γης. Αυτές οι ζώνες χωρίζονται σε δύο **συστήματα διάρρηξης** (σχ. 1.1) και ορίζουν τα όρια των μεγάλων λιθοσφαιρικών πλακών. Αυτά είναι: το ηπειρωτικό σύστημα διάρρηξης (παχιές γραμμές στο σχ. 1.1) και το σύστημα των μεσοωκεάνιων ράχων (στιγμένες γραμμές στο σχ. 1.1).

Το **ηπειρωτικό σύστημα διάρρηξης** αποτελείται από την Ευρασιατική – Μελανησιακή Ζώνη Διάρρηξης (Γιβραλτάρ – Άλπεις – Βαλκάνια – Ιράν – Ιμαλία – Βιρμανία – Ινδονησία) και την Περιειρηνική Ζώνη Διάρρηξης (οι Περιειρηνικές παράκτιες περιοχές με εξαίρεση τις παράκτιες περιοχές της Βόρειας Αμερικής). Στο σύστημα αυτό βρίσκονται όλες

οι νέες οροσειρές, τα νησιωτικά τόξα, τα ανδειτικά ηφαίστεια, οι εστίες όλων σχεδόν των σεισμών βάθους ( $h > 300\text{km}$ ) και οι περισσότερες εστίες των επιφανειακών σεισμών. Το σύστημα αυτό αποτελεί περιοχή σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών και καταστροφής του φλοιού της Γης.

Οι **μεσο-ωκεάνιες ράχες** είναι ανυψώσεις του ωκεάνιου φλοιού οι οποίες διατρέχουν τον Ατλαντικό ωκεανό από βορρά προς νότο και διασχίζουν τον Ινδικό και τον Ειρηνικό Ωκεανό. Σε μερικές θέσεις τα ύψη αυτών των ράχων (από τον πυθμένα της θάλασσας) είναι μεγαλύτερα από 3000m. Αυτό το σύστημα διάρρηξης διασχίζει και ηπειρωτικές περιοχές, όπως είναι η ανατολική Αφρική και η δυτική βόρεια Αμερική. Στο σύστημα διάρρηξης των μεσο-ωκεάνιων ράχων συμβαίνουν μόνο επιφανειακοί σεισμοί ( $h < 60\text{ km}$ ). Σ' αυτό το σύστημα διάρρηξης πραγματοποιείται απόκλιση λιθοσφαιρικών πλακών και γένεση νέου φλοιού.

Το σχήμα (1.1) δείχνει ότι η Ελλάδα βρίσκεται στην Ευρασιατική – Μελανησιακή ζώνη του ηπειρωτικού συστήματος διάρρηξης και το **Ελληνικό τόξο** (Ιόνια νησιά – Κρήτη – Ρόδος) είναι ένα από τα χαρακτηριστικά νησιωτικά τόξα του συστήματος αυτού. Δηλαδή, η Ελλάδα βρίσκεται στο όριο σύγκλισης δύο μεγάλων λιθοσφαιρικών πλακών, της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο η ενεργός τεκτονική (σεισμικότητα, ηφαιστειότητα, ορογένεση, παραμόρφωση φλοιού, γεωθερμικές εκδηλώσεις, κλπ) είναι υψηλή στην περιοχή της Ελλάδας.

## 1.2. Οι Σεισμικές Ζώνες της Γης και η Σεισμική Δράση στην Ελλάδα

Στο σχήμα (1.2a) φαίνεται η γεωγραφική κατανομή των επικέντρων για τέσσερα πλήρη δείγματα επιφανειακών σεισμών ( $h \leq 60\text{km}$ ) που έγιναν στη Γη κατά τη διάρκεια της περιόδου 1894 – 1992. Σύγκριση αυτού του χάρτη με το χάρτη του σχήματος (1.1) δείχνει καθαρά ότι η επιφανειακή σεισμική δράση είναι κατανεμημένη κυρίως κατά μήκος των ζωνών των δύο συστημάτων διάρρηξης. Το ίδιο σχήμα (1.2a) δείχνει επίσης ότι η σεισμική δράση στο ωκεάνιο σύστημα διάρρηξης σχηματίζει στενές σεισμικές ζώνες οι οποίες συμπίπτουν με τις ωκεάνιες ράχες. Αντίθετα, η σεισμική δράση στο ηπειρωτικό σύστημα διάρρηξης είναι διάσπαρτη, ιδιαίτερα στη Μεσογειακή – Μελανησιακή ζώνη διάρρηξης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίον η σεισμική δράση

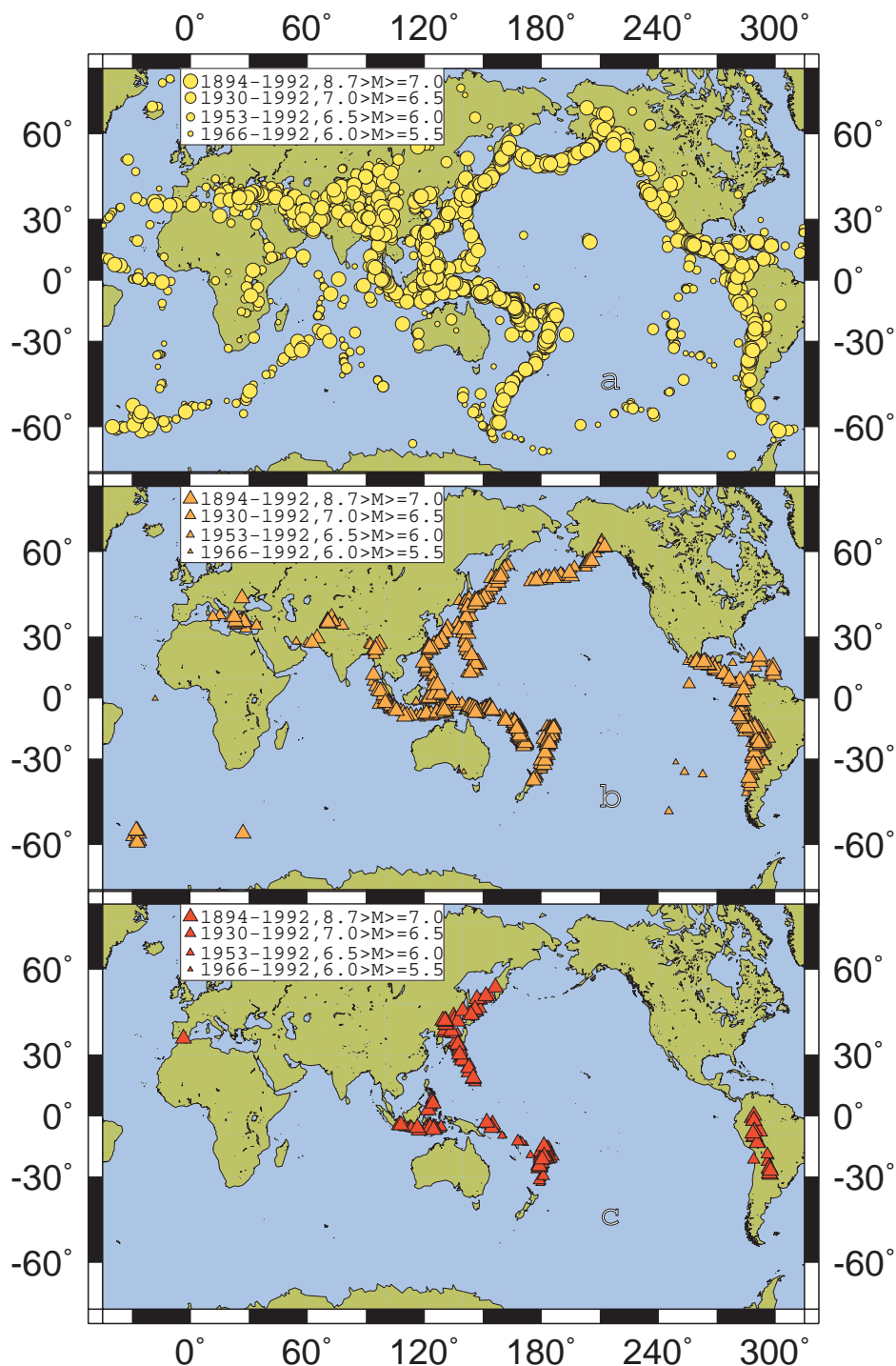
στην Ελλάδα και τις γύρω περιοχές είναι κατανεμημένη χωρικά σε μια σχετικά ευρεία περιοχή, αφού αυτή η περιοχή ανήκει στην Ευρασιατική – Μελανησιακή ζώνη του ηπειρωτικού συστήματος διάρρηξης όπου η ενεργός τεκτονική είναι πολύπλοκη.

Το σχήμα (1.2b) δείχνει τα επίκεντρα τεσσάρων πλήρων δειγμάτων σεισμών ενδιαμέσου βάθους ( $60\text{km} < h \leq 300\text{km}$ ) οι οποίοι έγιναν σ' όλη τη Γη κατά τη χρονική περίοδο 1894 – 1992. Σεισμοί ενδιαμέσου βάθους δεν γίνονται στις ωκεάνιες ράχες αλλά μόνο στο ηπειρωτικό σύστημα διάρρηξης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τέτοιοι σεισμοί γίνονται και στην Ελλάδα. Είναι γνωστό, όμως, ότι σεισμοί ενδιαμέσου βάθους δεν συμβαίνουν σ' όλη την Ελλάδα αλλά μόνο στο νότιο μέρος της κατά μήκος του κοίλου

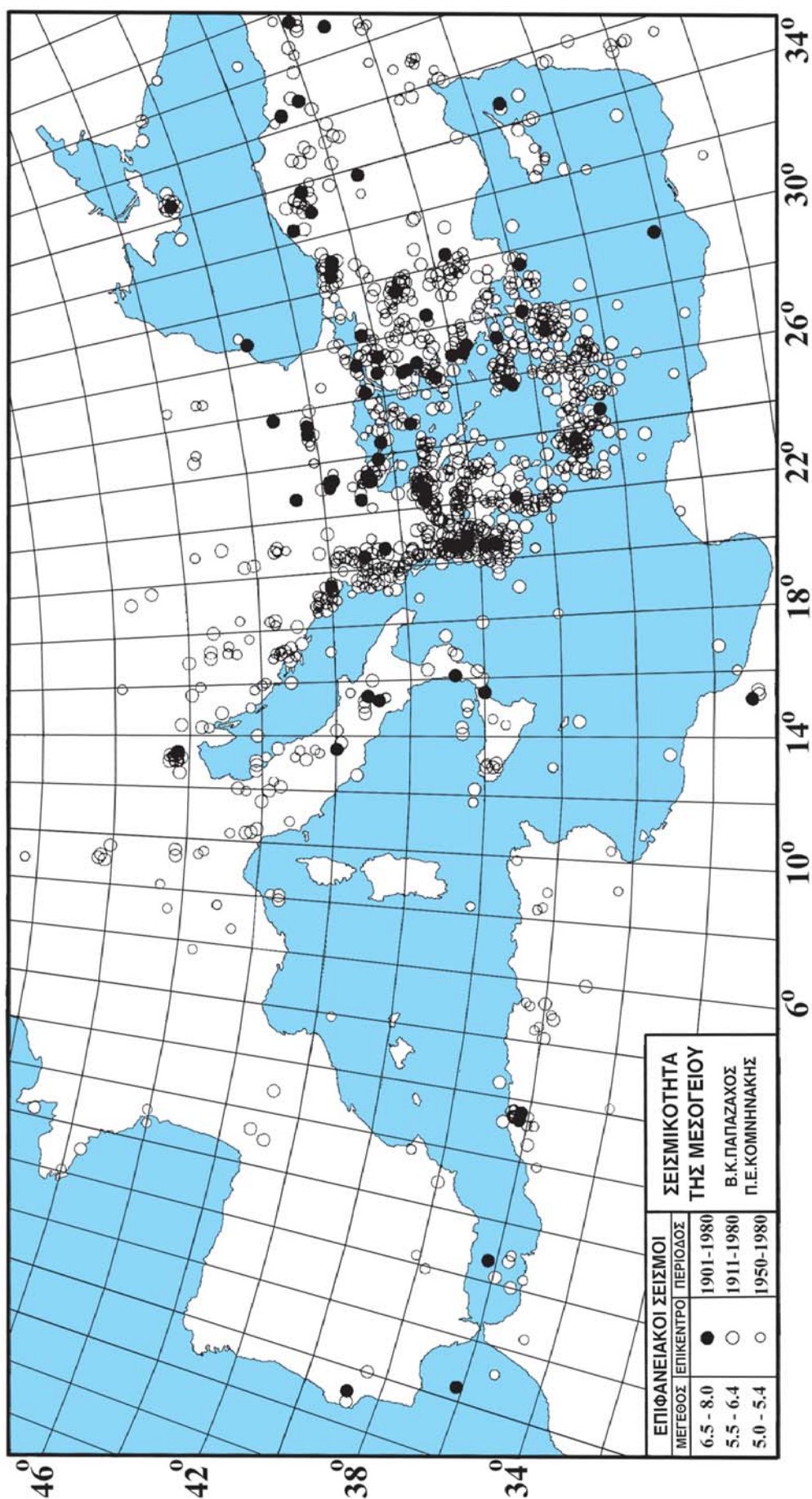
μέρους του Ελληνικού τόξου και τα βάθη τους κυμαίνονται μεταξύ 60km και 180km (Papazachos and Comninakis 1971, Papazachos et al. 2000).

Το σχήμα (1.2c) δείχνει τα επίκεντρα τεσσάρων πλήρων δειγμάτων σεισμών βάθους ( $300\text{km} < h \leq 720\text{km}$ ) που έγιναν στη Γη κατά την περίοδο 1894

– 1992. Τέτοιοι σεισμοί γίνονται στο δυτικό Ειρηνικό ωκεανό και στη Νότια Αμερική με εξαίρεση το σεισμό που έγινε στις 29 Μαρτίου 1954 στη νότια Ισπανία ( $37.0^\circ \text{N}$ ,  $03.6^\circ \text{W}$ ,  $h = 640\text{km}$ ,  $M = 7.1$ ). Δεν γίνονται σεισμοί μεγάλου βάθους στην Ελλάδα.



Σχ. 1.2. Επίκεντρα τεσσάρων πλήρων δειγμάτων: a) Επιφανειακών σεισμών ( $h \leq 60\text{km}$ ), b) σεισμών ενδιάμεσου βάθους ( $60\text{km} < h \leq 300\text{km}$ ), c) σεισμών βάθους ( $300\text{km} < h \leq 720\text{km}$ ) οι οποίοι έγιναν στη Γη κατά την ενόργανη περίοδο (Tsapanos and Papazachos 1998).



Σχ. 1.3. Γεωγραφική κατανομή των επικέντρων τριών πλήρων δεγμάτων επιφανειακών σεισμών οι οποίοι έγιναν στην περιοχή της Μεσογείου. Είναι φανερό ότι η σεισμική δράση στην Ελλάδα είναι υψηλή.



Το σχήμα (1.3) δείχνει τη γεωγραφική κατανομή τριών πλήρων δειγμάτων επιφανειακών σεισμών ( $h \leq 60\text{km}$ ) οι οποίοι έγιναν στην περιοχή της Μεσογείου κατά τον παρόντα αιώνα (Comninakis and Papazachos 1978, και πρόσθετα στοιχεία μέχρι το 1980). Οι περισσότεροι από τους σεισμούς αυτούς

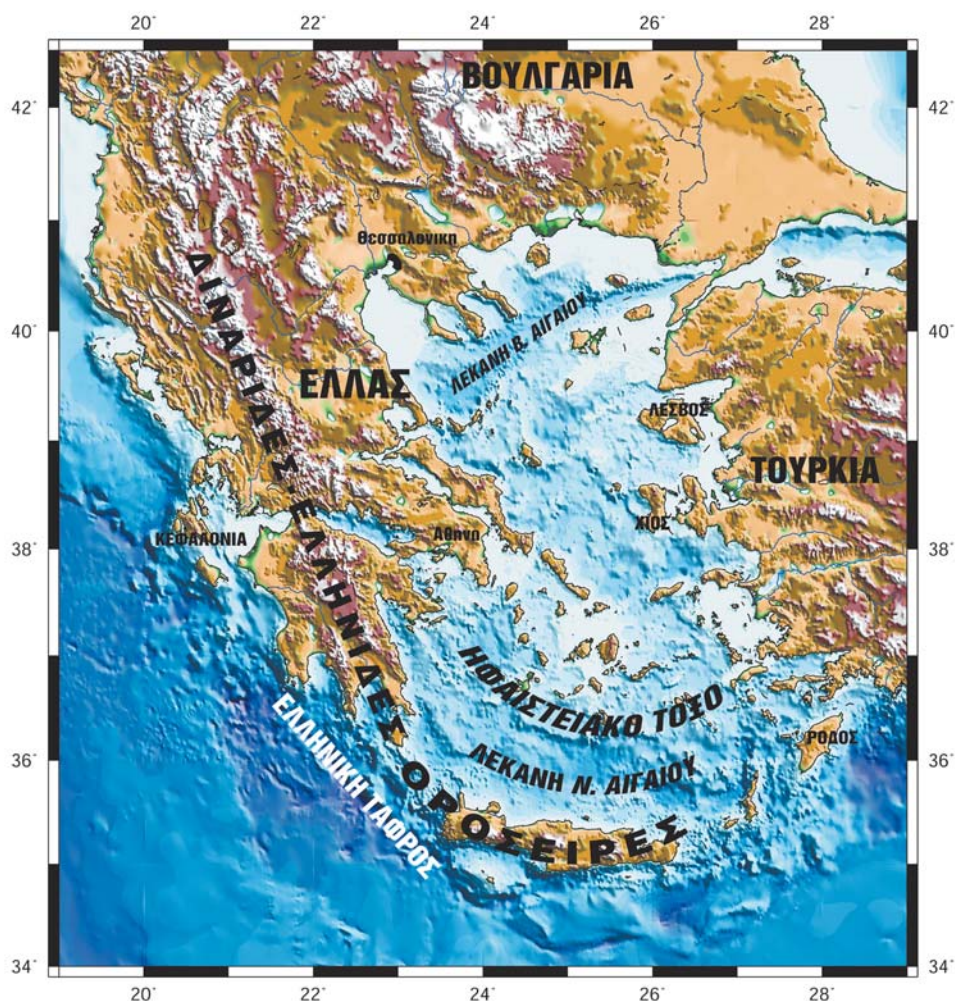
γίνονται στην Ελλάδα και τις γύρω περιοχές. Αυτή η υψηλή σεισμική δράση στην Ελλάδα δε μπορεί να αποδοθεί μόνο στη σύγκρουση μεταξύ της Αφρικανικής πλάκας και της Ευρασιατικής πλάκας αλλά και σε πρόσθετες αιτίες τις οποίες θα αναφέρουμε στο έκτο κεφάλαιο.

### 1.3. Τοπογραφικά Χαρακτηριστικά Τεκτονικής Προέλευσης στην Ελλάδα

**Τ**α πιο ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά τεκτονικής προέλευσης στην περιοχή αυτή είναι η Ελληνική Τάφρος, το Ελληνικό Τόξο και η λεκάνη του βορείου Αιγαίου. Το σχήμα (1.4) δείχνει την Ελληνική Τάφρο, τον κύριο άξονα της Αλπικής πτύχωσης στην περιοχή της Ελλάδας (Δυναρίδες – Ελληνίδες οροσειρές), το ηφαιστειακό τμήμα του Ελληνικού τόξου, τη λεκάνη του νοτίου Αιγαίου (Κρητικό πέλαγος) και τη λεκάνη του βορείου Αιγαίου.

Η **Ελληνική Τάφρος** αποτελείται από σειρά γραμμικών τάφρων μικρότερου μήκους (τάφροι του Πλινίου και του Στράβωνα νοτιοανατολικά της Κρήτης κλπ). Αυτή είναι παράλληλη προς το Ελληνικό Τόξο και παρόμοια, ως προς πολλές ιδιότητες, με τις ωκεάνιες τάφρους που βρίσκονται στα κυρτά μέρη των νησιωτικών τόξων όπου πραγματοποιείται σύγκλιση λιθοσφαιρικών πλακών.

Το **Ελληνικό Τόξο** αποτελείται από το εξωτερι-



Σχ. 1.4. Τα κύρια τοπογραφικά χαρακτηριστικά τεκτονικής προέλευσης στην Ελλάδα και τις γύρω περιοχές.

κό **ιζηματογενές τόξο**, το οποίο συνδέει τις Δυναρικές Άλπεις με τις Τουρκικές Ταυρίδες, και το εσωτερικό **ηφαιστειακό τόξο**, το οποίο είναι παράλληλο προς το ιζηματογενές τόξο και βρίσκεται σε μια μέση απόσταση 120km απ' αυτό (Parazachos and Comninakis 1971). Το ιζηματογενές τόξο (νότια οροσειρά των Ελληνίδων, Ιόνια νησιά, Κρήτη, Κάρπαθος, Ρόδος) αποτελείται από Παλαιοζωικά μέχρι Τριτογενή πετρώματα, ενώ το ηφαιστειακό τόξο από διάφορα ηφαιστειακά νησιά, ενεργά ανδεδειγμένα ηφαίστεια (Μέθανα, Σαντορίνη, Νίσυρος), θει-

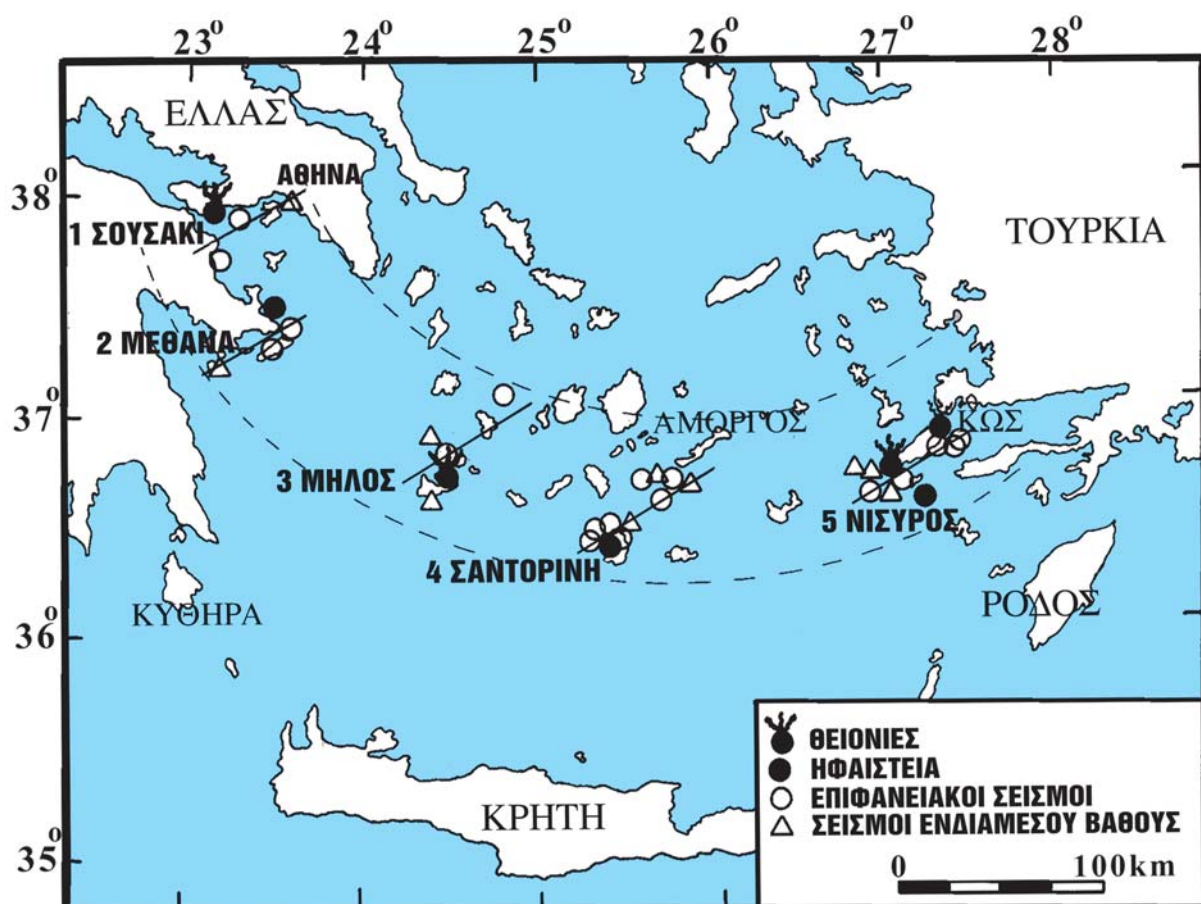
ονίες και ατμίδες (Σουσάκι, Μήλος, Κως). Μεταξύ του ιζηματογενούς και του ηφαιστειακού τόξου υπάρχει το Κρητικό πέλαγος (λεκάνη του νοτίου Αιγαίου) με μέγιστο βάθος θάλασσας περίπου 2000m.

Το πιο ενδιαφέρον τοπογραφικό χαρακτηριστικό τεκτονικής προέλευσης στο βόρειο Αιγαίο είναι η λεκάνη του βορείου Αιγαίου με μέγιστο βάθος θαλάσσιου πυθμένα περίπου 1500m. Συνέχιση της λεκάνης αυτής προς τα ανατολικά αποτελούν οι μικρές λεκάνες της θάλασσας του Μαρμαρά.

#### 1.4. Ηφαιστειακή Δράση στην Ελλάδα

**Κ**ατά τα τελευταία 4 εκατομμύρια χρόνια (Πλειο-Τεταρτογενές) εκδηλώσεις ηφαιστειακής δράσης συνέβησαν σε διάφορα μέρη της Ελλάδας (Σερβομακεδονική ζώνη, Αλμωπία, Θεσσαλία, κλπ), αλλά έντονη ηφαιστειακή δράση συνέβη μόνο κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου στο νότιο Αιγαίο, όπου

τρία ηφαιστειακά κέντρα (Μέθανα, Σαντορίνη, Νίσυρος) είναι ενεργά ηφαίστεια (πραγματοποιήθηκαν εκρήξεις κατά τους ιστορικούς χρόνους) και άλλα τρία (Σουσάκι, Μήλος, Κως) αποτελούν πεδία θειονιών και ατμίδων (Georgalas 1962, Fytikas et al. 1985).



Σχ. 1.5. Τα πέντε σεισμοηφαιστειακά κέντρα στο ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου (Parazachos and Panagiotopoulos 1993).



Τα ηφαιστειακά κέντρα, τα επίκεντρα των ισχυρών επιφανειακών σεισμών και τα επίκεντρα των ισχυρών σεισμών ενδιαμέσου βάθους ( $120\text{km} \leq h \leq 180\text{km}$ ) στο ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου σχηματίζουν πέντε **σεισμοηφαιστειακά γραμμικά κέντρα** (Σουσάκι, Μέθανα, Μήλος, Σαντορίνη, Νίσυρος) με διεύθυνση  $B60^\circ A$  (σχ. 1.5) Τα ηφαίστεια και οι ισχυροί επιφανειακοί σεισμοί αυτών των κέντρων οφείλονται σε πέντε κανονικά ρήγματα ίδιας διεύθυνσης, ενώ οι σεισμοί ενδιαμέσου βάθους οφείλονται σε πέντε αντίστοιχες ζώνες διάρρηξης που βρίσκονται στο μπροστινό μέρος της βυθιζόμενης λιθόσφαιρας σε βάθη 120 – 180km (Papazachos and Panagiotopoulos 1993).

Μόνο μία ασθενής έκρηξη για το ηφαίστειο των Μεθάνων (250 π.Χ.) και πέντε επίσης ασθενείς εκρήξεις για το ηφαίστειο της Νισύρου (1422, 1830, 1871, 1873, 1888) είναι γνωστές, αλλά το ηφαίστειο της Νισύρου έχει πολύ εντυπωσιακή καλδέρα.

Το σημαντικότερο και πιο επικίνδυνο ηφαίστειο στην Ελλάδα είναι της Θήρας (Σαντορίνης). Αυτό έχει πολύ μεγάλη καλδέρα η οποία σχηματίστηκε το 1640 π.Χ. Υπάρχουν δεκατρείς γνωστές ιστορικές εκρήξεις αυτού του ηφαιστίου (197 π.Χ., 19 μ.Χ., 46, 726, 1457, 1508, 1573, 1650, 1707, 1866, 1925, 1939, 1950) μερικές από τις οποίες ήταν πολύ ισχυρές, προκάλεσαν βλάβες και σκότωσαν ανθρώπους

(π.χ. το 1650). Παρατηρήθηκε (Papazachos 1989) ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος (ένταση) των εκρήξεων μιας ηφαιστειακής φάσης στην καλδέρα της Σαντορίνης τόσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια,  $\tau$ , της φάσης και ότι ισχύει η ακόλουθη σχέση μεταξύ της διάρκειας,  $\tau$  (σε έτη), κάθε ηφαιστειακής φάσης και του χρόνου,  $T$  (σε έτη), που παρήλθε από την προηγούμενη ηφαιστειακή φάση:

$$\tau = 1.61 + 0.02T \quad (1.1)$$

Δηλαδή, για χρόνους  $T = 10\text{yr}$ ,  $50\text{yr}$ ,  $100\text{yr}$ ,  $150\text{yr}$  από την προηγούμενη εκρηκτική φάση, οι αναμενόμενες εκρηκτικές φάσεις διαρκούν  $\tau = 1.8\text{yr}$ ,  $2.6\text{yr}$ ,  $3.6\text{yr}$  και  $4.6\text{yr}$ , αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι το **μοντέλο πρόγνωσης του μεγέθους** ισχύει για τις εκρήξεις στην καλδέρα της Σαντορίνης, το οποίο είναι παρόμοιο με το μοντέλο πρόγνωσης του μεγέθους της σεισμικής ολίσθησης. Η τελευταία ισχυρή έκρηξη για την οποία ισχύει η σχέση (1.1) είναι αυτή του 1939. Από τότε πέρασαν 63 χρόνια που, σύμφωνα με τη σχέση αυτή, αντιστοιχούν σε  $\tau = 2.9$  χρόνια. Αυτό σημαίνει ότι η διαθέσιμη ηφαιστειακή ενέργεια στην καλδέρα της Σαντορίνης σήμερα μπορεί να παράγει μια εκρηκτική φάση που θα διαρκέσει 2.9 χρόνια. Μια τέτοια φάση θα είναι παρόμοιου μεγέθους με τη εκρηκτική φάση του 1925.

## 1.5. Δομή του Φλοιού και του Πάνω Μανδύα στην Ελλάδα

**Σ**εισμικά δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί πολύ αποτελεσματικά για τον καθορισμό της δομής ταχύτητας του φλοιού και του πάνω μανδύα στην Ελλάδα. Τέτοια δεδομένα έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της δομής απόσβεσης σ' αυτή την περιοχή.

Βασικές γνώσεις για το πάχος των στρωμάτων του φλοιού και για τη μέση ταχύτητα σε κάθε ένα από τα στρώματα αυτά στον ελληνικό χώρο έχουν αποκτηθεί με την εφαρμογή κλασικών μοντέλων σε χρόνους διαδρομής κυμάτων χώρου (κυμάτων P ή S) σεισμών (Papazachos et al. 1966, Παναγιωτόπουλος 1984, Panagiotopoulos and Papazachos 1985, Plomerova et al. 1989) και σε δεδομένα σκέδασης επιφανειακών κυμάτων (Papazachos et al. 1967, Papazachos 1969, Payo 1967, 1969). Παραπέρα πληροφορίες για τη βαθιά δομή ταχύτητας αυτής της περιοχής αποκτήθηκαν με τη χρησιμοποίηση

χρόνων διαδρομής κυμάτων τα οποία δημιουργήθηκαν με τεχνητές εκρήξεις (Makris 1973, 1975, 1978, Makris et al. 1983, Δεληήμπασης και συνεργάτες 1988, Βούλγαρης 1991).

Αντιπροσωπευτικές τιμές της ταχύτητας των P κυμάτων στο ιζηματογενές στρώμα του φλοιού, στο στρώμα του πάνω φλοιού (γρανιτικό) που βρίσκεται αμέσως κάτω από το ιζηματογενές και στο στρώμα του κάτω φλοιού (βασαλτικό) αυτής της περιοχής είναι 5.0km/sec, 6.0km/sec και 6.8km/sec, αντίστοιχα, ενώ η αντιπροσωπευτική τιμή της ταχύτητας αυτής στον πάνω μανδύα αμέσως κάτω από το φλοιό είναι 7.8km/sec. Το ιζηματογενές στρώμα στην περιοχή αυτή είναι λεπτό (1–2 km) και το πάχος του πάνω στρώματος του φλοιού είναι εξήντα τοις εκατό και του κάτω στρώματος σαράντα τοις εκατό του συνολικού πάχους του φλοιού. Στο χάρτη του σχήματος (1.6) παριστάνεται η γεωγραφική με-

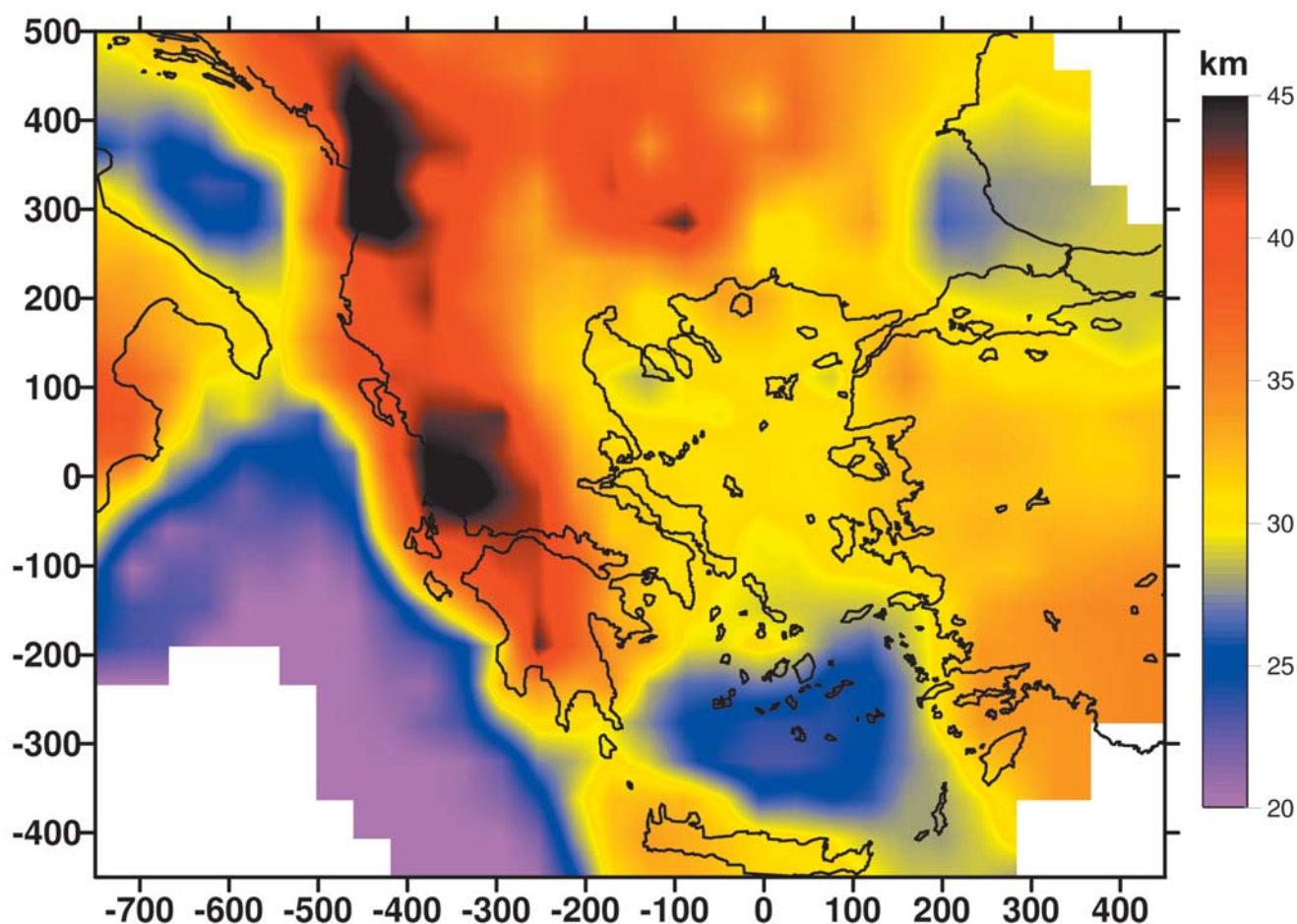
ταβολή του πάχους του φλοιού σ' αυτή την περιοχή. Μεγάλα πάχη φλοιού (40 – 47km) παρατηρούνται κατά μήκος των Διναρίδων – Ελληνίδων οροσειρών, ενώ το πάχος του φλοιού γίνεται κανονικό (28 – 37km) στο ανατολικό μέρος της ελληνικής χερσονήσου, στο βόρειο και κεντρικό Αιγαίο, στην Κρήτη και στη δυτική Τουρκία. Ο φλοιός διαφοροποιείται στο νότιο Αιγαίο όπου γίνεται αρκετά λεπτός (21 – 26km).

Το πάχος του φλοιού στην ανατολική Μεσόγειο, νότια του Ελληνικού Τόξου, είναι περίπου 20km με ένα πολύ παχύ (~10km) ιζηματογενές στρώμα (Payo 1969, Papazachos 1969, Comninakis and Papazachos 1976).

Ένα σημαντικό βήμα για πολύ καλύτερη κατανόηση της δομής ταχύτητας του φλοιού και του πάνω μανδύα σ' αυτή την περιοχή έχει γίνει πρόσφατα με την εφαρμογή μεθόδων αντιστροφής σε κύματα χώρου (Spakman 1986, Spakman et al. 1988, 1993, Δρα-

κάτος 1989, Drakatos and Drakopoulos 1991, Ligdas et al. 1990, Papazachos C. 1993, Παπαζάχος Κ. 1994, Papazachos and Nolet 1997) και σε δεδομένα σχέδωσης επιφανειακών κυμάτων (Καλογεράς 1993, Zielhuis and Nolet 1995).

Από τα σημαντικότερα αποτελέσματα της τομογραφικής εργασίας στην περιοχή αυτή είναι η ανεύρεση της καταδυόμενης λιθοσφαιρικής πλάκας σε μεγάλα βάθη (μέχρι 800km) κάτω από την περιοχή του Αιγαίου (Spakman et al. 1988), η εντυπωσιακή ομοιότητα μεταξύ των επιφανειακών τεκτονικών χαρακτηριστικών και της βαθιάς γεωφυσικής δομής και η ανεύρεση ενός διαύλου χαμηλής ταχύτητας σε βάθος 10 – 20km κάτω από τις Ελληνίδες οροσειρές (Παπαζάχος Κ. 1994, Papazachos C. et al. 1995). Το σχήμα (1.7) δείχνει τη μεταβολή της ταχύτητας των P κυμάτων σε βάθος 60 – 90km κάτω από την Ελλάδα και τις γύρω περιοχές (Παπαζάχος Κ. 1994, Papazachos C. et al. 1995). Πα-



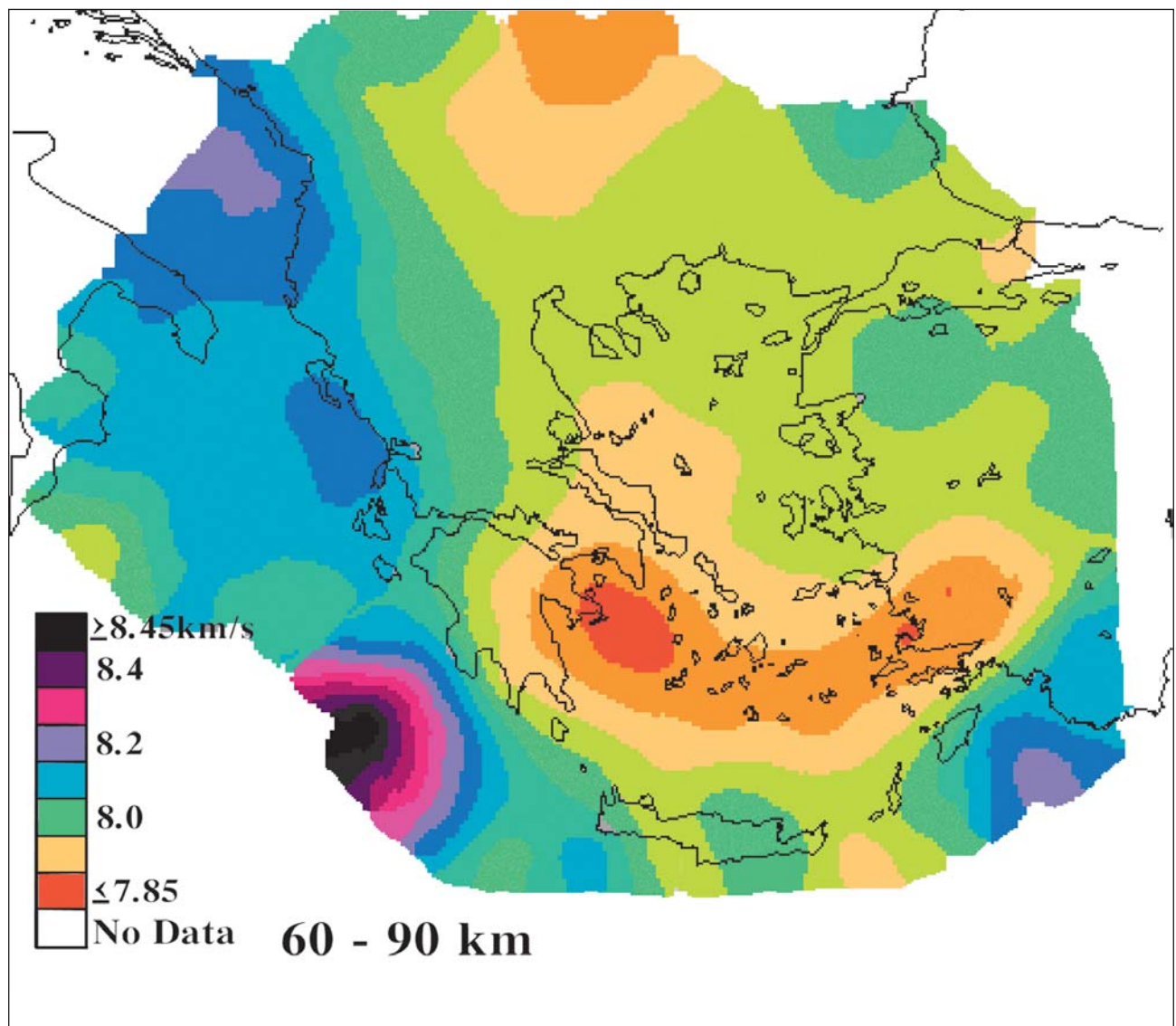
Σχ. 1.6. Γεωγραφική μεταβολή του πάχους του φλοιού στην Ελλάδα και τις γύρω περιοχές (Papazachos C. 1993)



ρατηρείται ότι οι ταχύτητες είναι υψηλές κάτω από τις Διναρίδες – Ελληνίδες οροσειρές και χαμηλές κάτω από το Αιγαίο. Είναι εντυπωσιακό το πόσο καλά η οριζόντια εξάπλωση του στρώματος πολύ χαμηλής ταχύτητας σ' αυτό το βάθος ορίζει την περιοχή υψηλής ηφαιστειακής και γεωθερμικής δράσης που παρατηρείται στην επιφάνεια της Γης στο νότιο Αιγαίο.

Στο σχήμα (1.8) παρουσιάζεται μία τυπική κατακόρυφη τομή στην περιοχή Ιονίου Πελάγους-Πελοποννήσου-Εύβοιας (Papazachos and Nolet, 1997). Τόσο στα επιμήκη (P) όσο και στα εγκάρσια (S) κύματα αναγνωρίζεται η καταδυόμενη λιθόσφαιρα

ως μία ζώνη υψηλών ταχυτήτων, σχετικά μικρού πάχους (30-40χλμ.), η οποία αλλάζει κλίση σε ένα βάθος περίπου 70-80χλμ, σε πολύ καλή συμφωνία με τη γεωμετρία της ζώνης Benioff στην περιοχή (βλέπε και σχήμα 6.1). Στο ίδιο σχήμα φαίνονται οι χαμηλές ταχύτητες της σφήνας του μανδύα (mantle wedge) η οποία υπάρχει ακριβώς πάνω από την καταδυόμενη λιθόσφαιρα και οι οποίες συνδέονται με τη γένεση του μάγματος και τη δημιουργία του ηφαιστειακού τόξου. Σε μικρότερα βάθη (0-40χλμ.) φαίνονται οι χαμηλές ταχύτητες του πρίσματος επαύξησης (στην Πελοπόννησο) λόγω της πάχυνσης του φλοιού, καθώς και οι υψηλές ταχύτητες

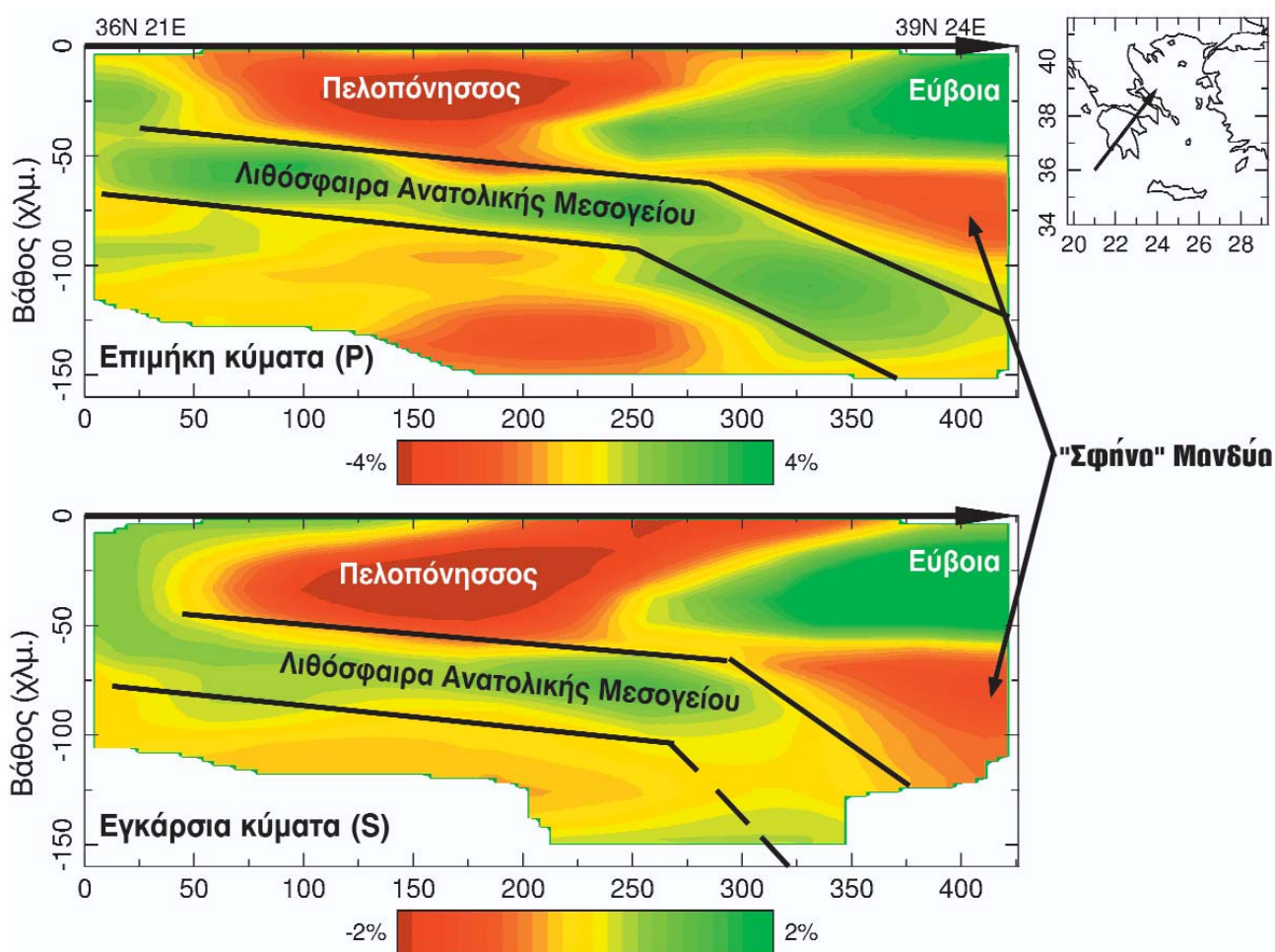


Σχ. 1.7. Μεταβολή της ταχύτητας των P κυμάτων σε βάθος 60-90km κάτω από την Ελλάδα και τις γύρω περιοχές (Παπαζάχος Κ. 1994).

στην οπισθότοξη περιοχή (περιοχή Εύβοιας) λόγω της αντίστοιχης λέπτυνσης του φλοιού και «αναθόλωσης» του μανδύα.

Η ερευνητική εργασία επί της δομής απόσβεσης του φλοιού και του πάνω μανδύα βασίζεται σε δεδομένα που προκύπτουν από σειсмоγράμματα (Papazachos and Comninakis 1971, Delibasis 1982, Tselentis et al. 1988, Martin 1988, Kovachev et al. 1991, Μπασκούτας 1993, Hatzidimitriou 1993, Panagiotopoulos et al. 1993, Παναγιωτόπουλος και

συνεργάτες 1998) και σε μακροσεισμικές εντάσεις (Papazachos and Comninakis 1971, Hashida et al. 1988, Papazachos C. 1992). Βασικό αποτέλεσμα αυτής της έρευνας είναι η διαπίστωση ότι τα σεισμικά κύματα υφίστανται έντονη απόσβεση όταν διέρχονται από τον ανώτερο μανδύα στην περιοχή του νοτίου Αιγαίου που είναι άμεσο αποτέλεσμα της καταβύθισης της λιθόσφαιρας της ανατολικής Μεσογείου κάτω από το Αιγαίο (Papazachos and Comninakis 1971, Agarwal et al. 1976).



Σχ. 1.8. Μεταβολή της ταχύτητας των P και S κυμάτων κατά μήκος της τομής Ιονίου Πελάγους-Πελοποννήσου-Εύβοιας (Papazachos and Nolet, 1997).

## 1.6. Άλλες Γεωφυσικές Ιδιότητες του Ελλαδικού Χώρου

**Κ**ατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών, έχει διεξαχθεί σημαντική ερευνητική εργασία επί του πεδίου βαρύτητας, του γεωμαγνητικού πεδίου και της ροής θερμότητας από το εσωτερικό της Γης στην Ελλάδα και τις γύρω περιοχές.

Οι **βαρυτομετρικές ανωμαλίες** ελεύθερου αέρα είναι έντονα μεταβαλλόμενες χωρικά και είναι κατά κύριο λόγο θετικές στο Αιγαίο πέλαγος, ενώ οι ανωμαλίες Bouguer είναι θετικές στο Αιγαίο και στην ανατολική Ελλάδα και αρνητικές (–120 μέχρι –140mgal) στη δυτική Ελλάδα κατά μήκος της κυρίας οροσειράς (Allan and Morelli 1971, Makris 1973, Lagios et al. 1988, Chailas et al. 1993). Ισχυρές θετικές ανωμαλίες Bouguer (μέχρι +170mgal) παρατηρήθηκαν στο Κρητικό πέλαγος, στη λεκάνη του βορείου Αιγαίου και σε άλλες περιοχές του βορείου και του κεντρικού Αιγαίου. Στο εξώ μέρος του Ελληνικού Τόξου (ανατολική Μεσόγειος) οι βαρυτικές ανωμαλίες ελευθέρου αέρα είναι κυρίως αρνητικές (μέχρι –180mgal), ενώ οι ανωμαλίες Bouguer είναι θετικές (μέχρι +180mgal) αλλά όχι τόσο πολύ θετικές όσο είναι στη δυτική Μεσόγειο ή σε ωκεάνιες περιοχές γενικώς (Morelli et al. 1975).

Θετικές **γεωμαγνητικές ανωμαλίες** έχουν παρατηρηθεί σε διάφορα μέρη του Αιγαίου πελάγους. Οι εντονότερες από τις ανωμαλίες αυτές έχουν παρατηρηθεί στη λεκάνη του βορείου Αιγαίου, κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου του νοτίου Αιγαίου και στο Κρητικό πέλαγος (Vogt and Higgs 1969, Makris 1973). Οι Needham et al. (1973) έχουν παρατηρήσει θετικές γεωμαγνητικές ανωμαλίες +250γ στην τάφρο του βορείου Αιγαίου. Το γεωμαγνητικό πεδίο είναι αδιατάρακτο στη Μεσόγειο νότια της Κρήτης (Vogt and Higgs 1969).

Η **ροή της θερμότητας** από το εσωτερικό της Γης είναι χαμηλή, δηλαδή ~0.7HFU (1HFU=1μcal/cm<sup>2</sup>·sec), στην ανατολική Μεσόγειο νότια από το Ελληνικό Τόξο (Erickson 1970, Morelli et al. 1975). Αντίθετα, στο Αιγαίο πέλαγος έχει μετρηθεί υψηλή ροή θερμότητας (~2.0HFU) (Jongsma 1974). Η υψηλότερη τιμή (~2.7HFU) έχει παρατηρηθεί στο ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου αλλά υψηλές τιμές έχουν επίσης παρατηρηθεί στη λεκάνη του βορείου Αιγαίου (μέχρι 2.5HFU).

## Βιβλιογραφία

- Agarwal, N.K., Jacoby, W.R. and Berckhemer, H. Teleseismic P waves travel time residuals and deep structure of the Aegean sea region, *Tectonophysics*, 31, 33 – 57, 1976.
- Allan, T.D. and Morelli, C. A geophysical study of the Mediterranean sea, *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 13, 99-142, 1971.
- Βούλγαρης, Ν. Διερεύνηση της δομής του φλοιού στη Δυτική Ελλάδα (Ζάκυνθος – ΒΔ. Πελοπόννησος), *Διδακτορική Διατριβή*, Πανεπιστήμιο Αθηνών, 1991.
- Chailas, S., Hopkin, R.G. and Lagios, E. Isostatic studies in the Hellenides. *2nd Congress of the Hellenic Geophysical Union*, 5-7 May 1993, Florina, Greece, 3, 492-504, 1993.
- Comninakis, P.E. and Papazachos, B.C. A note on the crustal structure of the eastern Mediterranean, *Annali di Geofisica*, 29, 59-63, 1976.
- Comninakis, P.E. and Papazachos, B.C. A catalogue of earthquakes in the Mediterranean and surrounding area for the period 1901-1975, *Publ. Geophys. Lab. Univ. Thessaloniki*, 5, 86pp., 1978.
- Delibasis, N.D. Seismic wave attenuation in the upper mantle beneath the Aegean, *Pure Appl. Geophys.*, 120, 820-839, 1982.
- Δελήμπασης, Ν., Μακρής, Ι. και Δρακόπουλος, Ι. Σεισμικές έρευνες στο φλοιό και τον πάνω μανδύα στη Δυτική Ελλάδα, *Annal. Geol. Pays Hell.*, 33, 69-83, 1988.
- Δρακάτος, Γ. Σεισμική τομογραφία – προσδιορισμός ζωνών ταχύτητας στον ευρύτερο Ελληνικό χώρο, *Διδακτορική Διατριβή*, Παν. Αθηνών, 1 – 146, 1989.
- Drakatos, G. and Drakopoulos, J. 3-D velocity structure beneath the crust and upper mantle of the Aegean sea region, *Pure Appl. Geophys.*, 135, 401-420, 1991.
- Erickson, A.J. The measurement and interpretation of heat flow in the Mediterranean and Black sea, *Ph.D. Thesis, Mass. Inst. Tech.*, 1970.
- Fytikas, M., Innocenti, F., Manetti, P., Mazzuoli, R., Peccerillo, A. and Villari, L. Tertiary to Quaternary evo-



- lution of the volcanism in the Aegean region, in *The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean* (eds. Dixon, J.E. and Robertson A.H.F.), Blackwell Publ., Oxford, 848 pp., 1985.
- Georgalas, G.C. Active volcanoes in the world including solfatara fields, *edited by the International Volcanological Association*, 12, 1-40, 1962.
- Jongsma, D. Heat flow in the Aegean area, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 37, 337-346, 1974.
- Hashida, T., Stavrakakis, G. and Shimazaki, K. Three-dimensional seismic attenuation structure beneath the Aegean and its tectonic implication, *Tectonophysics*, 145, 43-54, 1988.
- Hatzidimitriou, P.M. Attenuation of coda waves in northern Greece, *Pure Appl. Geophys.*, 140, 63-78, 1993.
- Καλογεράς, Ι.Σ. Συμβολή των επιφανειακών κυμάτων στη μελέτη δομής του φλοιού και του πάνω μανδύα του Ελληνικού χώρου, *Διδακτορική Διατριβή, Παν. Αθηνών*, 1-186, 1993.
- Kovachev, S.A., Kuzin, I.P., Shoda, O.Yu. and Soloviev, S.L. Attenuation of S-waves in the lithosphere of the sea of Crete according to the OBS observations, *Phys. Earth. Planet. Inter.*, 69, 101-111, 1991.
- Lagios, E., Hipkin, R.G., Angelopoulos, A. and Nikolaou, S. The gravity anomaly map of Greece - A recompilation, *Publ. Inst. Geol. and Mine Expl., Athens, Greece*, 1988.
- Ligdas, C.N., Main, I.G. and Adams, R.D. 3-D structure of the lithosphere in the Aegean sea region, *Geophys. J. Int.*, 102, 219-229, 1990.
- Makris, J. Some geophysical aspects of the evolution of Hellenides, *Bull. Geol. Soc. Greece*, 10, 206-213, 1973.
- Makris, J. Crustal structure of the Aegean area and the Hellenides obtained from geophysical surveys, *J. Geoph.*, 41, 441-443, 1975.
- Makris, J. The crust and upper mantle of the Aegean region from deep seismic soundings, *Tectonophysics*, 46, 269-284, 1978.
- Makris, J., Abraham, Z.B., Behle, A., Ginzburg, A., Giese, P., Steinmertz, L., Whitmarsh, P.B. and Eleftheriou, S. Seismic refraction profiles between Cyprus and Israel and their interpretation, *Geophys.J.R. astr. Soc.*, 75, 575-591, 1983.
- Martin, C. Geometrie et cinématique de la subduction Egeenne structure en vitesse et en atténuation sous le Peloponnese, *These, Université Joseph Fourier, Grenoble*, 1988.
- Μπασκούτσας, Ι. Συμβολή στη μελέτη της απόσβεσης των σεισμικών κυμάτων στην κεντρική Ελλάδα με τη χρήση δεδομένων σεισμικών κυμάτων ουράς, *Διδ. Διατριβή, Παν. Αθηνών*, 246 σελ., 1993.
- Morelli, C., Pisani, M. and Gantar, C. Geophysical studies in the Aegean sea and in the Mediterranean, *Boll. Geof. Teor. Applic.*, 18, 127-167, 1975.
- Needham, H.D., Le Pichon, X., Melguen, M., Pautot, G., Renard, V., Avedik, F., and Carre, D. North Aegean trough; 1972 Jean Charcot Cruse, *Bull. Geol. Soc. Greece*, 10, 152-153, 1973.
- Παναγιωτόπουλος, Δ. Καμπύλες χρόνων διαδρομής και δομή του φλοιού στο νότιο Βαλκανικό χώρο, *Διδακτορική Διατριβή, Παν. Θεσσαλονίκης*, 1 – 171, 1984.
- Panagiotopoulos, D.G. and Papazachos, B.C. Travel times of Pn waves in the Aegean and surrounding area, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 80, 165-176, 1985.
- Panagiotopoulos, D., Hatzidimitriou, P., Tsokas, G. and Papazachos, C. Velocity, density and attenuation structure of the lithosphere in the Aegean and surrounding area, *Proc. 2nd Congr. Hellenic Geophys. Union, Florina, 5-7 May 1993*, 2, 527-549, 1993.
- Παναγιωτόπουλος, Δ. Γ., Χατζηδημητρίου, Π.Μ., και Τσόκας, Γρ. Δομή της λιθόσφαιρας στο χώρο του Αιγαίου και τις γύρω περιοχές με βάση τις ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων, την κατανομή της πυκνότητας και την απόσβεση των σεισμικών κυμάτων, *Τιμητικός Τόμος Αφιερωμένος στον Καθηγητή Β.Κ. Παπαζάχο*, 78 – 104, 1998.
- Papazachos, B.C. Phase velocities of Rayleigh waves in southeastern Europe and eastern Mediterranean sea, *Pure Appl. Geophys.*, 75, 47-55, 1969.
- Papazachos, B.C. Long and short term prediction of the volcanic eruptions in Santorini, *Thera and the Aegean World, The third international Congress, 4-8 September 1989*, 3, 125-129, 1989.
- Papazachos, B.C., Comninakis, P. and Drakopoulos, J. Preliminary results of an investigation of crustal structure in southeastern Europe, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 56, 1241-1268, 1966.
- Papazachos, B.C. Polatou, M. and Mandalos, N. Dispersion of surface waves recorded in Athens, *Pure Appl. Geophys.*, 67, 95-106, 1967.
- Papazachos, B.C. and Comninakis, P.E. Geophysical and tectonic features of the Aegean arc, *J. Geophys. Res.*, 76, 8517-8533, 1971.
- Papazachos, B.C. and Panagiotopoulos, D.G. Normal faults associated with volcanic activity and deep rupture zones in the southern Aegean volcanic arc, *Tectonophysics*, 220, 301-308, 1993.
- Papazachos, B. C., Karacostas, V. G., Papazachos, C.B., Scordilis, E.M. The geometry of the Wadati-Benioff zone and lithospheric kinematics in the Hellenic arc, *Tectonophysics*, 319, 275 – 300, 2000.
- Papazachos, C. B. Anisotropic radiation modeling of macroseismic intensities for estimation of the attenuation structure of the upper crust in Greece, *Pure Appl. Geophys.*, 138, 445-469, 1992.

- Papazachos, C. B. Determination of crustal thickness by inversion of travel times with an application in the Aegean area, *Proc. of the 2nd Congress of the Hellenic Geophysical Union, 5-7 May 1993, Florina - Greece*, 3, 483 – 491, 1993.
- Παπαζάχος, Κ. Β. Δομή του φλοιού και του πάνω μανδύα στη νοτιοανατολική Ευρώπη με αντιστροφή σεισμικών και βαρυτικών δεδομένων, *Διδακτορική Διατριβή, Παν. Θεσσαλονίκης*, 1 - 208, 1994.
- Papazachos, C.B., Hatzidimitriou, P.M., Panagiotopoulos, D.G. and Tsokas, G.N. Tomography of the crust and upper mantle in southeast Europe, *J. Geophys. Res.*, 100, 12405-12422, 1995.
- Papazachos, C.B. and Nolet, G. P and S deep velocity structure of the Hellenic area obtained by robust nonlinear inversion of travel times, *J. Geophys. Res.*, 102, 8349-8367, 1997.
- Payo, G. Crustal structure of the Mediterranean sea by surface waves, Part I, Group velocity, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 57, 151-172, 1967.
- Payo, G. Crustal structure of the Mediterranean sea by surface waves, Part II, Phase velocity and travel times, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 59, 23-42, 1969.
- Plomerova, J., Babuska, V., Pujdusak, P., Hatzidimitriou, P., Panagiotopoulos, D., Kalogeras, J. and Tassos, S. Seismicity of the Aegean and surrounding areas in relation to topography of the lithosphere-asthenosphere transition, *Proc. 4th Inter. Sym. Analysis Seismicity and Seismic Risk, Bechyne Czechoslovakia, Sep. 4-9, 1989*, 209-215, 1989.
- Spakman, W. Subduction beneath Eurasia in connection with the Mesozoic Tethys, *Geol. Mijnb.*, 65, 145-153, 1986.
- Spakman, W., Wotrel, M.J.R. and Vlaar, N.J. The Hellenic Subduction zone: a tomographic image and its dynamic implications, *Geophys. Res. Lett.*, 15, 60-63, 1988.
- Spakman, W., Van der Lee, S. and Van der Hilst, R.D. Travel-time tomography of the European-Mediterranean mantle down to 1400km, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 79, 3-74, 1993.
- Tsapanos, Th. N., and Papazachos, B.C. Geographical and vertical variation of the earth's seismicity, *J. Seismology*, 2, 183 – 192, 1998.
- Tselentis, G.A., Drakopoulos, J. and Makropoulos, C. On the frequency dependence of Q in the Kalamata (south Greece) region as obtained from the analysis of the coda of the aftershocks of the Kalamata 1986 earthquake, *Tectonophysics*, 152, 157-159, 1988.
- Vogt, P.R. and Higgs, R.H. An aeromagnetic survey of the eastern Mediterranean sea and its interpretation, *Earth Planet. Sci. Letters*, 5, 439-448, 1969.
- Zielhuis, A. and Nolet, G. Shear-wave variations in the upper mantle beneath central Europe, *J. Geophys. Res.*, 117, 695-715, 1994.

