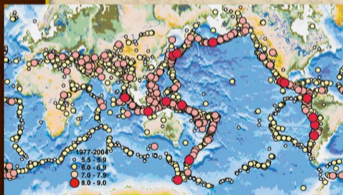


Β. Κ. Παπαζάχος
Γ. Φ. Καρακαϊσης
Π. Μ. Χατζηδημητρίου

Εισαγωγή στη ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ



Κάθε γνήσιο αντίτυπο φέρει την υπογραφή των συγγραφέων

ISBN 960-431-979-5

© Copyright, 2005, Εκδόσεις ΖΗΤΗ,

Βασίλης Παπαζάχος, Γιώργος Καρακαϊσής, Παναγιώτης Χατζηδημητρίου

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 Θεσ/νίκης-Περαίας
Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19
Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229
e-mail: info@ziti.gr

Βιβλιοπωλείο

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ

Αρμενοπούλου 27 • 546 35 Θεσσαλονίκη
Τηλ. 2310.203.720, Fax 2310.211.305
e-mail: sales@ziti.gr

www.ziti.gr

*Στους γονείς μας και τις συζύγους μας
που δημιούργησαν τις προϋποθέσεις
ώστε να ασχοληθούμε απερίσπαστα
με την επιστημονική γνώση και παιδεία,
αποτέλεσμα των οποίων είναι
και το παρόν σύγγραμμα.*

Πρόλογος

Βάση για τη συγγραφή αυτού του βιβλίου αποτέλεσε το βιβλίο με τον ίδιο τίτλο που δημοσιεύτηκε το 1989 από τον πρώτο των συγγραφέων. Από τότε, όμως, πραγματοποιήθηκε σημαντική πρόοδος σε πολλούς κλάδους της Σεισμολογίας και έχει παραχθεί νέα γνώση θεωρητικής και πρακτικής σημασίας που είναι δημοσιευμένη σε πρόσφατες εκδόσεις (βιβλία, περιοδικά, πρακτικά συνεδρίων, διαδίκτυο, κλπ.). Πέραν αυτών, κατά τη δεκαπενταετία αυτή το περιεχόμενο εκείνου του βιβλίου αλλά και πρόσθετη ύλη διδάχθηκαν σε φοιτητές διαφόρων τμημάτων των Πανεπιστημίων Θεσσαλονίκης, Αθηνών και Πατρών και αποκτήθηκε σημαντική πρόσθετη σχετική εμπειρία. Έτσι, το περιεχόμενο του παρόντος βιβλίου αποτελεί κοινή προσπάθεια των τριών συγγραφέων του αναπαραγωγής της βασικής σεισμολογικής γνώσης που ισχύει σήμερα και αξιοποίηση της σχετικής διδακτικής εμπειρίας.

Η έκταση ανάπτυξης των διαφόρων θεμάτων κάθε πανεπιστημιακού βιβλίου επηρεάζεται από τα ερευνητικά ενδιαφέροντα των συγγραφέων του. Έτσι, επειδή κατά τα τελευταία χρόνια κύριο ερευνητικό μας έργο αποτελεί η πρόγνωση των σεισμών και η μελέτη της σεισμικής επικινδυνότητας (seismic hazard) και του σεισμικού κινδύνου (seismic risk), τα θέματα αυτά αναπτύσσονται εκτενέστερα στο παρόν βιβλίο (κεφάλαια 7, 12) σε σχέση με άλλα ξενόγλωσσα βιβλία Σεισμολογίας. Αντιθέτως, οι σεισμολογικές μέθοδοι που εφαρμόζονται για τη μελέτη της γεωφυσικής δομής της Γης, οι οποίες αναπτύσσονται εκτενώς σε αρκετά ξενόγλωσσα συγγράμματα, δεν αποτελούν κύριο αντικείμενο του παρόντος βιβλίου γιατί αυτές περιλαμβάνονται στα βιβλία Φυσικής του Εσωτερικού της Γης και Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του πρώτου εκ των συγγραφέων.

Έτσι, αντικείμενα του παρόντος βιβλίου είναι: η θεωρία ελαστικότητας και ελαστικών κυμάτων (κεφάλαιο 2) που αποτελεί τη βάση για την κατανόηση του τρόπου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, τα όργανα αναγραφής των σεισμών (κεφάλαιο 3), η διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης (κεφά-

λαιο 4), ο τρόπος μέτρησης των διαφόρων σεισμολογικών ποσοτήτων (κεφάλαιο 5), ο τρόπος γένεσης των σεισμών και η χωροχρονική τους κατανομή (κεφάλαιο 6), η πρόγνωση των σεισμών (κεφάλαιο 7), τα μακροσεισμικά αποτελέσματα των σεισμών (κεφάλαιο 8), οι τεχνητές δονήσεις (κεφάλαιο 9), η σεισμικότητα της Σελήνης (κεφάλαιο 10), οι παράμετροι του σεισμικού ρήγματος και ο μηχανισμός γένεσης των σεισμών (κεφάλαιο 11) και η Τεχνική Σεισμολογία (κεφάλαιο 12).

Βασικός στόχος του βιβλίου είναι η κατανόηση από τον αναγνώστη της φυσικής σημασίας των περιεχομένων του και του τρόπου αξιοποίησής τους για τη λύση προβλημάτων κοινωνικής σημασίας. Για το λόγο αυτό δε γίνεται στο κείμενο πλήρης μαθηματική απόδειξη όλων των θεωρητικών σχέσεων. Στο παράρτημα, όμως, που έχει προστεθεί στην παρούσα έκδοση, υποδεικνύεται ο τρόπος λύσης των Ασκήσεων Β΄ Κατηγορίας, πολλές από τις οποίες αφορούν αποδείξεις βασικών θεωρητικών σχέσεων. Δίνονται, επίσης στο παράρτημα, οι απαντήσεις των Ασκήσεων Α΄ κατηγορίας, ώστε να ελέγχει ο αναγνώστης το αποτέλεσμα της δικής του λύσης.

Το βιβλίο δεν απαιτεί προηγούμενη σεισμολογική γνώση. Προϋποθέτει, όμως, βασικές γνώσεις Φυσικής και ανωτέρων Μαθηματικών, όπως είναι τα στοιχεία διανυσματικού λογισμού, τανυστικού λογισμού, θεωρίας πινάκων και θεωρίας πιθανοτήτων και στατιστικής.

Το βιβλίο εκδίδεται ως διδακτικό πανεπιστημιακό σύγγραμμα και καλύπτει την ύλη που διδάσκεται σε φοιτητές του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και άλλων Πανεπιστημίων της χώρας. Περιλαμβάνει, όμως, πρόσθετα στοιχεία ώστε να μπορεί να αποτελέσει σύγγραμμα αναφοράς και για επιστήμονες που ασχολούνται επαγγελματικά με σχετικά αντικείμενα (γεωφυσικοί, γεωλόγοι, γεωδαίτες, μηχανικοί, κλπ.). Ένα τέτοιο σημαντικό στοιχείο είναι η βιβλιογραφία η οποία παρατίθεται στο τέλος του βιβλίου και χωρίζεται σε «Βιβλία» και «Δημοσιεύσεις σε Περιοδικά και Πρακτικά Συνεδρίων» και αφορά σημαντική πρόσφατη σεισμολογική γνώση, ώστε ο αναγνώστης να μπορεί να βρει πρόσθετες αξιόπιστες πληροφορίες για τα αντικείμενα που τον ενδιαφέρουν. Στο τέλος κάθε κεφαλαίου παρατίθεται η βιβλιογραφία που αναφέρεται στο κείμενό του.

Στη διαμόρφωση της ύλης της νέας αυτής έκδοσης του βιβλίου συνέβαλε αποφασιστικά ο επίκουρος καθηγητής **Κ. Β. Παπαζάχος**, ο οποίος πρότεινε πρόσθετα αντικείμενα και βελτιώσεις, πραγματοποίησε σχετικούς υπολογισμούς οι οποίοι αφορούν τις γραφικές παραστάσεις που περιλαμβάνονται στο βιβλίο, επαναδιατύπωσε ορισμένα τμήματα και συνέβαλε γενικώς στη βελτίωση του περιεχομένου και της μορφής του. Η καθηγήτρια της Σεισμολογίας **Α. Κυρατζή** και ο επίκουρος καθηγητής Σεισμολογίας **Ε. Σκορδύλης** συνέβαλαν επίσης στη βελτί-

ωση του περιεχομένου του με την ανάγνωση του κειμένου και την υπόδειξη σημαντικών βελτιώσεων. Στη διαμόρφωση της ύλης του 12^{ου} κεφαλαίου συνέβαλαν σημαντικά οι ερευνητές του Ινστιτούτου Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών **Χ. Παπαϊωάννου** και **Ν. Θεοδουλίδης**. Σημαντική υπήρξε, επίσης, η συμβολή των φοιτητών μας που διδάχθηκαν το μάθημα, των οποίων οι παρατηρήσεις συνέβαλαν στην ορθολογικότερη οργάνωση της ύλης του.

Στη διαμόρφωση της ύλης των προηγούμενων εκδόσεων, η οποία περιλαμβάνεται και στην παρούσα έκδοση, συνέβαλαν επίσης οι σεισμολόγοι Ν. Θεοδουλίδης, Ε. Παπαδημητρίου, Δ. Παναγιωτόπουλος, Χ. Παπαϊωάννου, Β. Καρακώστας, και Β. Μάργαρης. Οι πολιτικοί μηχανικοί Σ. Αναγνωστόπουλος, Δ. Παπασταματίου και Β. Λεκίδης διάβασαν το τελευταίο κεφάλαιο που αφορά την Τεχνική Σεισμολογία και πρότειναν σημαντικές βελτιώσεις.

Ευχαριστούμε θερμά όλους τους αναφερόμενους παραπάνω επιστήμονες οι οποίοι συνέβαλαν ουσιαστικά στη διαμόρφωση της ύλης του και τη βελτίωση του περιεχομένου αυτού του βιβλίου.

Ευχαριστούμε επίσης θερμά τις Δ. Βλάχου και Ε. Κωνσταντινίδου οι οποίες εργάστηκαν με αφοσίωση για την έκδοση του προηγούμενου αλλά και του παρόντος βιβλίου και παρέχουν με προθυμία τη βοήθειά τους σε όλα τα τεχνικού χαρακτήρα θέματα που μας αφορούν.

Η ηθική και υλική συμπαράσταση των συζύγων μας Κατερίνας, Ελευθερίας και Παναγιώτας αλλά και η ανάληψη όλων σχεδόν των οικογενειακών υποχρεώσεων από αυτές αποτέλεσαν βασική προϋπόθεση για την εντατική απασχόλησή μας με την επιστημονική έρευνα και την αναπαραγωγή της σχετικής επιστημονικής γνώσης, αποτέλεσμα των οποίων είναι και το παρόν σύγγραμμα.

Ευχαριστούμε, επίσης, την εκδότρια κυρία Π. Ζήτη για τη σημαντική συμβολή της στην άρτια έκδοση του βιβλίου.

Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2005

Β. Κ. Παπαζάχος

Γ. Φ. Καρακαϊσης

Π. Μ. Χατζηδημητρίου

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο της Σεισμολογίας	21
1.2. Γενικοί Τρόποι Έρευνας στη Σεισμολογία	23
1.3. Η Επιστημονική και Κοινωνική Σημασία της Σεισμολογίας	24
1.4. Σύντομη Ιστορία της Σεισμολογίας	28

Κεφάλαιο 2

Στοιχεία θεωρίας ελαστικότητας και ελαστικών κυμάτων

2.1. Εισαγωγή	41
2.2. Τάση σε Σημείο Σώματος	42
2.2.1. Τανυστής τάσης	43
2.2.2. Συνθήκες ισορροπίας	45
2.2.3. Κύριες συνιστώσες τάσης	46
2.2.4. Μονάδες τάσης και τιμές της στη Γη	48
2.3. Παραμόρφωση σε Σημείο Σώματος	49
2.3.1. Κυβική παραμόρφωση	49
2.3.2. Διαμητική παραμόρφωση	51
2.3.3. Περιστροφή	52
2.3.4. Ολική Παραμόρφωση	53
2.3.5. Στοιχειώδης μετάθεση	55
2.4. Σχέση μεταξύ Τάσης και Ανηγμένης Παραμόρφωσης	55
2.4.1. Ελαστικές σταθερές	56
2.5. Εξίσωση της Κίνησης	59

2.6.	Εξίσωση του Κύματος	61
2.7.	Εξίσωση Διανυσματικού Κύματος	63
2.8.	Στάσιμα Κύματα	65
2.9.	Ελαστικά Κύματα Χώρου	66
2.9.1.	Επιμήκη κύματα	67
2.9.2.	Εγκάρσια κύματα	68
2.9.3.	Ανάκλαση και διάθλαση των κυμάτων χώρου	69
2.10.	Επιφανειακά Κύματα	71
2.10.1.	Κύματα Rayleigh	71
2.10.2.	Κύματα Love	74
2.10.3.	Σκέδαση επιφανειακών κυμάτων	76
Ασκήσεις	79

Κεφάλαιο 3

Όργανα Αναγραφής των Σεισμών

3.1.	Εισαγωγή	85
3.2.	Βασικές Αρχές Λειτουργίας των Σεισμογράφων	85
3.2.1.	Τρόποι μεταβολής της περιόδου του εκκρεμούς σεισμομέτρου	89
3.2.2.	Τρόποι αναλογικής αναγραφής των σεισμών	91
3.2.3.	Τρόποι απόσβεσης των αιωρήσεων του εκκρεμούς	94
3.3.	Θεωρία Σεισμομέτρου	95
3.3.1.	Η εξίσωση της κίνησης σεισμομέτρου	95
3.3.2.	Απόκριση του σεισμομέτρου στην εδαφική κίνηση	96
3.4.	Μηχανικοί Σεισμογράφοι	101
3.4.1.	Βαθμολόγηση μηχανικού σεισμομέτρου	102
3.4.2.	Τύποι μηχανικών σεισμογράφων	103
3.5.	Ηλεκτρομαγνητικοί Σεισμογράφοι	105
3.5.1.	Βαθμολόγηση ηλεκτρομαγνητικού σεισμομέτρου	105
3.5.2.	Τύποι ηλεκτρομαγνητικών σεισμογράφων	107
3.6.	Ηλεκτρονικοί Σεισμογράφοι	109
3.6.1.	Ψηφιακοί σεισμογράφοι	109
3.6.2.	Σεισμογράφοι ευρέος φάσματος	110
Ασκήσεις	113

*Κεφάλαιο 4***Σεισμικά κύματα και διάδοση αυτών στο εσωτερικό της γης**

4.1. Εισαγωγή	117
4.2. Εστία, Επίκεντρο και Χρόνος Γένεσης Σεισμού	118
4.3. Καμπύλες Χρόνων Διαδρομής των Κυμάτων Χώρου	119
4.4. Μεταβολή των Ταχυτήτων Διάδοσης των Σεισμικών Κυμάτων Χώρου με το Βάθος μέσα στη Γη	123
4.5. Διάδοση των Σεισμικών Κυμάτων Χώρου στο Εσωτερικό της Γης	125
4.5.1. Διάδοση των κυμάτων χώρου στο φλοιό	125
4.5.2. Διάδοση των κυμάτων χώρου στο μανδύα	131
4.5.3. Διάδοση των κυμάτων χώρου στον πυρήνα	134
4.6. Επιφανειακά Κύματα και Διάδοση Αυτών στη Γη	137
4.7. Ελεύθερη Ταλάντωση της Γης	141
4.8. Μεταβολή των Πλατών των Σεισμικών Κυμάτων κατά τη Διάδοσή τους στη Γη	145
Ασκήσεις	150

*Κεφάλαιο 5***Σεισμομετρία**

5.1. Εισαγωγή	155
5.2. Εύρεση του Χρόνου Άφιξης	155
5.3. Εύρεση του Πλάτους και της Περιόδου	157
5.4. Φάσμα της Σεισμικής Κίνησης	158
5.5. Διάγραμμα της Κίνησης του Υλικού Σημείου	159
5.6. Εκπόνηση Πινάκων και Καμπύλων Χρόνων Διαδρομής των Κυμάτων Χώρου	161
5.7. Έύρεση της Επικεντρικής Απόστασης και του Χρόνου Γένεσης	163
5.8. Προσδιορισμός των Συντεταγμένων της Εστίας Σεισμού	163
5.8.1. Προσδιορισμός του επικέντρου σεισμού	164
5.8.2. Προσδιορισμός του εστιακού βάθους	170
5.9. Μέγεθος Σεισμού	177
5.9.1. Κορεσμός των κλιμάκων μεγέθους	186

5.9.2. Σχέσεις μεταξύ των μεγεθών διαφόρων κλιμάκων	188
5.9.3. Τρόπος υπολογισμού των μεγεθών στον ελληνικό χώρο	188
5.10. Ενέργεια Σεισμού	190
Ασκήσεις	195

Κεφάλαιο 6

Η γένεση των σεισμών και η χωροχρονική κατανομή τους

6.1. Εισαγωγή	203
6.2. Τρόπος Γένεσης των Επιφανειακών Σεισμών	203
6.2.1. Εφαρμογή της θεωρίας του Reid για τον υπολογισμό παραμέτρων του ρήγματος	209
6.3. Τρόπος Γένεσης των Πλουτωνίων Σεισμών	211
6.4. Η θεωρία των Εμποδίων και Φραγμάτων	214
6.5. Χωρική Κατανομή των Σεισμών	217
6.5.1. Κατακόρυφη κατανομή των σεισμικών εστιών	217
6.5.2. Τα δύο παγκόσμια συστήματα ζωνών διάρρηξης και η γεωγραφική κατανομή των σεισμικών εστιών	219
6.6. Η Θεωρία των Λιθοσφαιρικών Πλακών	222
6.7. Χρονική Κατανομή της Σεισμικής Δράσης	225
6.7.1. Ο σεισμικός κύκλος	225
6.7.2. Σεισμικές ακολουθίες	228
6.7.3. Επιταχυνόμενη και επιβραδυνόμενη σεισμική δράση	231
6.7.4. Επαγόμενη σεισμική δράση	233
6.8. Σεισμικότητα	235
6.8.1. Χρονικώς ανεξάρτητη σεισμικότητα	236
6.8.2. Χρονικώς εξαρτώμενη σεισμικότητα	240
6.9. Ερμηνεία της Γένεσης και της Χωροχρονικής Κατανομής των Σεισμών με τη Θεωρία του Χάους	245
6.9.1. Αιτιοκρατικό χάος κατά τη διάρρηξη στο σειсмоγόνο ρήγμα	245
6.9.2. Ο φλοιός της Γης σε αυτο-οργανωμένη κρισιμότητα	247
6.9.3. Οι κύριοι σεισμοί ως κρίσιμα σημεία	252
6.9.4. Τρόπος έναρξης της διάρρηξης στην εστία του σεισμού	253
Ασκήσεις	258

*Κεφάλαιο 7***Πρόγνωση σεισμών**

7.1. Εισαγωγή	265
7.2. Μακροπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών	267
7.2.1. Τα μοντέλα πρόγνωσης χρόνου και ολίσησης	267
7.2.2. Η μέθοδος των προσωρινών σεισμικών κενών	269
7.2.3. Μέθοδος μεταβολής της στατικής τάσης	272
7.3. Μεσοπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών	274
7.3.1. Μέθοδος της επιβραδυνόμενης εντός - επιταχυνόμενης εκτός σεισμικής παραμόρφωσης	274
7.4. Βραχυπρόθεσμη Πρόγνωση των Σεισμών	277
7.4.1. Πρόδρομα φαινόμενα	277
7.4.2. Φυσική ερμηνεία των προδρόμων φαινομένων	280
7.5. Κοινωνικές Επιπτώσεις της Πρόγνωσης των Σεισμών	281
Ασκήσεις	283

*Κεφάλαιο 8***Μακροσεισμικά αποτελέσματα των σεισμών**

8.1. Εισαγωγή	287
8.2. Αποτελέσματα των Σεισμών στο Έδαφος	287
8.3. Αποτελέσματα των Σεισμών στο Νερό της Ξηράς	293
8.4. Αποτελέσματα των Σεισμών στη Θάλασσα	294
8.5. Αποτελέσματα των Σεισμών στις Τεχνικές Κατασκευές	298
8.6. Επίδραση των Σεισμών στους Ανθρώπους	301
8.7. Επίδραση των Σεισμών στα Ζώα	303
8.8. Εκτίμηση των Μακροσεισμικών Αποτελεσμάτων	303
8.9. Ισόσειστες Καμπύλες	305
Ασκήσεις	309

*Κεφάλαιο 9***Τεχνητές δονήσεις**

9.1. Εισαγωγή	313
---------------------	-----

9.2.	Παραγόμενες Εργαστηριακά Δονήσεις	313
9.3.	Εδαφικός Θόρυβος	316
9.4.	Πυρηνικές Εκρήξεις και Σημασία αυτών για τη Σεισμολογία	318
9.4.1.	Ενέργεια και μέγεθος των πυρηνικών εκρήξεων	319
9.4.2.	Ανίχνευση των πυρηνικών δοκιμών	320
9.4.3.	Μέθοδοι διάκρισης των πυρηνικών εκρήξεων από τους σεισμούς	321
9.5.	Δονήσεις που Οφείλονται σε Χημικές Ενώσεις	327
	Ασκήσεις	328

Κεφάλαιο 10

Σεισμολογία της σελήνης

10.1.	Αντικείμενο της Σεισμολογίας της Σελήνης	331
10.2.	Το Πρώτο Δίκτυο Σεισμολογικών Σταθμών στη Σελήνη	331
10.3.	Ιδιότητες των Σεισμικών Αναγραφών στη Σελήνη	333
10.4.	Μέθοδοι Διάκρισης των Δονήσεων της Σελήνης	334
10.5.	Σεισμικότητα της Σελήνης	336
10.6.	Μηχανισμός και Αίτια Γένεσης των Σεισμών της Σελήνης	337
10.7.	Γεωφυσική Δομή του Εσωτερικού της Σελήνης	341

Κεφάλαιο 11

Παράμετροι του σεισμικού ρήγματος και σεισμικές μέθοδοι καθορισμού τους

11.1.	Εισαγωγή	345
11.2.	Γεωμετρικές Παράμετροι του Σεισμικού Ρήγματος	345
11.3.	Μετάθεση στην Εστία Σεισμού	347
11.4.	Κινηματικοί Άξονες και Κύριοι Άξονες Τάσης	350
11.5.	Σχέσεις Παραμέτρων του Ρήγματος με το Σεισμικό Μέγεθος	351
11.6.	Τρόπος Ακτινοβολίας των Σεισμικών Κυμάτων στην Εστία Σεισμού	354
11.7.	Καθορισμός του Μηχανισμού Γένεσης των Σεισμών με τη Μέθοδο των Πρώτων Αποκλίσεων των Επιμήκων Κυμάτων	359
11.8.	Καθορισμός του Μηχανισμού Γένεσης των Σεισμών με τη Μέθοδο των Γραμμών Πόλωσης των Εγκαρσίων Κυμάτων	368

11.9. Καθορισμός του Μηχανισμού Γένεσης των Σεισμών με τη Μέθοδο των Επιφανειακών Κυμάτων	373
11.10. Καθορισμός του Μηχανισμού Γένεσης των Σεισμών με Μοντελοποίηση Κυματομορφών	375
Ασκήσεις	379

Κεφάλαιο 12

Τεχνική Σεισμολογία

12.1. Εισαγωγή	383
12.2. Ισχυρές Σεισμικές Κινήσεις του Εδάφους και Μέτρηση Αυτών	384
12.3. Παράγοντες που Καθορίζουν την Ισχυρή Σεισμική Κίνηση	389
12.4. Υπολογισμός των Μέγιστων Τιμών των Παραμέτρων της Ισχυρής Σεισμικής Κίνησης	393
12.5. Εκτίμηση της Επίδρασης των Τοπικών Συνθηκών στην Ισχυρή Σεισμική Κίνηση	398
12.5.1. Μοντέλα εκτίμησης της επίδρασης των τοπικών συνθηκών	399
12.5.2. Μικροζωνικές μελέτες	403
12.6. Σεισμική Επικινδυνότητα	404
12.6.1. Μέτρα σεισμικής επικινδυνότητας	406
12.6.2. Μέθοδοι καθορισμού των μέτρων της σεισμικής επικινδυνότητας	409
12.7. Απόκριση των Τεχνικών Κατασκευών στις Σεισμικές Κινήσεις	414
12.7.1. Μονοβάθμιος ταλαντωτής	414
12.7.2. Παράμετροι της τεχνικής κατασκευής	417
12.7.3. Φάσμα απόκρισης	420
12.8. Σεισμικές Κινήσεις Σχεδιασμού	425
12.8.1. Μέθοδοι καθορισμού των φασμάτων σχεδιασμού	428
12.9. Καθορισμός των Σεισμικών Δυνάμεων	434
12.10. Πρακτικοί Κανόνες Αντισεισμικής Κατασκευής	436
12.10.1. Σημασία της μορφής της κατασκευής	436
12.10.2. Καταλληλότητα των υλικών κατασκευής	438
Ασκήσεις	441

Παραρτήματα

I.	Βοήθημα για τις λύσεις των ασκήσεων	447
II.	Προσαρμογή ευθείας γραμμής σε δεδομένα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων	493
III.	Πίνακας τιμών της σωρευτικής κανονικής κατανομής $F(z)$	496
	Ευρετήριο όρων	513

1.1. Αντικείμενο της Σεισμολογίας

Σεισμός είναι η εδαφική δόνηση που γεννιέται κατά την παροδική διατάραξη της μηχανικής ισορροπίας των γήινων πετρωμάτων σ' ορισμένο μέρος της στερεάς Γης, από φυσικά αίτια που βρίσκονται στο εσωτερικό της Γης. Σύμφωνα με τη δεσπόζουσα σήμερα επιστημονική αντίληψη, την παροδική διατάραξη αποτελεί η σχετική ολίσθηση των δύο πλευρών του *σεισμογόνου ρήγματος* και τις εδαφικές δονήσεις αποτελούν τα σεισμικά κύματα που παράγονται στο ρήγμα, διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης και φθάνουν στην επιφάνειά της όπου γίνονται αισθητά, προκαλούν βλάβες και καταγράφονται από τους σειсмоγράφους. Οι περίοδοι των σεισμικών κυμάτων κυμαίνονται μεταξύ κλάσματος του δευτερολέπτου και 54 λεπτών, που είναι η περίοδος των στάσιμων κυμάτων που δημιουργούνται στη Γη όταν αυτή διεγείρεται από μεγάλους σεισμούς (ελεύθερη ταλάντωση της Γης). Τους σεισμούς μελετάει η Σεισμολογία.

Υπάρχουν εδαφικές δονήσεις των οποίων τα αίτια (φυσικά ή τεχνητά) δεν βρίσκονται στο εσωτερικό της Γης και η ύπαρξη των δονήσεων αυτών δυσκολεύει την πιστή αναγραφή των σεισμών από τους σειсмоγράφους. Τέτοιες φυσικές δονήσεις είναι οι οφειλόμενες σε πτώση μετεωριτών, σε μετεωρολογικά αίτια, σε θαλάσσια κύματα, σε παλίρροιες, κλπ., ενώ τέτοιες τεχνητές δονήσεις είναι αυτές που προκαλούν οι μηχανές εργοστασίων, τα μέσα συγκοινωνίας, τα φουρνέλα κλπ. Οι δονήσεις αυτές αποτελούν τον *εδαφικό θόρυβο* (μικροσεισμικά) στις σεισμικές καταγραφές. Οι περίοδοι των δονήσεων αυτών ποικίλουν από 0.1 sec (τεχνητές δονήσεις) μέχρι 24 ώρες (παλίρροιες της στερεάς Γης). Οι δονήσεις αυτές ενδιαφέρουν άμεσα τη Σεισμολογία, γιατί αποτελούν εδαφικό θόρυβο και πρέπει να γνωρίζουμε τις ιδιότητες τους για να περιορίσουμε την εμφάνισή τους στα σειсмоγράμματα. Δείχθηκε π.χ. ότι τα θαλάσσια μικροσεισμικά παρουσιάζουν ένα μέγιστο πλάτος στην περίοδο των 6 sec περίπου και για να αποφευχθεί η καταγραφή τους είχαν κατασκευαστεί, κατά τη δεκαετία του 1960, τόσο βραχείας όσο και μακράς περιόδου ηλεκτρομαγνητικοί σειсмоγράφοι. Πέραν αυτού, ο εδαφικός θόρυβος (μικροσεισμικά) βραχείας περιόδου χρησιμοποιείται στην Τεχνική Σεισμολογία για τη μελέτη της απόκρισης του εδάφους στις εδαφικές ταλαντώσεις (μικροζωνικές μελέτες, κλπ.) και οι μεγάλης περιόδου τέτοιες δονήσεις (παλίρροιες, κλπ.) για τη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων της Γης.

Υπάρχουν εδαφικές δονήσεις που παράγονται τεχνητά στη φύση (πυρηνικές και χημικές εκρήξεις, κλπ.) και στο εργαστήριο για επιστημονικούς λόγους. Οι περίοδοι των δονήσεων αυτών ποικίλουν από 10^{-5} sec (δονήσεις παραγόμενες

στα εργαστήρια) μέχρι 100 sec (δονήσεις οφειλόμενες σε μεγάλες πυρηνικές εκρήξεις). Αυτές τις *πειραματικώς παραγόμενες δονήσεις* μελετάει επίσης η Σεισμολογία, γιατί παρουσιάζουν εξαιρετικό θεωρητικό και πρακτικό ενδιαφέρον. Οι εδαφικές δονήσεις που οφείλονται σε χημικές εκρήξεις ή σε άλλα τεχνητά μέσα χρησιμοποιούνται στη σεισμική διασκόπηση για την αναζήτηση πηγών (δομών) οικονομικού ενδιαφέροντος (κοιτάσματα πετρελαίου, κλπ.). Οι καταγραφές των δονήσεων που οφείλονται σε πυρηνικές εκρήξεις και οι συγκρίσεις τους με καταγραφές σεισμών συνέβαλαν στον αποφασιστικό έλεγχο και μείωση των πυρηνικών εξοπλισμών. Οι τεχνητές δονήσεις στο εργαστήριο επέτρεψαν την πραγματοποίηση πειραμάτων που αφορούν τη φυσική κατάσταση του εσωτερικού της Γης, υπό ελεγχόμενες συνθήκες.

Αντικείμενο, επίσης, της Σεισμολογίας αποτελούν οι σεισμοί της Σελήνης και άλλες δονήσεις του εδάφους της (από πτώση μετεωριτών, πυραύλων, κλπ.), οι καταγραφές των οποίων έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της δομής και των γεωδυναμικών διαδικασιών του φυσικού δορυφόρου της Γης. Πρόσφατα, στα αντικείμενα της Σεισμολογίας προστέθηκε η μελέτη στάσιμων κυμάτων (ελεύθερες ταλαντώσεις) του Ήλιου. Οι ταλαντώσεις αυτές δεν καταγράφονται με σειсмоγράφους, αλλά παρατηρούνται οπτικά με τηλεσκόπια. Φαίνεται ότι αναπτύσσεται ένας νέος επιστημονικός κλάδος που ονομάζεται Ηλιοσεισμολογία.

Όλες οι δονήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, των οποίων οι συχνότητες ποικίλουν από 10^{-5} Hz μέχρι 10^5 Hz (περίοδοι από 24 ώρες μέχρι 10^{-5} sec), οφείλονται στη διάδοση κυμάτων τα οποία λέγονται **ελαστικά κύματα**. Τα σεισμικά κύματα αποτελούν μια κατηγορία των ελαστικών κυμάτων και διαφέρουν από τις άλλες κατηγορίες ελαστικών κυμάτων μόνο ως προς τα αίτια γένεσής τους.

Από τα παραπάνω και από αυτά που θα αναφέρουμε παρακάτω προκύπτει ότι το αντικείμενο της Σεισμολογίας είναι εξαιρετικά ευρύ. Για το λόγο αυτό δεν είναι εύκολο να δοθεί απόλυτα ικανοποιητικός ορισμός αυτής. Μπορούμε, πάντως, να πούμε ότι:

Η Σεισμολογία μελετάει τη γένεση, τη διάδοση και τα αποτελέσματα των ελαστικών κυμάτων.

Υπάρχουν απεριοδικές εδαφικές κινήσεις (μηδενικής συχνότητας), όπως είναι οι κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών, οι οποίες αποτελούν αντικείμενο και άλλων επιστημονικών κλάδων. Η Σεισμολογία ενδιαφέρεται έντονα και για τις κινήσεις αυτές, γιατί σχετίζονται άμεσα με τη γένεση των σεισμών.

1.2. Γενικοί Τρόποι Έρευνας στη Σεισμολογία

Η Σεισμολογία αποτελεί κλάδο της Γεωφυσικής. Γι' αυτό, οι σεισμολόγοι, όπως όλοι οι γεωφυσικοί, για να πετύχουν τους σκοπούς τους, πραγματοποιούν: α) παρατηρήσεις στη φύση, β) πειραματικές εργασίες στο εργαστήριο και γ) θεωρητικές έρευνες.

Η παρατήρηση των σεισμικών φαινομένων στη φύση γίνεται με δύο τρόπους. Με τον πρώτο τρόπο παρατηρούνται απευθείας και εκτιμούνται, κυρίως ποιοτικά, τα μακροσεισμικά αποτελέσματα των σεισμών, δηλαδή, τα αποτελέσματα αυτών στο έδαφος, στο νερό, στα κτίρια, στους ανθρώπους, κλπ. Η μελέτη αυτή λέγεται **μακροσεισμική** μελέτη των σεισμών. Ο δεύτερος τρόπος βασίζεται σε παρατήρηση και λήψη μετρήσεων πάνω στα σειсмоγράμματα, δηλαδή, στις καταγραφές των σεισμικών κινήσεων από ευαίσθητα όργανα που λέγονται σειсмоγράφοι. Η τέτοια ποσοτική μελέτη των σεισμών λέγεται **μικροσεισμική** μελέτη αυτών.

Από τότε που άρχισε η ακριβής μέτρηση των διαφόρων σεισμικών ποσοτήτων, γύρω στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, έγινε δυνατή η φυσικομαθηματική επεξεργασία των σεισμικών παρατηρήσεων. Αυτό συνέβαλε αποφασιστικά στο να γίνουν οι σεισμικές μέθοδοι οι πιο αξιόπιστες από τις γεωφυσικές μεθόδους μελέτης του εσωτερικού της Γης και η Σεισμολογία μια από τις πιο ακριβείς φυσικές επιστήμες. Σήμερα μπορούμε με τους σειсмоγράφους να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις των εδαφικών μεταθέσεων της τάξης του $1 \mu\text{m}$ ($= 10^{-6} \text{ m}$).

Η **εργαστηριακή μελέτη** των σεισμικών φαινομένων άρχισε τη δεκαετία του 1960 και αποτελεί σημαντικό συμπλήρωμα των άλλων μεθόδων που εφαρμόζονται για την ερμηνεία των φαινομένων αυτών και τη μελέτη του εσωτερικού της Γης. Δε μπορούμε, βέβαια, στο εργαστήριο να αναπαραστήσουμε με λεπτομέρεια τις διαδικασίες που γίνονται στη φύση. Η δυνατότητα, όμως, μεταβολής κατά βούληση των συνθηκών στο εργαστήριο αποτελεί σπουδαίο πλεονέκτημα των εργαστηριακών μεθόδων γιατί πετυχαίνονται, με σχετική ευκολία, αποτελέσματα κάτω από μεγάλη ποικιλία συνθηκών. Ιδιαίτερα συνέβαλε στην κατανόηση της γένεσης και διάδοσης των σεισμικών κυμάτων η μελέτη των ελαστικών κυμάτων που παράγονται τεχνητά στο εργαστήριο.

Η **θεωρητική έρευνα**, που σχετίζεται με τα σεισμικά φαινόμενα, αφορά τη μελέτη των ελαστικών ιδιοτήτων των σωμάτων και του τρόπου γένεσης και διάδοσης των ελαστικών κυμάτων με κατάλληλη μαθηματική ανάλυση. Η έρευνα αυτή και κυρίως η θεωρία των ελαστικών κυμάτων αναπτύχθηκε ως ανεξάρτητος επιστημονικός κλάδος μέχρι να επινοηθούν οι σειсмоγράφοι. Μετά την εισαγωγή της μικροσεισμικής μεθόδου έρευνας έγινε δυνατή η συσχέτιση των θεωρητικών

αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων και η αλληλοσυμπλήρωση των δύο μεθόδων.

Σημαντική είναι η συμβολή των ηλεκτρονικών υπολογιστών στην ερμηνεία των σεισμικών παρατηρήσεων. Η συμβολή αυτή οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στο γεγονός ότι με ηλεκτρονικούς υπολογιστές δίνεται η δυνατότητα αναπαράστασης φυσικών διαδικασιών και καταστάσεων με μοντέλα (ομοιώματα, πρότυπα) που γίνονται με βάση θεωρητικά και πειραματικά δεδομένα. Ως παράδειγμα αναφέρουμε τη θεωρητική σύνθεση σειсмоγραμμάτων, που γίνεται με βάση τα στοιχεία που υπάρχουν για τον τρόπο γένεσης, διάδοσης και αναγραφής των σεισμικών κυμάτων.

Ο συνδυασμός των παρατηρήσεων (στη φύση, στο εργαστήριο) και της θεωρίας γίνεται με δύο βασικές μεθοδολογίες, με την απευθείας σύγκριση και με την αντιστροφή. Κατά την *απευθείας* μεθοδολογία εκπονείται μεγάλος αριθμός μοντέλων με βάση τη θεωρία, συγκρίνεται απευθείας κάθε ένα απ' αυτά με τις παρατηρήσεις και γίνεται αποδεκτό εκείνο το μοντέλο που συμφωνεί καλύτερα με τις επιστημονικές παρατηρήσεις. Κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας της *αντιστροφής*, χρησιμοποιούνται οι παρατηρήσεις για τον υπολογισμό των παραμέτρων του θεωρητικού μοντέλου και με διαδοχικές προσεγγίσεις βελτιώνεται η ακρίβεια υπολογισμού των παραμέτρων. Με τη μέθοδο της αντιστροφής μπορούν, προφανώς, να δοκιμαστούν διάφορα μοντέλα και να επιλεγεί εκείνο για το οποίο τα τελικά σφάλματα είναι ελάχιστα.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, επαρκείς γνώσεις Μαθηματικών και Φυσικής είναι απαραίτητες για τον ερευνητή σεισμολόγο. Οι ασχολούμενοι ιδιαίτερα με σεισμικές παρατηρήσεις, πρέπει να ξέρουν τις βασικές, τουλάχιστον, στατιστικές μεθόδους, τις μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης καθώς και προγραμματισμό ηλεκτρονικών υπολογιστών, για την καλύτερη αξιοποίηση του υλικού παρατήρησης. Επιπλέον, βασικές γνώσεις, που αφορούν τις μεθόδους και το αντικείμενο μελέτης άλλων γεωεπιστημών, όπως είναι οι άλλοι κλάδοι της Γεωφυσικής, η Γεωλογία, η Γεωδαισία, η Γεωχημεία, κλπ, είναι πολύ χρήσιμες στο σεισμολόγο.

1.3. Η Επιστημονική και Κοινωνική Σημασία της Σεισμολογίας

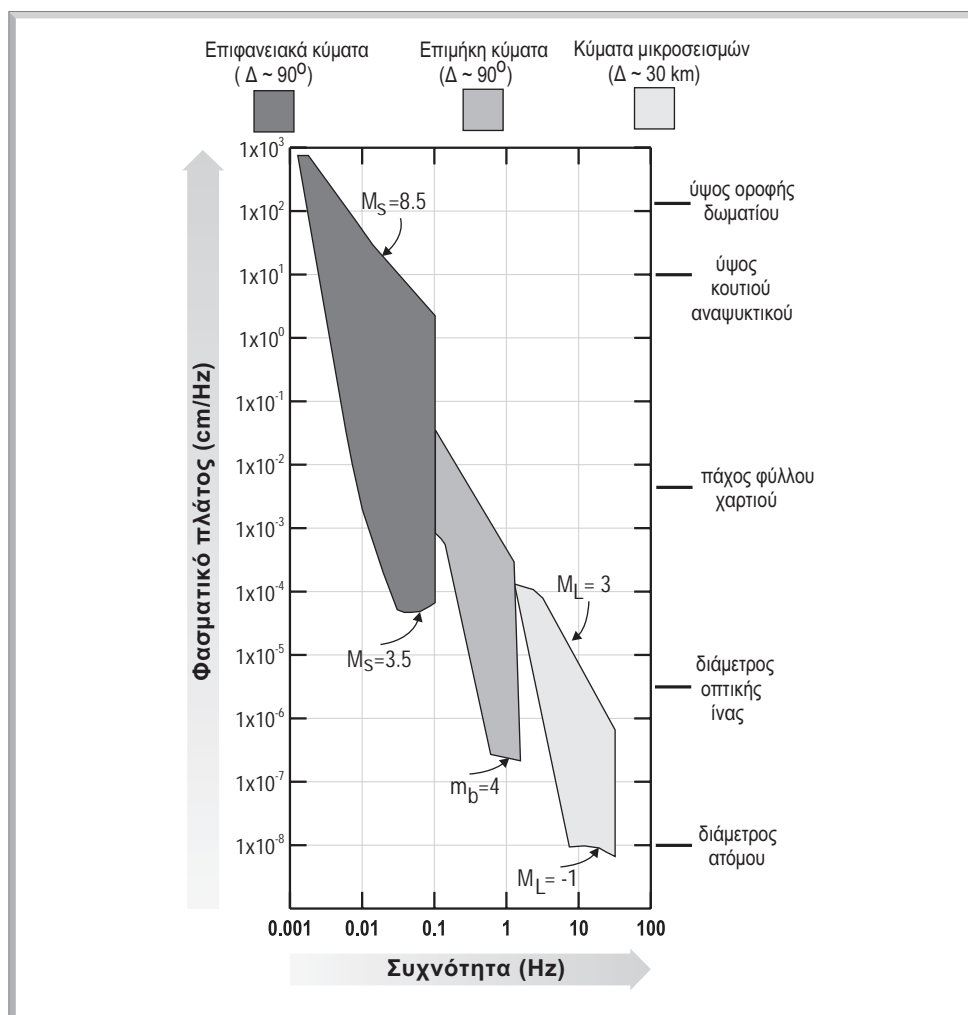
Η Σεισμολογία έχει τη δυνατότητα να εξετάζει έναν πολύ μεγάλο αριθμό θεμάτων, λόγω των πλούσιων επιστημονικών πληροφοριών που περιέχονται στα σύγχρονα σειсмоγράμματα και αφορούν τη δομή του εσωτερικού της Γης, τις γεωδυναμικές διαδικασίες και τα μακροσεισμικά αποτελέσματα των σεισμών. Εξ άλλ-

λου, η σύγχρονη ψηφιακή τεχνολογία επεξεργασίας επιστημονικών δεδομένων (ηλεκτρονικοί υπολογιστές, κλπ.) προσφέρει τη δυνατότητα αξιοποίησης ενός πολύ ευρέος φάσματος τιμών γεωφυσικών ποσοτήτων. Έτσι, μελετώνται: συχνότητες εδαφικών δονήσεων μεταξύ 10^{-5} και 10^5 Hz, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, μεταθέσεις εδαφικών δονήσεων μεταξύ $1 \mu\text{m}$ ($=10^{-6}$ m) και 1 m (εδαφικές ταχύτητες μεταξύ $100 \mu\text{m}/\text{sec}$ και $1 \text{ m}/\text{sec}$, εδαφικές επιταχύνσεις μεταξύ 10^{-3} g και 1 g), μεγέθη σεισμών με σεισμικές ροπές μεταξύ 10^5 Nm και 10^{23} Nm και γεωφυσικές δομές διαστάσεων μεταξύ λίγων μέτρων (στη σεισμική διασκόπηση) και 10^6 m. Στο σχήμα (1.1) φαίνεται διάγραμμα του εύρους τιμών των φασματικών πλατών εδαφικών δονήσεων, που ενδιαφέρουν τη Σεισμολογία, σε συνάρτηση με τη συχνότητά τους και σε σύγκριση με τις φυσικές διαστάσεις ορισμένων αντικειμένων. Είναι προφανή τα επιστημονικά αλλά κυρίως τα τεχνολογικά προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν ώστε να είναι δυνατό να καταγραφούν δονήσεις με πλάτη που διαφέρουν μέχρι 11 τάξεις μεγέθους.

Για τους παραπάνω λόγους, η Σεισμολογία έχει συμβάλει στη λύση σημαντικών επιστημονικών προβλημάτων, όπως είναι η δομή του εσωτερικού της Γης (αλλά και της Σελήνης) και οι γεωδυναμικές διαδικασίες, αλλά και σημαντικών προβλημάτων άμεσου κοινωνικού ενδιαφέροντος, όπως είναι η ανεύρεση δομών οικονομικού ή αρχαιολογικού ενδιαφέροντος με μεθόδους σεισμικής διασκόπησης και ο καθορισμός της σεισμικής επικινδυνότητας για την αντισεισμική προστασία.

Η σχετική απλότητα της θεωρίας των ελαστικών κυμάτων και η προβλέψιμη διαμόρφωση των κυμάτων αυτών κατά τη διάδοσή τους μέσα στη Γη, σε συνδυασμό με την αξιόπιστη καταγραφή σεισμικών κυμάτων ευρέος φάσματος συχνοτήτων (broad band) και μεγάλου εύρους πλατών (dynamic range), επιτρέπουν τη λήψη σημαντικών πληροφοριών για τη **δομή του εσωτερικού της Γης** από τα σειсмоγράμματα, παρά την πολυπλοκότητα αυτής της δομής. Έτσι, το κύριο μέρος των γνώσεών μας για τη γεωφυσική δομή του εσωτερικού της Γης (μεταβολή πυκνότητας, ελαστικών σταθερών, πίεσης, θερμοκρασίας, κλπ.) προήλθαν από την εφαρμογή σεισμικών μεθόδων. Επίσης, οι πρώτες αξιόπιστες πληροφορίες για τη δομή του εσωτερικού της Σελήνης προήλθαν από τις καταγραφές σειсмоγράφων που εγκαταστάθηκαν στην επιφάνειά της. Η γνώση αυτής της «ανατομίας» της Γης και του φυσικού δορυφόρου της συμβάλλουν στην κατανόηση της δημιουργίας και εξέλιξης των δύο αυτών ουρανίων σωμάτων αλλά και ολόκληρου του ηλιακού μας συστήματος.

Σημαντική είναι η συμβολή της Σεισμολογίας στη λύση **γεωτεκτονικών** προβλημάτων, όπως είναι τα προβλήματα που σχετίζονται με τη θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών, η οποία αποτελεί τη βάση της νέας παγκόσμιας τεκτονικής.



Σχ. 1.1. Εύρος τιμών των φασματικών πλατών εδαφικών δονήσεων, που ενδιαφέρουν τη Σεισμολογία, σε συνάρτηση με τη συχνότητά τους. Τα πλάτη αυτά συγκρίνονται με τις φυσικές διαστάσεις ορισμένων αντικειμένων (Ammon, 1999, τροποποιημένο).

Έτσι, με βάση τη χωρική κατανομή των σεισμικών εστιών καθορίζονται τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, με βάση τους μηχανισμούς γένεσης των σεισμών καθορίζονται οι κατευθύνσεις της κίνησής τους και με βάση το ρυθμό έκλυσης της σεισμικής ροπής και το μηχανισμό γένεσης των σεισμών καθορίζεται και η ταχύτητα κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών. Είναι, εξ άλλου, γνωστό ότι οι πρώτες επιστημονικές παρατηρήσεις για την ενεργό τεκτονική της Σελήνης προήλθαν από

τις καταγραφές σειсмоγράφων που εγκαταστάθηκαν στην επιφάνειά της. Η γνώση αυτή της «φυσιολογίας» της Γης και της Σελήνης συμβάλλει, επίσης, στην κατανόηση της γένεσης και της εξέλιξης του ηλιακού μας συστήματος.

Με τη **σεισμική διασκόπηση** των επιφανειακών στρωμάτων της Γης καθορίζεται η δομή τους με μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι με άλλες μεθόδους. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ελαστικά κύματα που παράγονται τεχνητά (με χημικές εκρήξεις, κλπ.) είναι ευαίσθητα σε σχετικά μικρές μεταβολές της δομής, λόγω του μικρού τους μήκους κύματος και της μεγάλης συχνότητάς τους, ενώ με τις άλλες μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης καθορίζεται η μέση δομή μεγάλων περιοχών. Έτσι, με σεισμικές μεθόδους έχουν καθοριστεί τα μεγαλύτερα κοιτάσματα πετρελαίου και για το λόγο αυτό οι σεισμικές αυτές έρευνες έχουν συμβάλλει σημαντικά στην αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος με εξαιρετικά ευεργετικές κοινωνικές συνέπειες. Επίσης, με μεθόδους σεισμικής διασκόπησης εντοπίζονται και άλλες δομές οικονομικού ενδιαφέροντος (κοιτάσματα μεταλλευμάτων, γαιανθράκων κλπ.) ή πολιτισμικού ενδιαφέροντος (εντοπισμός υπόγειων αρχαιολογικών χώρων).

Η **αντισεισμική προστασία** αποτέλεσε το σημαντικότερο λόγο μελέτης των σεισμών από τις αρχές του εικοστού αιώνα τουλάχιστον. Οι σχετικές, όμως, προσπάθειες άρχισαν να αποδίδουν ουσιαστικά αποτελέσματα από τα μέσα του εικοστού αιώνα και κυρίως μετά την καθιέρωση της θεωρίας των λιθοσφαιρικών πλακών, τη μελέτη της απόσβεσης της ισχυρής σεισμικής κίνησης και την καταγραφή της κίνησης αυτής (επιταχυνσιογράμματα). Έτσι, με βάση τη χωρική στατιστική κατανομή της σεισμικότητας, την αζιμουθιακή κατανομή της ακτινοβολίας των σεισμικών κυμάτων, τις σχέσεις απόσβεσης των σεισμικών κυμάτων κατά τη διάδοσή τους από τη σεισμική εστία στη θέση ενός υπό κατασκευή τεχνικού έργου και τις ιδιότητες του εδάφους θεμελίωσης του έργου καθορίζονται πιθανολογικά οι αναμενόμενες τιμές της ισχυρής σεισμικής κίνησης (π.χ. σεισμική επιτάχυνση), δηλαδή η *σεισμική επικινδυνότητα* της θέσης. Με τη μέθοδο αυτή εκπονείται για κάθε χώρα *χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας*, ο οποίος αποτελεί μέρος του αντισεισμικού κανονισμού και χρησιμοποιείται από τους μηχανικούς για τον αντισεισμικό σχεδιασμό και κατασκευή των τεχνικών έργων με αντοχή αντίστοιχη με τη ζώνη στην οποία βρίσκεται η θέση της κατασκευής. Εκτός από τη μέθοδο αυτή, που βασίζεται στη στατιστική εκτίμηση (πρόγνωση) της χωρικής κατανομής της σεισμικότητας και στην υπόθεση ότι η σεισμικότητα σε κάθε ζώνη δε μεταβάλλεται με το χρόνο, έγιναν προσπάθειες, ιδιαίτερα κατά τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, για την πρόγνωση (του χώρου, του χρόνου και του μεγέθους) συγκεκριμένου ισχυρού σεισμού. Η έρευνα αυτή έδειξε ότι η βραχυ-

πρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών (ακρίβεια στο χρόνο μέχρι λίγες εβδομάδες) είναι ανέφικτη με το σημερινό επίπεδο της σχετικής σεισμολογικής γνώσης. Έρευνες, όμως, της τελευταίας δεκαετίας, ιδιαίτερα πάνω στη μέθοδο της επιταχυνόμενης και επιβραδυνόμενης σεισμικής παραμόρφωσης, έδειξαν ότι είναι μάλλον εφικτή η μεσοπρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών (ακρίβεια στο χρόνο της τάξης των λίγων ετών) και συνεπώς ο καθορισμός μεταβαλλόμενης με το χρόνο σεισμικής επικινδυνότητας και η εκπόνηση αντίστοιχων χαρτών (π.χ. ανά 5 έτη).

1.4. Σύντομη Ιστορία της Σεισμολογίας

Η Σεισμολογία έχει μακρά ιστορία, όσο και η φιλοσοφία, αφού οι μακροσεισμικές παρατηρήσεις και οι πρώτες ιδέες για τα αίτια γένεσης των σεισμών άρχισαν τον 6^ο π.Χ. αιώνα από τους έλληνες φυσιοκράτες φιλοσόφους, οι οποίοι διατύπωσαν και τις πρώτες φιλοσοφικές ιδέες. Όμως, η Σεισμολογία ως σύγχρονη φυσική επιστήμη έχει ηλικία μόλις 100 ετών, αφού η βασική θεωρία των ελαστικών (σεισμικών) κυμάτων αναπτύχθηκε κατά τον 19^ο αιώνα και η εφεύρεση των σειсмоγράφων, με τους οποίους πραγματοποιούνται ακριβείς μετρήσεις που επιδέχονται μαθηματική (θεωρητική) ανάλυση, έγινε στο τέλος του 19^{ου} αιώνα. Για το λόγο αυτό, μπορούμε να χωρίσουμε την ιστορία της Σεισμολογίας στην κλασική περίοδο (550 π.Χ.-1550), στην περίοδο ανάπτυξης της βασικής θεωρίας της ελαστικότητας, της διάδοσης των ελαστικών κυμάτων και της εφεύρεσης των σειсмоγράφων (1550-1900) και στη νέα περίοδο της Σεισμολογίας (1900-2004).

α) Κλασική περίοδος (550 π.Χ.-1550 μ.Χ.)

Η Σεισμολογία γεννήθηκε στις ελληνικές πόλεις της αρχαίας Ιωνίας (Μικρά Ασία) και Κάτω Ιταλίας μαζί με τη Φιλοσοφία και τη Δημοκρατία από τους φυσιοκράτες φιλόσοφους. Έτσι, ο Θαλής ο Μιλήσιος (624-546 π.Χ.) έλεγε ότι το νερό είναι υπεύθυνο για τους σεισμούς, ο Πυθαγόρας (585-500 π.Χ.) πίστευε ότι η ροή θερμότητας από το εσωτερικό της Γης δημιουργεί τα γεωλογικά φαινόμενα και τους σεισμούς και ο Αρχέλαος (480-410 π.Χ.) θεωρούσε ότι ο αέρας εισέρχεται μέσα στη Γη σε κοιλότητες και συμπιέζεται από νέον αέρα μέχρις ότου αναγκαστεί να κινηθεί προς τα επάνω σπάζοντας τα πετρώματα και προκαλώντας σεισμούς. Ο Αριστοτέλης (384-323 π.Χ.) στα «Μετεωρολογικά» διατύπωσε μια γενικευμένη επιστημονική υπόθεση για τα αίτια γένεσης των σεισμών, βασιζόμενος σε προηγούμενες σχετικές αντιλήψεις (άποψη Αρχέλαου, κλπ.), στη δική του

υπόθεση περί «αναθυμιάσεων» και «ανέμου» και σε μακροσεισμικές παρατηρήσεις που έγιναν απ' αυτόν ή από προηγούμενους. Οι απόψεις μεταγενεστέρων Ελλήνων, Λατίνων και Βυζαντινών συγγραφέων ήταν παρόμοιες με αυτές του Αριστοτέλη και ο Σενέκας (4 π.Χ.-65 μ.Χ.) συνόψισε σε βιβλίο του τις προηγούμενες αντιλήψεις για τα αίτια γένεσης των σεισμών. Η θεωρία του Αριστοτέλη δέσποσε στη Δύση και κατά τη διάρκεια όλου του Μεσαίωνα όταν διάφοροι συγγραφείς διατύπωσαν παρόμοιες απόψεις, όπως ο Agricola (1494-1555), ο οποίος είχε την άποψη ότι οι σεισμοί οφείλονται σε αέρια που παράγονται κατά τη χημική αντίδραση της φωτιάς μέσα στη Γη (κεντρικό πυρ) και της υγρασίας.

Παράλληλα με τη διατύπωση ιδεών για τα αίτια γένεσης των σεισμών πραγματοποιήθηκαν και αξιόλογες μακροσεισμικές παρατηρήσεις για τους μεγάλους καταστρεπτικούς σεισμούς που έγιναν κατά την περίοδο αυτή. Ως παραδείγματα αναφέρουμε το σεισμό της Ελίκης το 373 π.Χ., που υπήρξε ένα σπουδαίο γεγονός για την εξέλιξη της ελληνικής επιστημονικής σκέψης, γιατί ο Αριστοτέλης έκανε επιστημονική ανάλυση του σεισμού αυτού. Άλλο ενδιαφέρον παράδειγμα αποτελεί ο πολύ μεγάλος σεισμός ($M \sim 8$) που έγινε το 365 μ.Χ. νοτιοδυτικά της Κρήτης, του οποίου το τεράστιο θαλάσσιο κύμα προκάλεσε μεγάλες καταστροφές σε όλη την ανατολική Μεσόγειο. Κατά την περίοδο αυτή επινοήθηκε και κατασκευάστηκε το πρώτο σεισμολόγιο το 132 μ.Χ. από τον Κινέζο φιλόσοφο Zhang Heng (σχ. 1.2).

β) Περίοδος εμφάνισης της νέας επιστήμης (1550-1900)

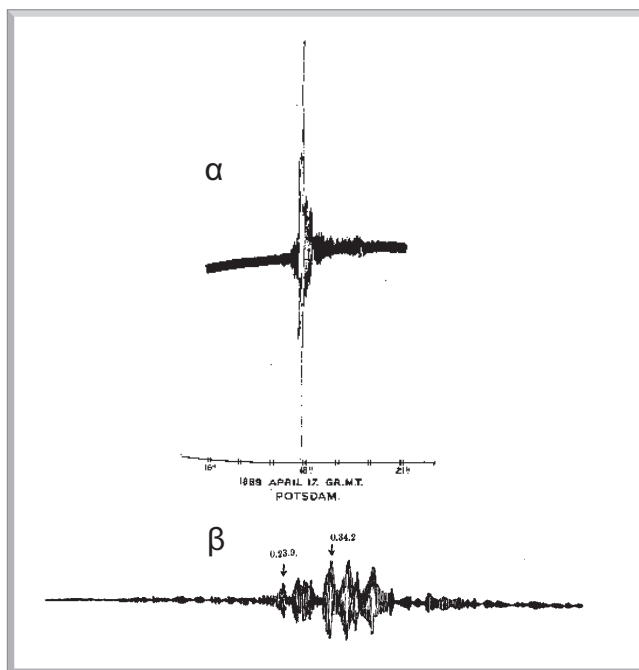
Κατά την περίοδο αυτή επικρατεί γενικά νέο πνεύμα για την επιστημονική έρευνα. Οι επιστήμονες ενδιαφέρονται τώρα ιδιαίτερα για την πειραματική (παρατηρησιακή) έρευνα. Παρ' ότι από την αρχή ακόμα αυτής της περιόδου οι φιλόσοφοι άρχισαν να αλλάζουν απόψεις και να αναπτύσσουν νέες θεωρίες για τα αίτια γένεσης των σεισμών, οι θεωρίες αυτές που διατυπώθηκαν ακόμα και μέχρι το δέκατο έβδομο αιώνα, όπως είναι η *θεωρία των υπογείων εκρήξεων*, ήταν σαφώς επηρεασμένες από τις σκέψεις του Αριστοτέλη. Έτσι, ο Gardan (1501-1576) υποστήριξε ότι οι σεισμοί οφείλονται σε υπόγειες εκρήξεις που προκαλούνται κατά την ένωση θείου και αζώτου, ο A. Kircher το 1678 συσχέτισε τους σεισμούς και τα ηφαίστεια με αγωγούς φωτιάς που βρίσκονται στο εσωτερικό της Γης, ενώ οι M. Lister και N. Lasmery κατά το δέκατο όγδοο αιώνα θεώρησαν ότι οι σεισμοί προκαλούνται από εκρήξεις εύφλεκτων υλικών, τα οποία είναι συγκεντρωμένα σε ορισμένες περιοχές του εσωτερικού της Γης, άποψη που αποδέχτηκε και ο Νεύτων.



Σχ. 1.2. Το πρώτο σεισμολόγιο που κατασκευάστηκε το 132 μ.Χ. από τον Κινέζο φιλόσοφο Zhang Heng (78-132 μ.Χ.). Το σεισμολόγιο περιείχε εκκρεμές (κατακόρυφος κύλινδρος) το οποίο, αποκρινόμενο στην εδαφική δόνηση, ωθούσε μέσω μοχλών σφαιρίδια να πέσουν σε υποδοχείς (ανοικτά στόματα βατράχων) που βρίσκονται στη βάση του.

Παράλληλα έγιναν, κατά το διάστημα αυτό, αξιόλογες μακροσεισμικές παρατηρήσεις για καταστρεπτικούς σεισμούς οι οποίες αποτέλεσαν τη βάση για τη ραγδαία ανάπτυξη της θεωρίας της ελαστικότητας κατά το δέκατο ένατο αιώνα. Έτσι, η μελέτη των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων του μεγάλου σεισμού της Λισσαβώνας της 1^{ης} Νοεμβρίου 1755, ο οποίος προκάλεσε εκτεταμένες καταστροφές και μεγάλο θαλάσσιο κύμα, οδήγησε το 1760 τον J. Mitchell ώστε να θεωρήσει τη σεισμική κίνηση ως αποτέλεσμα της **διάδοσης ελαστικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης**, για πρώτη φορά στην ιστορία της Σεισμολογίας. Η ιδέα αυτή αναπτύχθηκε παραπέρα από τους T. Young, R. Mallet και J. Milne. Εξ άλλου, από τη μελέτη των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων του μεγάλου σεισμού της Νάπολης το 1857, ο Mallet κατέληξε στο σημαντικό συμπέρασμα ότι κάθε σεισμός γεννιέται σε ορισμένη **σεισμική εστία**, που σήμερα ονομάζουμε υπόκεντρο, και στη συνέχεια διαδίδεται σε μεγαλύτερες αποστάσεις, παρ' ότι πίστευε ακόμα στη θεωρία των υπογείων εκρήξεων και συνεπώς ότι παράγονται στην εστία μόνο κύματα συμπίεσης (επιμήκη κύματα).

Οι πρώτοι που ασχολήθηκαν με πειραματικά προβλήματα ελαστικότητας ήταν ο Γαλιλαίος (1638) και ο Hook (1660) που διατύπωσε και τον ομώνυμο νόμο, ενώ οι Γάλλοι Navier (1821) και Cauchy (1822) είναι οι πρώτοι που ανέπτυξαν



Σχ. 1.3. (α) Ένα από τα πρώτα σειсмоγράμματα. Προέρχεται από σεισμό που έγινε στην Ιαπωνία στις 17 Απριλίου 1889 και καταγράφηκε από σειμογράφο τύπου Rebeur-Paschwitz εγκατεστημένο στο Potsdam της Γερμανίας (Von Rebeur-Paschwitz, E., 1889. The earthquake of Tokio, April 18, 1889, *Nature*, Lond. **40**, 294-295). (β) Καταγραφή κοντινού σεισμού από οριζόντιο σειμογράφο τύπου Milne εγκατεστημένο στην Ιαπωνία. Η χρησιμότητά της καταγραφής είναι περιορισμένη λόγω έλλειψης συστήματος απόσβεσης (Milne, J. 1901. *Seismological investigations. -Sixth report of the committee... Rep. Brit. Ass. Advmt. Sci.* 40-54).

τις εξισώσεις της θεωρίας της ελαστικότητας. Το 1830 ο Γάλλος Poisson και το 1849 ο Άγγλος Stokes χρησιμοποίησαν τις εξισώσεις της κίνησης και τους καταστατικούς νόμους της ελαστικότητας για να δείξουν ότι υπάρχουν δύο και μόνο δύο θεμελιώδεις τύποι ελαστικών κυμάτων που διαδίδονται στο εσωτερικό ομογενούς στερεού, τα επιμήκη κύματα (P κύματα) και τα εγκάρσια κύματα (S κύματα). Το 1887 ο λόρδος Rayleigh έδειξε θεωρητικά την ύπαρξη των ομώνυμων επιφανειακών κυμάτων και το 1911 ο Love έδειξε, επίσης θεωρητικά, την ύπαρξη του δεύτερου θεμελιώδους είδους επιφανειακών κυμάτων που φέρουν το όνομά του. Εξ άλλου, ο Poisson και ο Άγγλος Lamb διατύπωσαν τη βασική θεωρία που αφορά την ελεύθερη ταλάντωση στερεάς σφαίρας, η οποία εφαρμόστηκε αργότερα για την αξιοποίηση των αναγραφών της ελεύθερης ταλάντωσης της Γης. Η

ανάπτυξη της θεωρίας της ελαστικότητας κατά το 19^ο αιώνα αποτέλεσε τη μια από τις δύο θεμελιώδεις βάσεις για τη δημιουργία της σύγχρονης επιστήμης της Σεισμολογίας, ενώ την άλλη αποτέλεσε η εφεύρεση του σειсмоγράφου.

Οι πρώτοι σειсмоγράφοι κατασκευάστηκαν στην Ιαπωνία από τους Άγγλους Cray, Milne και Ewing περί το 1880. Αυτοί ήταν μηχανικοί σειсмоγράφοι και κατέγραφαν πάνω σε αιθαλωμένο γυαλί. Η πρώτη αναγραφή μακρινού σεισμού έγινε τυχαία το 1889 στο Potsdam από οριζόντιο αυτογραφικό εκκρεμές τύπου Rebeur-Paschwitz (σχ. 1.3α). Αυτή οφειλόταν σε σεισμό της Ιαπωνίας, που έγινε σε απόσταση 9000 Km περίπου από το σημείο αναγραφής. Τα κύματα Rayleigh αναγνωρίστηκαν για πρώτη φορά στα σειсмоγράμματα το 1890 από τον Oldham στην Αγγλία και τον Wiechert στη Γερμανία. Το 1898 ο E. Wiechert εισήγαγε τον πρώτο σειсмоγράφο με ιξώδη απόσβεση, ο οποίος έχει τη δυνατότητα αναγραφής του συνόλου της εδαφικής κίνησης που οφείλεται σε ορισμένο σεισμό, ενώ οι σειсмоγράφοι χωρίς απόσβεση παρέχουν ακριβή αναγραφή μόνο επί βραχύ χρονικό διάστημα, στην αρχή της σεισμικής κίνησης.

γ) Νέα περίοδος της Σεισμολογίας (1900-2004)

Αυτή είναι η περίοδος της Σεισμολογίας ως σύγχρονης φυσικομαθηματικής επιστήμης, επειδή συνδυάστηκε η θεωρία της ελαστικότητας, που αναπτύχθηκε κατά το 19^ο αιώνα, με αξιόπιστες σεισμολογικές παρατηρήσεις που έγιναν κυρίως με σειсмоγράφους των οποίων η τεχνολογία βελτιωνόταν συνεχώς.

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα δημιουργήθηκαν αρκετοί σεισμολογικοί σταθμοί οι αναγραφές των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των επικέντρων των ισχυρών σεισμών, η γεωγραφική κατανομή των οποίων έδειξε ότι οι εστίες τους δεν κατανέμονται τυχαία αλλά κατά μήκος συγκεκριμένων ζωνών διάρρηξης. Οι παρατηρήσεις αυτές οφείλονται στη λειτουργία σειсмоγράφων με απόσβεση, όπως είναι ο μηχανικής καταγραφής σειсмоγράφος που κατασκευάστηκε στη Γερμανία το 1900 από τον Wiechert και ο πρώτος ηλεκτρομαγνητικός σειсмоγράφος, που κατασκευάστηκε το 1906 από τον B. Galitzin και χρησιμοποιήθηκε σε σεισμολογικό δίκτυο στη Ρωσία. Το 1925 κατασκευάστηκε ο οπτικής αναγραφής σειсмоγράφος Wood-Anderson, που χρησιμοποιήθηκε αργότερα (1935) για τον υπολογισμό του τοπικού μεγέθους από τον Ch. Richter. Το 1935 κατασκευάστηκε ηλεκτρομαγνητικός σειсмоγράφος από τον Benioff ο οποίος φέρει το όνομά του και έχει τη δυνατότητα καταγραφής βραχείας ή μακράς περιόδου (ανάλογα με την περίοδο του γαλβανόμετρου με το οποίο συνδέεται) ακόμη και ασθενών εδαφικών δονήσεων που οφείλονται σε σεισμούς ή πυρηνικές εκρήξεις.

Έτσι, η πρώτη πυρηνική έκρηξη (Trinity) που πραγματοποιήθηκε στις 16 Ιουλίου 1945 αναγράφηκε στο σεισμολογικό σταθμό Tucson και η καταγραφή αυτή χρησιμοποιήθηκε από τον Beno Gutenberg για τον ακριβή υπολογισμό του χρόνου της έκρηξης (γιατί δεν λειτούργησε το σύστημα υπολογισμού χρόνου στο χώρο της δοκιμής). Στη συνέχεια, η λεπτομερής σεισμική αναγραφή της πυρηνικής έκρηξης στο νησί Bikini το 1946 και η πραγματοποίηση το 1949 πυρηνικής έκρηξης από τη Σοβιετική Ένωση αποτέλεσαν την αιτία ανάπτυξης από τις ΗΠΑ ενός μεγάλου προγράμματος για την ανίχνευση των πυρηνικών εκρήξεων. Το πρόγραμμα αυτό είχε σημαντικές συνέπειες για τη Σεισμολογία, μεταξύ των οποίων είναι η εγκατάσταση, στις αρχές της δεκαετίας του 1960, του Διεθνούς Τυποποιημένου Δικτύου Σεισμογράφων WWSSN (Worldwide Standardized Seismograph Network). Κάθε ένας από τους 120 σταθμούς του δικτύου αυτού περιλάμβανε τρεις βραχείας περιόδου (τύπου Benioff) και τρεις μακράς περιόδου (τύπου Press-Ewing) καλώς βαθμολογημένους ηλεκτρομαγνητικούς σεισμογράφους. Στη συνέχεια, άρχισε η ανάπτυξη *ηλεκτρονικών σεισμογράφων* που εγκαταστάθηκαν σε διάφορα μέρη. Ένα από τα σημαντικότερα δίκτυα με σεισμογράφους ψηφιακής καταγραφής και ευρέος φάσματος συχνοτήτων είναι το Παγκόσμιο Ψηφιακό Σεισμικό Δίκτυο (Global Digital Seismic Network), του οποίου η εγκατάσταση άρχισε το 1980 από το IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) και την Γεωλογική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών (USGS).

Συνέπεια της εγκατάστασης και λειτουργίας σεισμογράφων με απόσβεση ήταν η αναγνώριση των ασυνεχειών πρώτης τάξης στο εσωτερικό της Γης με την ερμηνεία των σεισμογραμμάτων κατά τις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα. Έτσι, περί το 1900 ο R. Oldham αναγνώρισε στα σεισμογράμματα τα επιμήκη, P, και τα εγκάρσια, S, κύματα και το 1906 διαπίστωσε την ύπαρξη του πυρήνα της Γης από την απουσία απ' ευθείας P και S κυμάτων σε αποστάσεις πηγής-δέκτη μεγαλύτερες των 100°, ενώ ο Gutenberg το 1914 χρησιμοποίησε τους χρόνους διαδρομής των σεισμικών κυμάτων που διεισδύουν καθώς και αυτών που ανακλώνται στον πυρήνα της Γης και υπολόγισε σε 2900 km το βάθος του υγρού πυρήνα (δηλαδή πολύ κοντά στην τιμή των 2889 km που γνωρίζουμε σήμερα). Το 1909 ο Σέρβος Mohorovicic εντόπισε την ασυνέχεια ταχύτητας μεταξύ του φλοιού και του μανδύα, η οποία φέρει το όνομά του, ενώ ο εσωτερικός πυρήνας της Γης ανακαλύφθηκε από την Inge Lehman (από τη Δανία) το 1939. Τους πρώτους αξιόλογους πίνακες χρόνων διαδρομής πρότεινε ο Zöppritz το 1907. Ο H. Jeffreys το 1939 προσδιόρισε την πρώτη κατακόρυφη τομή δομής ταχύτητας της Γης (από την επιφάνεια μέχρι το κέντρο της) και πρότεινε τους χρησιμοποιούμενους μέχρι σήμερα γνωστούς πίνακες J-B (Jeffreys-Bullen) οι οποίοι προβλέπουν τους χρό-

νους άφιξης των P κυμάτων σ' οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας της Γης με την αξιοσημείωτη ακρίβεια του 0.2%. Η πρώτη ελεύθερη ταλάντωση της Γης παρατηρήθηκε από τον Benioff και ήταν αυτή που προκλήθηκε από το μεγάλο σεισμό της Χιλής το 1960. Αυτή αποτέλεσε την αρχή για τη μελέτη της δομής της Γης και με τη θεωρία των κανονικών αρμονικών (normal modes).

Το μεγαλύτερο, ίσως, επιστημονικό βήμα για τον τρόπο γένεσης των σεισμών είναι η διαπίστωση του H. Reid το 1910, που βασίστηκε σε γεωδαιτικές μετρήσεις οι οποίες έγιναν πριν και μετά το μεγάλο σεισμό του Αγίου Φραγκίσκου το



Φωτ. 1.4. Στη φωτογραφία εικονίζονται μερικοί από τους πρωτοπόρους στην έρευνα πάνω στη Σεισμολογία του 20^{ου} αιώνα. Στην πρώτη σειρά, από αριστερά προς τα δεξιά: (α) Archie King, (β) Leason H. Adams (1887-1969), (γ) Hugo V. Benioff (1899-1968), (δ) Beno Gutenberg (1889-1960), (ε) Harrold Jeffreys (1891-1989), (στ) Charles F. Richter (1900-1985), (ζ) Arthur L. Day (1869-1960), (η) Harry O. Wood (1879-1958), (θ) Ralph Arnold, (ι) John P. Buwalda (1886-1954). Στη δεύτερη σειρά, από αριστερά προς τα δεξιά: (α) Alden C. Waite, (β) Perry Byerly (1897-1978), (γ) Harry O. Reid (1859-1944), (δ) John A. Anderson (1876-1959), (ε) James B. Macelwane (1883-1956) (φωτογραφία από: The Caltech Institute Archives).

1906, ότι κάθε σεισμός οφείλεται σε απελευθέρωση ενέργειας κατά τη διάρρηξη **σεισμικού ρήγματος**. Η ενέργεια αυτή δημιουργείται κατά τη βραδεία και επί σημαντικό χρονικό διάστημα παραμόρφωση των πετρωμάτων του εστιακού χώρου πριν τη γένεση του σεισμού. Αυτή είναι γνωστή ως *θεωρία της ελαστικής ανάπαλσης* και αποτελεί μέχρι σήμερα τη βασική θεωρία για τον τρόπο γένεσης των σεισμών. Το 1917 ο Shida ήταν ο πρώτος που διαπίστωσε ότι οι πρώτες αποκλίσεις των P κυμάτων είναι συμπίεσεις στις δύο κατακορυφή στερεές γωνίες και αραιώσεις στις δύο άλλες κατακορυφή γωνίες που σχηματίζει το επίπεδο του ρήγματος και το κάθετο στη διεύθυνση της κίνησης επίπεδο (βοηθητικό επίπεδο). Το 1923 ο H. Nakano εισήγαγε τη θεωρία της ακτινοβολίας των σεισμικών κυμάτων από σεισμική πηγή που οφείλεται σε διπλό ζεύγος δυνάμεων, η οποία ερμηνεύει την κατανομή αυτή των συμπίεσεων και αραιώσεων και αποδείχθηκε ορθή μετά από σχετικές επιστημονικές συζητήσεις επί τέσσερις δεκαετίες. Ο Byerly ανέπτυξε το 1928 μέθοδο καθορισμού του μηχανισμού γένεσης των σεισμών με βάση τις πρώτες αποκλίσεις των P κυμάτων και οι Langston and Helmberger (1975) και Nabelek (1984) ανέπτυξαν για τον ίδιο σκοπό μέθοδο με βάση τη μοντελοποίηση των κυματομορφών των P και S κυμάτων. Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόστηκαν και εξακολουθούν να εφαρμόζονται αποτελεσματικά για τον καθορισμό του μηχανισμού γένεσης των ισχυρών σεισμών.

Το 1935 ο Charles Richter εισήγαγε την κλίμακα του τοπικού μεγέθους, M_L , το 1945 ο Gutenberg εισήγαγε την κλίμακα του επιφανειακού μεγέθους, M_S , το 1956 οι Gutenberg και Richter πρότειναν την τελική μορφή της κλίμακας του χωρικού μεγέθους, m_b , και το 1979 οι Hanks και Kanamori πρότειναν την κλίμακα του μεγέθους ροπής. Το μέγεθος αποτελεί μέτρο της σεισμικής ενέργειας που απελευθερώνεται στην εστία ενός σεισμού και για το λόγο αυτό η εισαγωγή της φυσικής αυτής ποσότητας στη Σεισμολογία συνέβαλε σημαντικά στην εξέλιξη της σε ποσοτική επιστήμη.

Μεγάλη βελτίωση σημείωσε τα τελευταία χρόνια η ακρίβεια καθορισμού της γεωγραφικής και κατακόρυφης κατανομής των σεισμικών εστιών, που οφείλεται κυρίως στην εγκατάσταση του διεθνούς τυποποιημένου δικτύου σειсмоγράφων WWSSN στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Ορίστηκαν, έτσι, με αξιοπιστία οι μεγάλες ζώνες διάρρηξης της επιφάνειας της Γης από την κατανομή των εστιών των επιφανειακών σεισμών ($h \leq 60$ Km). Επιβεβαιώθηκε, επίσης, η γένεση των σεισμών βάθους, την ύπαρξη των οποίων εισηγήθηκε το 1928 ο K. Wadati, και διαπιστώθηκε ότι οι εστίες βρίσκονται πάνω σε κεκλιμένες ζώνες γνωστές ως ζώνες Wadati- Benioff.

Κατά το δεύτερο μισό της δεκαετίας του 1960 άρχισε να αναπτύσσεται η *θεω-*

ρία των λιθοσφαιρικών πλακών που αποτελεί τη βάση της νέας παγκόσμιας τεκτονικής. Παρ' ό τι τα πρώτα στοιχεία για τη θεωρία αυτή προέκυψαν από μαγνητικές μετρήσεις που δείχνουν επέκταση του θαλάσσιου πυθμένα, η θεμελίωση της θεωρίας αυτής, η οποία αποτελεί το σημερινό «παράδειγμα» (κατά T. Kuhn) για όλες τις γεωεπιστήμες, βασίστηκε κατά κύριο λόγο σε σεισμολογικές παρατηρήσεις, αφού τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, καθώς και οι κατευθύνσεις και οι ταχύτητες κίνησής τους, καθορίζονται κυρίως με σεισμολογικές μεθόδους, όπως έχουμε ήδη αναφέρει.

Μεταξύ του 1969 και του 1972 εγκαταστάθηκε σειсмоγραφικό δίκτυο στη Σελήνη με το πρόγραμμα «Απόλλων» και κατέγραψε επιφανειακούς σεισμούς με βάθη μέχρι 100 Km αλλά και σεισμούς βάθους με βάθη μεταξύ 800 και 1000 Km. Το 1976 εγκαταστάθηκε στον Άρη ο πρώτος σειсмоγράφος με το πρόγραμμα «Viking 2», αλλά αυτός κατέγραψε μόνο έναν πιθανό σεισμό, λόγω του υψηλού θορύβου που προκαλείται εκεί και από τον άνεμο.

Κατά την τελευταία δεκαετία η σεισμολογική έρευνα επηρεάστηκε έντονα από την αναπτυσσόμενη θεωρία του χάους. Δείχθηκε π.χ., ότι η διάρρηξη στα ρήγματα κατά τη γένεση ισχυρών σεισμών ακολουθεί τους νόμους του «αιτιοκρατικού χάους», ότι η περιοχική σεισμικότητα καθώς και επαγόμενη σεισμικότητα ερμηνεύονται με τη θεωρία της «αυτο-οργανωμένης κρισιμότητας» και ότι η γένεση των κύριων σεισμών και η προηγούμενη αυτών επιταχυνόμενη σεισμικότητα ερμηνεύεται με τη θεωρία του «κρίσιμου σημείου» (Papazachos, 2003).

Η διεθνής συνεργασία, από τις αρχές σχεδόν του 20^{ου} αιώνα, αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα ανάπτυξης της Σεισμολογίας. Το 1904 δημιουργήθηκε ο πρώτος Διεθνής Σύνδεσμος της Σεισμολογίας (International Association of Seismology) αλλά το 1916 σχεδόν διαλύθηκε και από το 1922 αποτέλεσε κλάδο της Διεθνούς Ένωσης Γεωδαισίας και Γεωφυσικής IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics), η οποία ιδρύθηκε το 1919. Το 1930 η IUGG αναδιοργανώθηκε και περιέλαβε ως έναν από τους συνδέσμους της το Διεθνή Σύνδεσμο Σεισμολογίας, ο οποίος το 1951 έλαβε το σημερινό του όνομα Διεθνής Σύνδεσμος Σεισμολογίας και Φυσικής του Εσωτερικού της Γης IASPEI (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior). Μια από τις επιτροπές της είναι η Ευρωπαϊκή Σεισμολογική Επιτροπή ESC (European Seismological Commission).

Η ανταλλαγή σεισμολογικών δεδομένων μέσω δελτίων συνέβαλε, επίσης, στην εξέλιξη της Σεισμολογίας. Από το 1922 εκδίδεται το Διεθνές Σεισμολογικό Δελτίο, ISS (International Seismological Summary), του οποίου συνέχεια, από το 1963, αποτελεί το Δελτίο του Διεθνούς Σεισμολογικού Κέντρου, ISC (International Seismological Centre), στο Newbury της Αγγλίας. Το 1906 ιδρύθηκε στο

Στρασβούργο το Κεντρικό Διεθνές Γραφείο Σεισμολογίας BCIS (Bureau Central International de Seismologie) το οποίο δημοσίευσε στοιχεία σεισμών από το 1904 μέχρι το 1975. Το 1976 ιδρύθηκε από την ESC το Κεντρικό Ευρωπαϊκό Σεισμολογικό Κέντρο EMSC (European-Mediterranean Seismological Centre), το οποίο από το 1993 στεγάζεται στο Laboratoire de Détection et de Geophysique (LDG) της Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας, CEA (Commissariat à l' Energie Atomique) κοντά στο Παρίσι και δημοσιεύει στοιχεία σεισμών της Μεσογείου. Από το 1968 σεισμολογικά δεδομένα δημοσιεύει σε μηνιαία δελτία του το Εθνικό Κέντρο Σεισμικών Πληροφοριών, NEIC (National Earthquake Information Center), της Γεωλογικής Υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών, USGS (United States Geological Survey), και παρόμοιες πληροφορίες δημοσιεύονται από το 1977 από το Πανεπιστήμιο Harvard, με βάση τις καταγραφές 3000 μόνιμων σεισμολογικών σταθμών. Αποφασιστικής, βεβαίως, σημασίας για την γρήγορη ανταλλαγή και επεξεργασία των σεισμολογικών δεδομένων υπήρξε η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών κατά τη δεκαετία του 1960 που επηρέασε σημαντικά και τη θεωρία της Σεισμολογίας. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1970 παράγονται ψηφιακά δεδομένα με σειсмоγράφους ευρέος φάσματος συχνοτήτων από διάφορα κέντρα, όπως είναι το IRIS (ΗΠΑ), GEOFON (Γερμανία) και ORFEUS (Ολλανδία).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ammon, Ch.J., (1999). *Understanding Earthquakes*, Saint Louis University, pp.199.
- Langston, C. A., and Helmberger. D. V. (1975). A procedure for modeling shallow dislocation sources. *Geophys. J.*, **42**, 117-130.
- Nabelek, J. (1984). Determination of earthquake source parameters from inversion of body waves. *Ph. D. Thesis*, University of Cambridge.
- Papazachos, B.C. (2003). Chaos in seismology and earthquake prediction. *Pract. Acad. Athens*, **78**, 189-228.