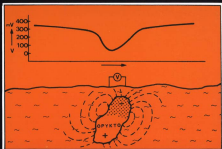


ΒΑΣΙΛΗ Κ. ΠΑΠΑΖΑΝΟΥ

Καθηγητή Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική», με την ευρύτερη έννοια του όρου, περιλαμβάνει την εφαρμογή οποιασδήποτε γεωφυσικής μεθόδου για τη λύση προβλημάτων τα οποία παρουσιάζουν πρακτικό ενδιαφέρον για τον άνθρωπο. Όμως, επικράτησε διεθνώς η έννοια του όρου αυτού να σημαίνει τη γεωφυσική διασκόπηση των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης για τον εντοπισμό γεωλογικών δομών οικονομικής σημασίας. Συνεπώς, θα μπορούσε εναλλακτικά το βιβλίο αυτό να ονομάζεται «Εισαγωγή στις Μεθόδους Γεωφυσικής Διασκόπησης».

Το δεύτερο μέρος του βιβλίου μου «Εισαγωγή στη Γεωφυσική, 1978» αποτέλεσε τη βάση του παρόντος βιβλίου, αλλά το παρόν βιβλίο περιέχει υπερτριπλάσια ύλη και είναι αναβαθμισμένο ποιοτικά.

Το βιβλίο αυτό βασίζεται στη σύγχρονη διεθνή βιβλιογραφία αλλά και στην πολυετή διδακτική και ερευνητική εμπειρία μου σε σχετικά θέματα. Αποτελείται από εννέα κεφάλαια και καλύπτει όλες τις βασικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης.

Το πρώτο κεφάλαιο είναι εισαγωγικό. Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στις αρχές των μεθόδων της Σεισμικής Διασκόπησης, ενώ τα δύο επόμενα κεφάλαια αφορούν τη Μέθοδο της Σεισμικής Ανάκλασης και τη Μέθοδο της Σεισμικής Διάθλασης, αντίστοιχα. Στο πέμπτο, έκτο, έβδομο και όγδοο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι αρχές των βαρυτομετρικών, μαγνητικών, ηλεκτρικών και ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης, αντίστοιχα, ενώ στο έννατο κεφάλαιο δίνονται στοιχεία για τις ραδιομετρικές μεθόδους.

Στο τέλος κάθε κεφαλαίου έχουν συμπεριληφθεί ασκήσεις οι οποίες διακρίνονται σε Α' και Β' κατηγορίας. Οι ασκήσεις Α' κατηγορίας έχουν ως σκοπό την εξοικείωση του αναγνώστη με τους τύπους, τις μονάδες μέτρησης και την τάξη μεγέθους των σχετικών γεωφυσικών ποσοτήτων, ενώ οι ασκήσεις Β' κατηγορίας έχουν ως στόχο τη βαθύτερη κατανόηση των σχετικών γεωφυσικών εννοιών και την εξάσκηση του αναγνώστη στην εφαρμογή των μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης.

Το βιβλίο αυτό γράφτηκε βασικά για να καλύψει τις διδακτικές

ανάγκες των φοιτητών του βασικού κύκλου σπουδών που διδάσκονται σχετικά μαθήματα. Μπορεί, όμως, να φανεί χρήσιμο και σε ειδικούς επιστήμονες (γεωφυσικούς, γεωλόγους, μεταλλειολόγους, κλπ) οι οποίοι ασχολούνται με θέματα γεωφυσικών διασκοπήσεων.

Ευχαριστώ θερμά τους συνεργάτες μου Γ. Καρακαϊση, Β. Καρακώστα, Α. Κυρατζή, Ε. Κυριακίδη, Δ. Παναγιωτόπουλο, Ε. Παπαδημητρίου, Χ. Παπαϊωάννου, Α. Ρόκκα, Ε. Σκορδύλη, Γ. Τσόκα και Π. Χατζηδημητρίου για τη βοήθεια που μου πρόσφεραν κατά τη συγγραφή αυτού του βιβλίου και κυρίως κατά το τελικό στάδιο της παρουσίας του.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τη συνεργάτιδα μου κ. Δ. Βλάχου η οποία με πραγματική αφοσίωση εργάστηκε για να εκδοθεί το βιβλίο αυτό.

Στη γυναίκα μου Κατερίνα η οποία με βοήθησε στην εργασία αυτή και συνεχώς μου συμπαραστέκεται στην επιστημονική μου προσπάθεια εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου.

Θεσσαλονίκη 1986

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Κεφάλαιο 1ο ΕΙΣΑΓΩΓΗ

	Σελ.
1.1. Αντικείμενο και Σημασία της Γεωφυσικής Διασκόπησης	17
1.2. Οι Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης	18
1.3. Γεωλογικές Δομές Οικονομικής Σημασίας	19
1.4. Σύντομη Ιστορία των Μεθόδων Γεωφυσικής Διασκόπησης	20

Κεφάλαιο 2ο ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

2.1. Εισαγωγή	23
2.2. Είδη Ελαστικών Κυμάτων	24
2.2.1. Κύματα χώρου	24
2.2.2. Επιφανειακά κύματα	27
2.3. Βασικές Αρχές Διάδοσης των Ελαστικών Κυμάτων	29
2.4. Ενέργεια των Ελαστικών Κυμάτων	31
2.5. Εξασθένιση των Ελαστικών Κυμάτων με την Απόσταση	34
2.6. Ανάκλαση και Διάθλαση των Ελαστικών Κυμάτων	36
2.6.1. Ανάκλαση των ελαστικών κυμάτων	37
2.6.2. Διάθλαση των ελαστικών κυμάτων	38
2.6.3. Γενικευμένος νόμος του Snell	40
2.7. Περιθλαση των Ελαστικών Κυμάτων	42
2.8. Ταχύτητες Διάδοσης των Ελαστικών Κυμάτων	43
2.9. Τρόποι Παραγωγής των Ελαστικών Κυμάτων στη	

	Σεισμική Διασκόπηση	46
2.10.	Όργανα Αναγραφής των Ελαστικών Κυμάτων στη Σεισμική Διασκόπηση	50
	2.10.1. Γεώφωνο	51
	2.10.2. Υδρόφωνο	55
	2.10.3. Ενισχυτές	56
	2.10.4. Καταγραφείς	57
2.11.	Εδαφικός θόρυβος	61
2.12.	Παράδειγμα Τρόπου Εφαρμογής των Μεθόδων Σεισμικής Διασκόπησης	61
	ΑΣΚΗΣΕΙΣ	68

Κεφάλαιο 3ο

ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ

3.1.	Εισαγωγή	71
3.2.	Ανάκλαση σε Οριζόντια Επιφάνεια	72
3.3.	Ανακλάσεις στις Διαχωριστικές Επιφάνειες Πολλών Οριζόντιων Στρωμάτων	76
3.4.	Ανάκλαση σε Κεκλιμένη Επιφάνεια	78
3.5.	Διάταξη Γεωφώνων σε Εργασίες Ανάκλασης	82
3.6.	Μετανάστευση στις Εργασίες Ανάκλασης	85
3.7.	Μέθοδοι Καθορισμού των Ταχυτήτων	88
3.8.	Διορθώσεις των Παρατηρήσεων Ανάκλασης	92
	3.8.1. Στατικές διορθώσεις	92
	3.8.2. Δυναμική διόρθωση	95
3.9.	Συσχέτιση των Αναγραφών Ανάκλασης	96
3.10.	Χαρτογράφηση των Δεδομένων Ανάκλασης	97
	ΑΣΚΗΣΕΙΣ	99

Κεφάλαιο 4ο

ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

4.1.	Εισαγωγή	105
4.2.	Δομή δυο Οριζοντίων Στρωμάτων	106
4.3.	Δομή Πολλών Οριζοντίων Στρωμάτων	110
4.4.	Στρώματα με Κεκλιμένη την κάτω Επιφάνεια	113
	4.4.1. Βασικές θεωρητικές σχέσεις	114
	4.4.2. Τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων	116

4.5.	Δομή Πολλών Στρωμάτων με Κεκλιμένες Επιφάνειες	119
4.6.	Στρώμα με μη Επίπεδη την Κάτω Επιφάνεια	121
4.7.	Περιορισμοί της Μεθόδου της Σεισμικής Διάθλασης	124
4.8.	Δομές Συνεχούς Μεταβολής της Ταχύτητας με το Βάθος	126
4.9.	Καθορισμός της Θέσης Διάρρηξης και του Άλματος Μετάπτωσης	129
4.10.	Τρόποι Διάταξης Γεωφώνων σε Εργασίες Διάθλασης	132
4.11.	Διορθώσεις των Παρατηρήσεων Διάθλασης	136
4.12.	Συσχέτιση των Αναγραφών Διάθλασης	138
	ΑΣΚΗΣΕΙΣ	139

Κεφάλαιο 5ο

ΒΑΡΥΤΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

5.1.	Εισαγωγή	145
5.2.	Θεμελιώδεις Αρχές και Μεγέθη	145
5.3.	Πυκνότητα των Πετρωμάτων της Γης	147
5.4.	Μετρούμενες Ποσότητες στη Βαρυτομετρία	149
5.5.	Όργανα Μέτρησης του Πεδίου Βαρύτητας	153
	5.5.1. Στρεπτός ζυγός	153
	5.5.2. Εκκρεμές	156
	5.5.3. Βαρυτόμετρο	157
5.6.	Τρόπος Πραγματοποίησης των Μετρήσεων Βαρύτητας	162
5.7.	Αναγωγή των Μετρήσεων Βαρύτητας	165
5.8.	Μέθοδοι Διάκρισης των Ανωμαλιών Βαρύτητας	174
5.9.	Μέθοδοι Προσδιορισμού της Πυκνότητας των Επιφανειακών Πετρωμάτων	178
5.10.	Ερμηνεία των Βαρυτομετρικών Παρατηρήσεων	182
	5.10.1. Άμεσες μέθοδοι βαρυτομετρικής ερμηνείας	184
	5.10.2. Έμμεσες μέθοδοι βαρυτομετρικής ερμηνείας	186
5.11.	Παράδειγμα Βαρυτομετρικής Διασκόπησης	191
	ΑΣΚΗΣΕΙΣ	191

Κεφάλαιο 6ο

ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

6.1.	Εισαγωγή	197
------	----------	-----

6.2.	Θεμελιώδη Μαγνητικά Μεγέθη	198
6.3.	Μεταβολές του Μαγνητικού Πεδίου της Γης	200
6.4.	Μετρούμενα Μεγέθη στη Μαγνητική Διασκόπηση	205
6.5.	Μαγνήτιση και Μαγνητική Επιδεκτικότητα των Πετρωμάτων της Γης	208
6.6.	Όργανα Μαγνητικών Μετρήσεων	210
	6.6.1. Μαγνητική βελόνα κλίσης	210
	6.6.2. Μαγνητόμετρο τύπου Schmidt	211
	6.6.3. Μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής	213
	6.6.4. Πυρηνικό μαγνητόμετρο	215
6.7.	Τύπος Πραγματοποίησης των Μαγνητικών Μετρήσεων Εδάφους	216
6.8.	Αναγωγή των Μαγνητικών Μετρήσεων Εδάφους	218
6.9.	Ερμηνεία των Μαγνητικών Δεδομένων	220
	6.9.1. Μέθοδοι ποιοτικής ερμηνείας	221
	6.9.2. Μέθοδοι ποσοτικής ερμηνείας	222
6.10.	Παραδείγματα Μαγνητικής Διασκόπησης	229
6.11.	Αερομαγνητικές Μετρήσεις	232
	ΑΣΚΗΣΕΙΣ	234

Κεφάλαιο 7ο

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

7.1.	Εισαγωγή	237
7.2.	Ειδική Αντίσταση των Πετρωμάτων και Ορυκτών	238
7.3.	Όργανα που Χρησιμοποιούνται στη Γεωηλεκτρική Διασκόπηση	241
7.4.	Ροή Ηλεκτρικού Ρεύματος σε Ομογενή Γη	243
	7.4.1 Εφαρμογή	247
7.5.	Ροή Ηλεκτρικού Ρεύματος σε Ανομοιογενή Γη	248
7.6.	Μέθοδος της Ειδικής Αντίστασης	254
	7.6.1. Φαινόμενη ειδική αντίσταση και τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων	255
	7.6.2. Γεωφυσική ερμηνεία των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης	259
	7.6.3. Τρόπος εφαρμογής της μεθόδου Wenner στην περίπτωση δύο γεωηλεκτρικών στρωμάτων	259
	7.6.4. Τρόπος εφαρμογής της μεθόδου Schlumberger	

	στην περίπτωση δύο γεωηλεκτρικών στρωμάτων	263
	7.6.5. Εφαρμογές της μεθόδου της ειδικής αντίστασης	266
7.7.	Μέθοδος των Ισοδυναμικών Γραμμών	269
7.8.	Μέθοδος της Επαγόμενης Πολικότητας	270
7.9.	Μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού	275
7.10.	Μέθοδος των Τελλουρικών Ρευμάτων	277
	ΑΣΚΗΣΕΙΣ	278

Κεφάλαιο 8ο

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

8.1.	Εισαγωγή	283
8.2.	Στοιχεία της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας	284
8.3.	Θεμελιώδεις Αρχές των Ηλεκτρομαγνητικών Μεθόδων	287
	8.3.1. Βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	289
	8.3.2. Προσανατολισμός της έντασης του μαγνητικού πεδίου	290
	8.3.3. Εξάρτηση της διαφοράς φάσης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερογενούς κύματος από τη γεωηλεκτρική δομή	291
8.4.	Κατηγορίες Ηλεκτρομαγνητικών Μεθόδων	293
8.5.	Μέθοδοι της Γωνίας Κλίσης	294
	8.5.1. Μέθοδος τοπικού πομπού	294
	8.5.2. Μέθοδος VLF	296
	8.5.3. Μέθοδος AFMAG	296
8.6.	Μέθοδοι Μέτρησης της Φάσης	297
	8.6.1. Μέθοδος αντιστάθμισης	298
	8.6.2. Μέθοδος Turam	299
	8.6.3. Μέθοδος κινούμενου πομπού-δέκτη	301
8.7.	Μέθοδοι Ασυνεχών Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων	303
8.8.	Μαγνητοτελλουρικές Μέθοδοι	304
	ΑΣΚΗΣΕΙΣ	307

Κεφάλαιο 9ο

ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

9.1.	Αντικείμενο του Κεφαλαίου	309
9.2.	Ιδιότητες της Φυσικής Ραδιενέργειας	310

9.3.	Ρυθμός και Ισορροπία Μεταστοιχείωσης	311
9.4.	Μονάδες Μέτρησης της Ραδιενέργειας	313
9.5.	Όργανα που Χρησιμοποιούνται στη Ραδιομετρική Διασκόπηση	313
9.6.	Τρόπος Πραγματοποίησης των Ραδιομετρικών Παρατηρήσεων	317
9.7.	Ερμηνεία των Ραδιομετρικών Παρατηρήσεων	318
	ΑΣΚΗΣΕΙΣ	319

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

2.1. Εισαγωγή

Με τις μεθόδους σεισμικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των μεταβολών των ταχυτήτων διάδοσης των ελαστικών (σεισμικών) κυμάτων στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης, με μετρήσεις των χρόνων διαδρομής τους μέσα στα στρώματα αυτά και εφαρμογή γνωστών νόμων της Φυσικής, στους οποίους υπακούει η διάδοση αυτή (νόμοι διάθλασης, ανάκλασης, κλπ). Τα κύματα αυτά παράγονται τεχνητά (με εκρήξεις, πτώση βαρών, κλπ) στην επιφάνεια της Γης ή σε μικρό βάθος μέσα σ' αυτή (10-80 m) και, αφού διαδοθούν μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης, επιστρέφουν στην επιφάνειά της και γράφονται σε διάφορες αποστάσεις από σεισμόμετρα, ειδικά για το σκοπό αυτό κατασκευασμένα, τα οποία λέγονται γεώφωνα.

Με βάση τις αναγραφές των ελαστικών κυμάτων, κατασκευάζονται καμπύλες χρόνων διαδρομής, δηλαδή, γραφικές παραστάσεις των χρόνων διαδρομής των κυμάτων σε συνάρτηση με την οριζόντια απόσταση, από τις οποίες υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων σε συνάρτηση με το βάθος. Η γνώση της μεταβολής της ταχύτητας αυτής μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού είναι δυνατόν να οδηγήσει στον εντοπισμό γεωλογικών δομών οι οποίες παρουσιάζουν οικονομικό ενδιαφέρον, δηλαδή, δομών που συνυπάρχουν με κοιτάσματα (πετρελαίου, μεταλλευμάτων, κλπ).

Η σεισμική διασκόπηση βασίζεται στις απλές βασικές αρχές που διέπουν τη διάδοση των κυμάτων, όπως είναι η αρχή του Huygens, η αρχή του Fermat, κλπ. Παρότι οι αρχές αυτές είναι απλές, η εφαρμογή των σεισμικών μεθόδων είναι σχετικά δύσκολη, γιατί οι αρχές αυ-

τές στην περίπτωση αυτή εφαρμόζονται στο πιο ανομοιογενές τμήμα της Γης, το οποίο αποτελούν τα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της.

Οι σεισμικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης και ιδιαίτερα η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης είναι οι πιο ακριβείς μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης και οι πλατύτερα χρησιμοποιούμενες στη διασκόπηση πετρελαίου. Επιπλέον, τα δεδομένα παρατήρησης της σεισμικής διασκόπησης ερμηνεύονται ευκολότερα από τα δεδομένα άλλων γεωφυσικών μεθόδων (βαρυτομετρικών, μαγνητικών, κλπ). Όμως, οι μέθοδοι αυτές είναι πολυδάπανες και ιδιαίτερα η μέθοδος της **σεισμικής ανάκλασης**. Για το λόγο αυτό, η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται μόνο για λεπτομερή μελέτη των γεωλογικών δομών, αφού πρώτα εφαρμοστούν στην ευρύτερη περιοχή των δομών αυτών αναγνωριστικές μέθοδοι διασκόπησης μεταξύ των οποίων συγκαταλέγεται και η μέθοδος της **σεισμικής διάθλασης**.

2.2. Είδη Ελαστικών Κυμάτων

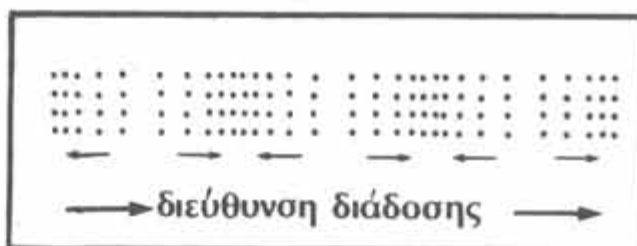
Όταν **τάση** (stress) εφαρμοστεί απότομα σε σημείο ελαστικού μέσου (π.χ. με χτύπημα του εδάφους με ένα σφυρί, με την πτώση βάρους, λόγω τεχνητής έκρηξης, κλπ) ή όταν στο σημείο αυτό απελευθερωθεί απότομα ενέργεια (π.χ. λόγω διάρρηξης των πετρωμάτων στην εστία σεισμού) προκαλείται παραμόρφωση (deformation) η οποία διαδίδεται στο ελαστικό μέσο υπό μορφή **ελαστικών κυμάτων**.

Σε ένα ελαστικό και ισότροπο μέσο άπειρων διαστάσεων αναπτύσσονται δύο είδη ελαστικών κυμάτων τα **επιμήκη κύματα** και τα **εγκάρσια κύματα**, τα οποία ονομάζονται **κύματα χώρου**. Όταν, όμως, το ελαστικό μέσο δεν επεκτείνεται στο άπειρο προς όλες τις διευθύνσεις αλλά περιορίζεται από ορισμένη επιφάνεια (π.χ. την επιφάνεια της Γης) αναπτύσσεται και ένα άλλο είδος ελαστικών κυμάτων, τα **επιφανειακά κύματα**, τα οποία διακρίνονται σε **κύματα Rayleigh** και σε **κύματα Love**.

2.2.1. Κύματα χώρου

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, υπάρχουν δύο είδη ελαστικών κυμάτων χώρου, τα **επιμήκη** και τα **εγκάρσια**. Θα αναφέρουμε χωριστά τις βασικές ιδιότητες των δύο αυτών ειδών ελαστικών κυμάτων χώρου.

α) **Επιμήκη κύματα.** Κατά τη διάδοση των κυμάτων αυτών, τα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης ταλαντώνονται κατά διεύθυνση παράλληλη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, δηλαδή προς τη διεύθυνση της σεισμικής ακτίνας και μάλιστα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα, με συνέπεια την παροδική διαδοχική αύξηση και ελάττωση της πυκνότητας του μέσου (σχ. 2.1).



Σχ.2.1. Κινήσεις των υλικών σημείων κατά τη διάδοση επιμήκους κύματος.

Η ταλάντωση των υλικών σημείων κατά τη διάδοση των επιμήκων ελαστικών κυμάτων λέγεται **συμπίεση** (C) όταν η φορά της συμπίπτει με τη φορά (κατεύθυνση) διάδοσης του κύματος, ενώ η ταλάντωση αυτή λέγεται **αραίωση** (D) όταν είναι αντίθετη της φοράς διάδοσης του κύματος.

Σε ελαστικό και ισότροπο μέσο τα επιμήκη κύματα διαδίδονται με ταχύτητα, a , η οποία δίνεται από τη σχέση

$$a = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

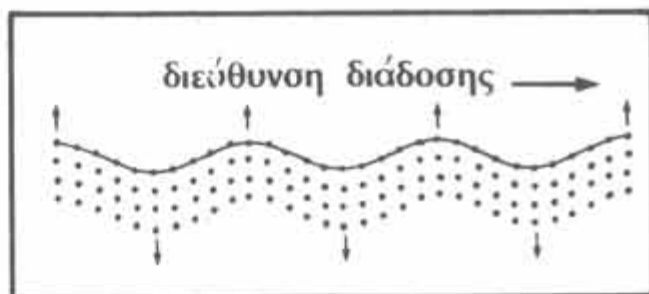
όπου λ και μ είναι παράμετροι γνωστές ως **ελαστικές σταθερές του Lamé** και ρ είναι η πυκνότητα του μέσου διάδοσης του κύματος.

Τα επιμήκη κύματα παριστάνονται στη Σεισμολογία με το σύμβολο P (Primus), επειδή τα επιμήκη κύματα που παράγονται στην εστία μιας δόνησης φθάνουν σε ορισμένο σταθμό και αναγράφονται πρώτα αυτά από τα σεισμόμετρά του και κατόπιν φθάνουν και αναγράφονται τα εγκάρσια και τα επιφανειακά κύματα, τα οποία παράγονται συγχρόνως με τα επιμήκη κύματα, στην εστία της δόνησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα διάδοσης των επιμήκων κυμάτων είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων και των επι-

φανειακών κυμάτων σ' ορισμένο μέσο.

Στην τελευταία αυτή ιδιότητα των επιμήκων κυμάτων, στο γεγονός δηλαδή ότι αυτά φτάνουν και αναγράφονται πρώτα και κατόπιν φθάνουν και αναγράφονται τα άλλα είδη κυμάτων, οφείλεται η αποκλειστική σχεδόν αξιοποίηση των αναγραφών των κυμάτων αυτών στη σεισμική διασκόπηση. Έτσι, ο χρόνος της αρχής της αναγραφής της δόνησης, η οποία, όπως αναφέραμε, οφείλεται στα επιμήκη κύματα, μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια, ενώ οι επόμενες φάσεις της αναγραφής δεν μπορούν να διακριθούν εύκολα από άλλες φάσεις που προηγούνται και η ακριβής μέτρηση του χρόνου άφιξής τους στη θέση ενός σεισμομέτρου είναι προβληματική.

β) Εγκάρσια κύματα. Κατά τη διάδοση των εγκαρσίων κυμάτων τα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης ταλαντώνονται κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και κατά τέτοιο τρόπο ώστε το μέσο να παθαίνει διατμητική παραμόρφωση. Δηλαδή, η διάδοση της διατμητικής παραμόρφωσης αποτελεί τα εγκάρσια κύματα.



Σχ.2.2. Κινήσεις των υλικών σημείων κατά τη διάδοση εγκάρσιου κύματος.

Η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων ελαστικών κυμάτων μέσα σε ελαστικό και ισότροπο μέσο δίνεται από τη σχέση

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

όπου μ είναι η ελαστική σταθερά του Lamé και ρ η πυκνότητα του μέσου διάδοσης των κυμάτων.

Η σταθερά μ αποτελεί μέτρο της διατμητικής παραμόρφωσης του μέσου κατά τη διάδοση των κυμάτων και έχει τόσο μεγαλύτερη τιμή

όσο μεγαλύτερη είναι η αντίδραση του μέσου στη διατμητική παραμόρφωσή του. Έτσι, για τα ρευστά είναι $\mu = 0$. Για το λόγο αυτό, η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων μέσα στα ρευστά (υγρά, αέρια) είναι ίση με μηδέν, σύμφωνα με τη σχέση (2.2), δηλαδή δεν διαδίδονται εγκάρσια κύματα μέσα στα ρευστά.

Από τη σύγκριση των σχέσεων (2.1), (2.2) προκύπτει ότι η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων σε ένα μέσο είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης των επιμήκων κυμάτων. Γι' αυτό, τα εγκάρσια κύματα που γεννιούνται στην εστία μιας δόνησης φθάνουν και γράφονται σ' ορισμένο σταθμό μετά τα επιμήκη κύματα της δόνησης. Για το λόγο αυτό, τα εγκάρσια σεισμικά κύματα συμβολίζονται με το S (Secundus).

2.2.2. Επιφανειακά κύματα

Τα επιφανειακά κύματα παράγονται κοντά στην επιφάνεια της Γης, επειδή οι ελαστικές ιδιότητες του φλοιού διαφέρουν σημαντικά από τις ελαστικές ιδιότητες της Ατμόσφαιρας και έτσι η στερεά Γη περιορίζεται από την επιφάνειά της. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες επιφανειακών κυμάτων, τα κύματα Rayleigh και τα κύματα Love.

α) Κύματα Rayleigh. Κατά τη διάδοση των κυμάτων αυτών τα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης διαγράφουν ελλείψεις με κατακόρυφο το μεγάλο άξονα και το μικρό άξονα παράλληλο προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Κοντά στην επιφάνεια της Γης, η φορά κίνησης κάθε σημείου πάνω στην ελλειπτική τροχιά του είναι ανάστροφη, δηλαδή, η φορά κίνησης στο κατώτερο σημείο της τροχιάς συμπίπτει με τη φορά διάδοσης του κύματος (σχ.2.3).

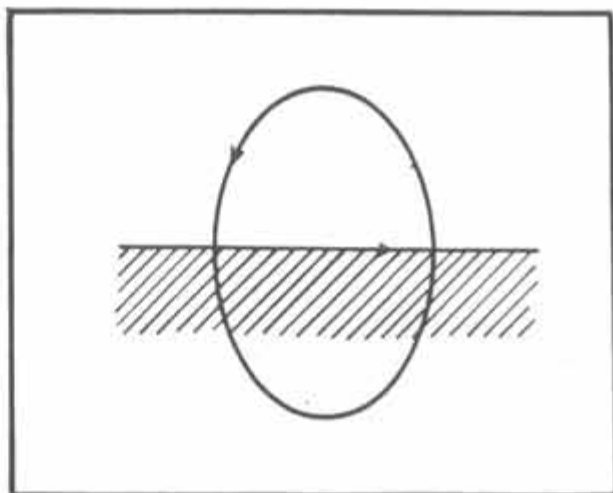
Τα πλάτη των κυμάτων Rayleigh, δηλαδή, τα μεγέθη των τροχιών των υλικών σημείων κατά τη διάδοση των κυμάτων αυτών, ελαττώνονται όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια της Γης προς τα κάτω και σε ένα βάθος μέσα στη Γη ίσο με το μήκος κύματος, λ , του κύματος Rayleigh, τα πλάτη των κυμάτων αυτών σχεδόν μηδενίζονται.

Κατά τη διάδοση των κυμάτων Rayleigh στο επιφανειακό τμήμα ελαστικού και ισότροπου μέσου για το οποίο ισχύει η σχέση $\lambda = \mu$ (σχέση Poisson), η ταχύτητά τους δίνεται από τη σχέση

$$c = 0,92 \beta \quad (2.3)$$

Δηλαδή, η ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh είναι μικρότερη από

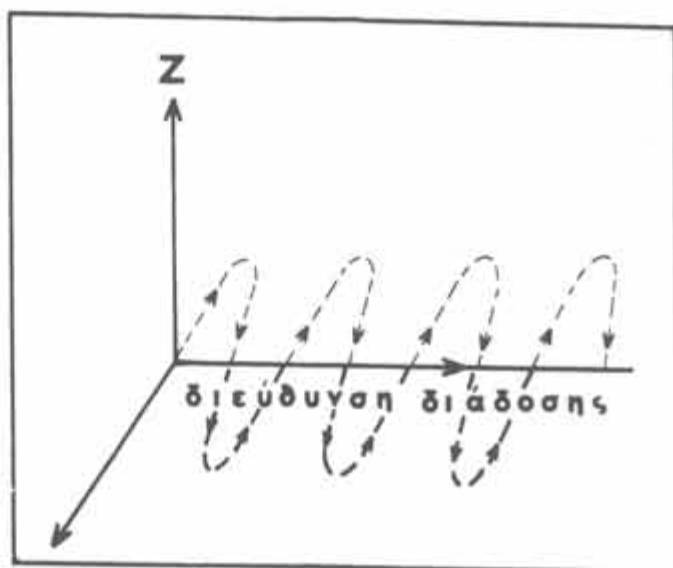
την ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων και για το λόγο αυτό τα κύματα Rayleigh φθάνουν και γράφονται σ' ορισμένο σταθμό μετά τα εγκάρσια κύματα.



Σχ.2.3. Κίνηση υλικού σημείου στην επιφάνεια της Γης κατά τη διάδοση θεμελιώδους κύματος Rayleigh.

Όταν το μέσο διάδοσης είναι ομογενές η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων Rayleigh είναι ανεξάρτητη από την περίοδο τους (και την συχνότητα και το μήκος κύματος) αλλά εξαρτάται μόνο από τις ελαστικές σταθερές του μέσου διάδοσης, όπως συμβαίνει και με τα κύματα χώρου. Παρατηρήθηκε, όμως, ότι η ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh τα οποία διαδίδονται στα επιφανειακά στρώματα της Γης μεταβάλλεται με την περίοδο (και με τη συχνότητα και το μήκος κύματος) του κύματος, επειδή ο χώρος που διαδίδονται τα κύματα αυτά δεν είναι ομογενής. Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή, η μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης του κύματος με την περίοδο του κύματος λέγεται **σκέδαση**. Συνεπώς, τα κύματα Rayleigh που διαδίδονται στα επιφανειακά στρώματα της Γης παθαίνουν σκέδαση, φαινόμενο που δεν παρατηρείται κατά τη διάδοση των κυμάτων χώρου.

β) Κύματα Love. Κατά τη διάδοση των κυμάτων αυτών τα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης πραγματοποιούν οριζόντιες ταλαντώσεις κάθετες προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (σχ.2.4).



Σχ.2.4. Οριζόντιες κινήσεις των υλικών σημείων κατά τη διάδοση θεμελιωδών κυμάτων Love.

Τα κύματα αυτά είναι, ουσιαστικά, γραμμικώς πολωμένα εγκάρσια κύματα τα οποία έχουν μόνο οριζόντια συνιστώσα (η οποία παριστάνεται με το σύμβολο SH).

Για τη γένεση των κυμάτων Love είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός στρώματος (ή περισσότερων) ορισμένου πάχους που βρίσκεται πάνω σε ημιχώρο του οποίου οι φυσικές ιδιότητες (ρ, μ) διαφέρουν από τις ιδιότητες του στρώματος.

Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων Love εξαρτάται από την περίοδό τους. Συνεπώς, τα κύματα Love σκεδάζονται. Τα κύματα αυτά φθάνουν σε ένα σταθμό και αναγράφονται αμέσως μετά από τα εγκάρσια κύματα.

2.3. Βασικές Αρχές Διάδοσης των Ελαστικών Κυμάτων

Οι βασικές αρχές που διέπουν τη διάδοση του φωτός και των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων γενικότερα ισχύουν και κατά τη διάδοση των ελαστικών κυμάτων. Αυτές είναι δύο, η αρχή του Huygens και η

αρχή του Fermat. Αυτές θεωρούνται βασικές αρχές, γιατί απ' αυτές προκύπτουν εύκολα άλλες αρχές άμεσα εφαρμόσιμες (νόμος διάθλασης, ανάκλασης, περίθλασης).

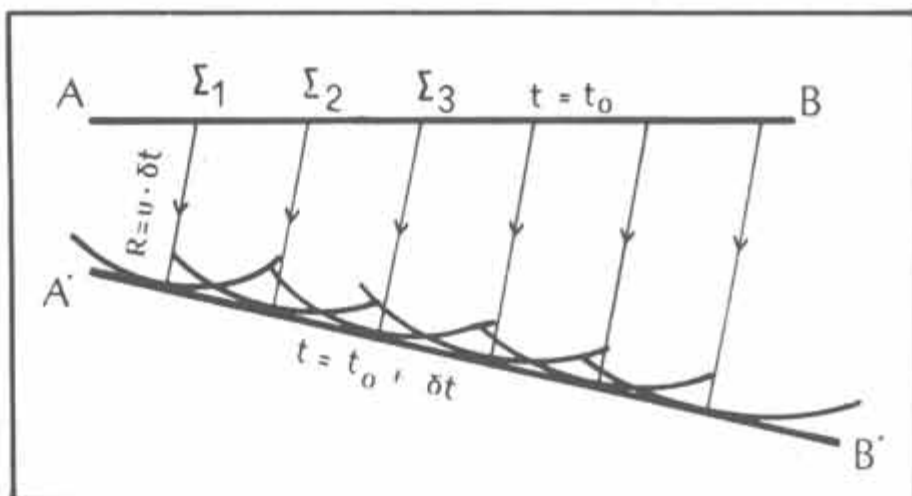
α) Αρχή του Huygens. Όταν σε ένα σημείο, O , ελαστικού μέσου προκληθεί μια διατάραξη, δημιουργηθούν δηλαδή ελαστικά κύματα, αυτή διαδίδεται από το σημείο αυτό (πηγή των κυμάτων), προς τις διάφορες διευθύνσεις. Μετά από ορισμένο χρόνο, δt , η διατάραξη θα φθάσει σε διάφορα σημεία του υλικού μέσου, τα οποία, όταν το μέσο είναι ισότροπο, θα απέχουν ίση απόσταση από το σημείο, O , και συνεπώς θα βρίσκονται στην επιφάνεια σφαίρας ακτίνας $R = v \cdot \delta t$, όπου v είναι η ταχύτητα διάδοσης της διατάραξης (των κυμάτων) μέσα στο ελαστικό και ισότροπο μέσο. Η σφαίρα αυτή αποτελεί το στιγμιαίο **μέτωπο κύματος**, το οποίο απομακρύνεται από την πηγή των κυμάτων με ταχύτητα v . Σε μεγάλη απόσταση από την πηγή, το μέτωπο κύματος μπορεί να θεωρηθεί επίπεδο, οπότε το κύμα ονομάζεται **επίπεδο κύμα**. Όταν το μέσο δεν είναι ισότροπο, το μέτωπο κύματος δεν είναι σφαίρα, αλλά άλλη επιφάνεια. Η ευθεία η κάθετη στο μέτωπο κύματος σε ένα σημείο του δείχνει τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και ονομάζεται **σεισμική ακτίνα**.

Η αρχή του Huygens ορίζει ότι:

«Κάθε σημείο ενός μετώπου κύματος μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί πηγή ενός νέου (δευτερογενούς) κύματος».

Η χρησιμότητα της αρχής αυτής οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι μπορούμε, με βάση αυτή, να ορίσουμε τις μελλοντικές θέσεις του μετώπου κύματος, όταν γνωρίζουμε τη θέση του σ' ορισμένη χρονική στιγμή. Έστω ότι AB είναι το μέτωπο κύματος κατά τη χρονική στιγμή t_0 (σχ.2.5) και θέλουμε να καθορίσουμε το μέτωπο κύματος κατά τη χρονική στιγμή $t_0 + \delta t$. Κατά τη διάρκεια του χρόνου δt το κύμα θα προχωρήσει και θα σχηματίσει ένα νέο μέτωπο κύματος $A'B'$. Σύμφωνα με την αρχή του Huygens κάθε σημείο $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \dots$ του αρχικού μετώπου κύματος AB αποτελεί πηγή νέου κύματος. Μπορούμε, συνεπώς, να χαράξουμε τόξα κύκλων με κέντρα τα σημεία $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \dots$ και ακτίνες $v \cdot \delta t$, όπου $v_i (i = 1, 2, 3, \dots)$ είναι η ταχύτητα του κύματος σε κάθε ένα από τα σημεία αυτά. Τα τόξα αυτά αποτελούν τα μέτωπα κύματος των δευτερογενών κυμάτων που παράγονται στα σημεία του αρχικού μετώπου κύματος. Η επιφάνεια, $A'B'$, που περιβάλλει τα δευτερογενή αυτά μέτωπα κύματος, αποτελεί το μέτωπο κύματος κατά τη χρονική στιγμή $t_0 + \delta t$. Τα δευτερογενή κύματα κατά τη χρονική στιγμή $t_0 + \delta t$ συμβάλλουν καταστροφικά σε όλα τα σημεία του χώρου με αποτέ-

λεσμα να αλληλοαναιρούνται εκτός από τα σημεία του νέου μετώπου κύματος, $A'B'$.



Σχ.2.5. Αρχή του Huygens.

β) Αρχή του Fermat. Σύμφωνα με την αρχή αυτή:

«Το κύμα το οποίο φθάνει σε ορισμένο σημείο από ορισμένη πηγή ακολουθεί το συντομότερο δρόμο από όλους τους δρόμους που είναι δυνατόν να ακολουθήσει, δηλαδή, ακολουθεί αυτόν που απαιτεί τον ελάχιστο χρόνο».

Αν για ένα ελαστικό μέσο δοθεί η κατανομή της ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών κυμάτων, μπορούμε, με βάση την αρχή του Fermat, να χαράξουμε τις σεισμικές ακτίνες των κυμάτων. Συνέπεια της αρχής αυτής αποτελεί το γεγονός ότι οι σεισμικές ακτίνες των κυμάτων τα οποία διαδίδονται μέσα σε ομογενές μέσο είναι ευθείες γραμμές. Αποδεικνύεται επίσης ότι οι νόμοι της ανάκλασης και διάθλασης των ελαστικών κυμάτων μπορούν να προκύψουν από την εφαρμογή της αρχής αυτής.

2.4. Ενέργεια των Ελαστικών Κυμάτων.

Κατά τη διάδοση των ελαστικών κυμάτων σ' ορισμένο μέσο, το μέσο αυτό αποκτά ορισμένη μηχανική ενέργεια η οποία οφείλεται με-

ρικώς μεν στην ταλάντωση των υλικών σημείων (κινητική ενέργεια) και μερικώς στην ανάπτυξη τάσεων και παραμορφώσεων στο μέσο (δυναμική ενέργεια).

Συνήθως, δεν ενδιαφερόμαστε για την ολική ενέργεια ενός κύματος αλλά για την ενέργεια στη γειτονιά ενός σημείου όπου γίνεται η παρατήρηση. Για το λόγο αυτό, ενδιαφέρον παρουσιάζει η **πυκνότητα ενέργειας**, E , σε ένα σημείο ελαστικού μέσου, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της μηχανικής ενέργειας, δW , η οποία περικλείεται μέσα σε στοιχειώδη όγκο, δV , γύρω από το σημείο, δια του όγκου αυτού. Δηλαδή,

$$E = \frac{\delta W}{\delta V} \quad (2.4)$$

Ας θεωρήσουμε ένα σφαιρικό αρμονικό κύμα του οποίου η ακτινική μετάθεση δίνεται από τη σχέση

$$u = A \sin(\omega t + \phi) \quad (2.5)$$

όπου A είναι το πλάτος του κύματος και ϕ η φάση του. Η κινητική ενέργεια ενός στοιχείου του υλικού μέσου, όγκου δV , θα δίνεται από τη σχέση

$$\delta W_k = \frac{1}{2} \rho \delta V \dot{u}^2 \quad (2.6)$$

όπου ρ η πυκνότητα του υλικού μέσα στον όγκο δV και $\dot{u} = \partial u / \partial t$ είναι η ταχύτητα ταλάντωσης του υλικού στοιχείου. Συνεπώς, η πυκνότητα της κινητικής ενέργειας θα δίνεται από τη σχέση

$$\frac{\delta W_k}{\delta V} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \phi) \quad (2.7)$$

και θα μεταβάλλεται από μηδέν μέχρι τη μέγιστη τιμή της που είναι $\rho \omega^2 A^2 / 2$.

Το στοιχείο όγκου δV περικλείει και δυναμική ενέργεια, και, καθώς ταλαντώνεται, έχουμε διαδοχική μετατροπή της μιας από τις δύο μορφές της μηχανικής ενέργειας (κινητικής-δυναμικής) στην άλλη. Όταν η δυναμική ενέργεια έχει τη μέγιστη τιμή της, η κινητική ενέργεια είναι ίση με μηδέν (ταχύτητα ταλάντωσης ίση με μηδέν), ενώ όταν η δυναμική ενέργεια είναι ίση με μηδέν (μέγιστη ταχύτητα ταλάντωσης ωA) η κινητική ενέργεια έχει τη μέγιστη τιμή της ($\rho \delta V \omega^2 A^2 / 2$)