



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΦΥΣΙΚΗ Ι

ΕΡΕΥΝΑ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

(ΒΑΡΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ)

ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

mm16271

9^ο ΕΞΑΜΗΝΟ

ΑΘΗΝΑ 2020

Περίληψη

Αντικείμενο της εργασίας είναι η έρευνα του υπεδάφους με γεωφυσικές μεθόδους και ποιο συγκεκριμένα, με μεθόδους που ασχολούνται με κλάδους της Φυσικής που προκύπτουν μέσα από το μάθημα της Φυσικής Ι (μηχανική, κυματική).

Η επιστήμη της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής αναλύει και χρησιμοποιεί φυσικά φαινόμενα που υφίστανται ή δημιουργούνται στη γη, κάνει μετρήσεις χαρακτηριστικών μεγεθών στην επιφάνεια, στον αέρα ή μέσα στη γη και αποτυπώνει την μορφή του υπεδάφους σε χώρους που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες.

Φυσικά φαινόμενα είναι η βαρύτητα, ο μαγνητισμός, ο ηλεκτρισμός, ο ηλεκτρομαγνητισμός η διάδοση σεισμικών κυμάτων κλπ. Τα φυσικά φαινόμενα τα οποία θα καλύψει αυτή η εργασία είναι η βαρύτητα και η διάδοση των σεισμικών κυμάτων.

Αρχικά, θα αναφερθεί η κάθε μία μέθοδος ξεχωριστά, έπειτα θα δοθούν οι βασικές έννοιες και θα γίνει περιγραφή των βασικών νόμων της Φυσικής που διέπουν το φαινόμενο που μελετάται. Στη συνέχεια θα δοθεί το πλαίσιο των πρακτικών εφαρμογών τους.

Πίνακας Περιεχομένων

1)Βαρυτομετρική μέθοδος

1.1 Εισαγωγή

1.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

1.3 Βαρυτική Επιτάχυνση

1.4 Μονάδες μέτρησης

1.5 Συσχετισμός επιτάχυνσης της βαρύτητας και γεωλογίας

1.6 Βαρυτόμετρα

1.7 Πυκνότητες πετρωμάτων

1.8 Πρακτικές Εφαρμογές

1.9 Παράγοντες που επηρεάζουν τη βαρυτική επιτάχυνση

1.10 Ανωμαλία Bouguer

2) Σεισμική μέθοδος

2.1 Εισαγωγή

2.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

2.3 Νόμοι διάδοσης των ελαστικών κυμάτων

2.4 Ταχύτητες σεισμικών κυμάτων και διάφορα πετρώματα

2.5 Σεισμικές πηγές και συστήματα καταγραφής

3) Βιβλιογραφία

ΒΑΡΥΤΟΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

1.1. Εισαγωγή

Η βαρυτομετρική μέθοδος ασχολείται με την ανάλυση του βαρυτικού πεδίου της γης και την αποτύπωση του υπεδάφους σε χώρους διαφορετικής πυκνότητας. Ουσιαστικά, μετρούνται οι μεταβολές της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Καθώς έχει χαμηλό κόστος συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους χρησιμοποιείται ως μέθοδος “αναγνώρισης” για απόκτηση πρόσθετων πληροφοριών για μετέπειτα έρευνες. Είναι εξαιρετική για την αναγνώριση τεκτονικών δομών (π.χ. ρήγματα), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αρχαιολογική έρευνα και για τον εντοπισμό εγχοίλων (σπήλαιο, εγκαταλελειμμένες σήραγγες, κλπ.).

1.2. Θεωρητικό υπόβαθρο

Οι γεωφυσικές ερμηνείες από βαρυτικές έρευνες βασίζονται στον νόμο της παγκόσμια βαρύτητας, όπως εκφράστηκε για πρώτη φορά από τον Ισαάκ Νεύτωνα, σύμφωνα με τον οποίο: Κάθε υλικό σώμα στο σύμπαν έλκει κάθε άλλο σώμα με μια δύναμη ανάλογη με το γινόμενο των μαζών τους και αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης. Αυτή η δύναμη ενεργεί πάνω στην ευθεία που ενώνει τα δύο σώματα.

Το μέτρο της βαρυτικής δύναμης ισούται με:

$$\mathbf{F} = \frac{\mathbf{G} \mathbf{m}_1 \mathbf{m}_2}{\mathbf{r}^2}$$

Όπου **m1** και **m2** είναι οι μάζες των δύο σωμάτων και **r** η μεταξύ τους απόσταση, ενώ **G** είναι η σταθερά παγκόσμιας έλξης, η οποία προσδιορίζεται πειραματικά και είναι ίδια για όλα τα σώματα.

1.3. Βαρυτική Επιτάχυνση

Όταν γίνονται μετρήσεις της βαρύτητας της γης, συνήθως δεν αποτελεί σκοπό να μετρηθεί η βαρυτική δύναμη, **F**. Αντίθετα, γίνονται μετρήσεις της βαρυτικής επιτάχυνσης, **g**. Η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι ο ρυθμός αλλαγής της ταχύτητας ως προς το χρόνο ενός σώματος υπό την επίδραση της βαρυτικής δύναμης.

Εκτός από τον καθορισμό του νόμου της παγκόσμιας βαρύτητας, ο Νεύτωνας καθόρισε επίσης τη σχέση μεταξύ δύναμης και επιτάχυνσης. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα αναφέρει ότι η δύναμη είναι ανάλογη με την επιτάχυνση. Η σταθερά της αναλογικότητας είναι η μάζα του αντικειμένου.

$$\mathbf{F = m_2 g}$$

Συνδυάζοντας τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα με τον νόμο της παγκόσμιας βαρύτητας, η βαρυτική επιτάχυνση στη μάζα m_2 μπορεί να αποδειχθεί ίση με το γινόμενο της μάζας m_1 και της σταθεράς G ως προς το τετράγωνο της απόστασης r μεταξύ των κέντρων των δύο μαζών.

$$\mathbf{g = \frac{G m_1}{r^2}}$$

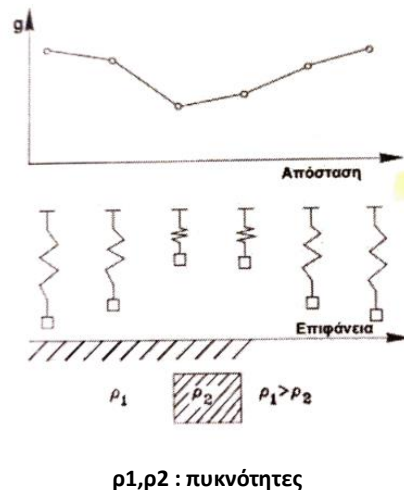
Στη περίπτωση της βαρυτομετρικής μεθόδου τη θέση του m_1 τη παίρνει η μάζα της Γης θεωρούμενης ως ομογενής σφαίρας. Το G η παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας ($6,672 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{gr} \cdot \text{sec}^2$ στο σύστημα CGS).

1.4. Μονάδες μέτρησης

Στη βαρυτομετρική διασκόπηση ως μονάδα μέτρησης της επιτάχυνσης της βαρύτητας (g) χρησιμοποιείται το **1 gal** ($=1 \text{ cm/sec}^2$) που λόγω του μεγάλου μεγέθους του συνηθέστερα χρησιμοποιείται το **1 mgal** ($=10^{-3} \text{ cm/sec}^2$) και το **1 gu** (gravity unit) με $1 \text{ mgal} = 10 \text{ gu}$. Η βαρυτική επιτάχυνση της Γης είναι περίπου 980 gals. Το gal πήρε το όνομά του από το Γαλιλαίο Γαλιλέι.

1.5. Συσχετισμός επιτάχυνσης της βαρύτητας και γεωλογίας

Η επιτάχυνση της βαρύτητας (g) επηρεάζεται από τη πυκνότητα των διάφορων σχηματισμών του υπεδάφους και την απόστασή τους (r) από τη θέση μέτρησης. Έτσι ένα ελατήριο με ένα σώμα στην άκρη του έλκεται ανάλογα με την πυκνότητα των σχηματισμών που έχουμε στο υπέδαφος. Αυτό αποτελεί και την βάση των βαρυτικών μετρήσεων.



1.6. Βαρυτόμετρα

Το βαρυτόμετρο είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του τοπικού βαρυτικού πεδίου της Γης. Ένα βαρυτόμετρο είναι ένας τύπος επιταχυνσιόμετρου, εξειδικευμένος για τη μέτρηση της σταθερής, κάτω από το επίπεδο αναφοράς του, επιτάχυνσης της βαρύτητας.

Τα βαρυτόμετρα βασίζονται στα ελατήρια με μάζα και η αύξηση του μήκους του ελατηρίου (δs) είναι αποτέλεσμα της αύξησης της βαρύτητας κατά δg . Η αύξηση του μήκους του ελατηρίου είναι ανάλογη της ελκτικής δύναμης που εξασκείται :

$$m \cdot \delta g = k \cdot \delta s$$

Ένα υψηλής ποιότητας, βαθμονομημένο βαρυτόμετρο ελατηρίου, όπως το φορητό βαρυτόμετρο LaCoste-Romberg, μπορεί να μετρήσει το βαρυτικό πεδίο της Γης εντός $1 \mu\text{Gal}$ ή ($0,1 \text{ nm} / \text{s}^2$).



**Βαρυτόμετρο LaCoste – Romberg, στερεωμένο στη βάση του.
(Πηγή: DeepEarthScience)**

1.7. Πυκνότητες πετρωμάτων

Οι βαρυτικές ανωμαλίες είναι αποτέλεσμα της διαφοράς στην πυκνότητα ενός σώματος και του περιβάλλοντος χώρου. Το πρόσημο της διαφοράς καθορίζει και το πρόσημο της βαρυτικής ανωμαλίας. Οι πυκνότητες των πετρωμάτων είναι από τις λιγότερες μεταβαλλόμενες γεωφυσικές παραμέτρους, συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 1.6 και 3.2 gt/cm^3 και κυρίως εξαρτώνται από την ορυκτολογική σύσταση και το πορώδες.

Η μεταβολή στο πορώδες είναι ο κύριος λόγος μεταβολής της πυκνότητας στα ιζηματογενή πετρώματα. Έτσι, στην σειρά των ιζηματογενών πετρωμάτων η πυκνότητα αυξάνει με το βάθος λόγω συμπίεσης και με την ηλικία λόγω συγκόλλησης.

Τα περισσότερα πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα έχουν αμελητέο πορώδες και η σύνθεσή τους επηρεάζει την πυκνότητα.

Ενδεικτικά παραθέτονται πυκνότητες συχνά εμφανιζόμενων πετρωμάτων:

Alluvium (wet)	1.96–2.00
Clay	1.63–2.60
Shale	2.06–2.66
Sandstone	
Cretaceous	2.05–2.35
Triassic	2.25–2.30
Carboniferous	2.35–2.55
Limestone	2.60–2.80
Chalk	1.94–2.23
Dolomite	2.28–2.90
Halite	2.10–2.40
Granite	2.52–2.75
Granodiorite	2.67–2.79
Anorthosite	2.61–2.75
Basalt	2.70–3.20
Gabbro	2.85–3.12
Gneiss	2.61–2.99
Quartzite	2.60–2.70
Amphibolite	2.79–3.14
Chromite	4.30–4.60
Pyrrhotite	4.50–4.80
Magnetite	4.90–5.20
Pyrite	4.90–5.20
Cassiterite	6.80–7.10
Galena	7.40–7.60

Πυκνότητες πετρωμάτων (gr/cm^3). (Πηγή: United States Geological Survey)

1.8. Πρακτικές Εφαρμογές

Για να καλύψουμε μία περιοχή έρευνας, οι σταθμοί βαρυτικών μετρήσεων διατάσσονται κατά μήκος παράλληλων ευθειών. Το μέγεθος της περιοχής έρευνας καθώς και ο βηματισμός των μετρήσεων εξαρτάται από το μέγεθος, τη διεύθυνση και τη γεωμετρία του στόχου. Οι αποστάσεις των σημείων μέτρησης σε μία βαρυτική διασκόπηση κυμαίνονται μεταξύ μερικών μέτρων στην περίπτωση έρευνας για ορυκτά μεταλλεύματα ή γεωτεχνικής μελέτης, έως εκατοντάδων μέτρων για τεκτονική ή ευρύτερη γεωλογική έρευνα. Η πυκνότητα των σταθμών γίνεται μεγαλύτερη όταν το βαρυτικό πεδίο αλλάζει απότομα αφού αυτές οι μεταβολές επηρεάζουν την ερμηνεία των βαρυτικών ανωμαλιών.

Σε περίπτωση έρευνας για δόμο άλατος (στα πλαίσια πετρελαϊκής έρευνας), ο κάναβος των μετρήσεων είναι μεγάλος έτσι και το βήμα των μετρήσεων θα είναι μεγάλο.

Σε περίπτωση έρευνας για την εύρεση αρχαίων τοιχίων θαμμένων στο υπέδαφος τότε η φόρα των μετρήσεων θα πρέπει να γίνεται κάθετα στη διεύθυνση των τοιχίων έτσι ώστε να αυξηθούν οι πιθανότητες να τα πετύχει κάποια από τις μετρήσεις.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο στόχος είναι να βρεθούν βαρυτικές ανωμαλίες, δηλαδή χωρικές παραλλαγές στην επιτάχυνση της βαρύτητας που αναμένονται από τους στόχους της έρευνας.

Αυτές οι χωρικές παραλλαγές στην επιτάχυνση της βαρύτητας που αναμένονται, μπορεί να είναι εξαιρετικά μικρές, επομένως πρέπει να εξετάσουμε άλλους παράγοντες ασχέτους με τη “καθαρή” μέτρηση που επηρεάζουν έως ένα βαθμό το σήμα που δεχόμαστε στο βαρυτόμετρο και να τους διορθώσουμε.

1.9. Παράγοντες που επηρεάζουν τη βαρυτική επιτάχυνση

Instrument Drift: Πρόκειται για αλλαγές στην παρατηρούμενη επιτάχυνση που προκαλούνται από αλλαγές στην απόκριση του βαρυτόμετρου με την πάροδο του χρόνου. Αυτό οφείλεται στο ελατήριο που επιμηκύνεται αλλάζοντας ενδείξεις, κατά την μεταφορά του από θέση σε θέση και την πάροδο του χρόνου εκτέλεσης των μετρήσεων. Επίσης, επειδή όλος ο μηχανισμός του βαρυτομέτρου βρίσκεται μέσα σε λάδι υπό σταθερή θερμοκρασία, αλλαγές στη θερμοκρασία με τον χρόνο επηρεάζουν τις τιμές μέτρησης.

Παλιρροιακά φαινόμενα μπορούν επίσης να επηρεάσουν, όπου, το βαρυτόμετρο ως πολύ ευαίσθητο όργανο, μπορεί να καταγράψει αλλαγές του g που οφείλονται στην κίνηση του ήλιου και της σελήνης. Επίσης, κοντά στην θάλασσα υπάρχει και το φαινόμενο των θαλάσσιων παλιρροιών. Τα φαινόμενα αυτά είναι περιοδικά και δίνουν πλάτη 0.3 mgal .

Δεδομένου, λοιπόν, ότι οι τιμές του βαρυτομέτρου σε μία σταθερή θέση αλλάζουν με τον χρόνο, πρέπει όλες οι τιμές μετρήσεων να διορθώνονται ώστε να αντιμετωπίζονται και τα δύο αίτια χρονικής μεταβολής απόκρισης του βαρυτομέτρου. Η διαδικασία διόρθωσης που εφαρμόζουμε λέγεται **drift correction**.

Επιδράσεις του γεωγραφικού πλάτους: Αλλαγές στην παρατηρούμενη επιτάχυνση που προκαλείται από το ελλειψοειδές σχήμα και την περιστροφή της γης. Η διαφορά των ακτινών στον ισημερινό και στους πόλους είναι περίπου 21 km . Έτσι έχουμε μία αύξηση της βαρύτητας από τον ισημερινό προς τους πόλους. Επίσης η μάζα είναι περισσότερη στον

ισημερινό απ' ότι στους πόλους. Τα δεδομένα αυτά επηρεάζουν το βαρυτικό πεδίο της γης το οποίο δίδεται σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος ϕ :

$$g\phi = 9780318.5(1 + 0.005278895\sin^2\phi + 0.000023462\sin^4\phi) \text{ σε } g_u$$

Η ανωτέρω σχέση (Διεθνής Βαρυτική Φόρμουλα 1971) δίνει την θεωρητική τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας σε κάθε θέση στην γη. Επομένως, αν από τις μετρήσεις αφαιρεθούν οι υπολογιζόμενες τιμές ($g\phi$) λόγω του βαρυτικού πεδίου της γης, οι τιμές που θα προκύπτουν θα αφορούν τοπικές βαρυτικές ανωμαλίες που οφείλονται στους διάφορους σχηματισμούς στην περιοχή έρευνας.

Επιδράσεις του υψομέτρου. Αλλαγές στην παρατηρούμενη επιτάχυνση που προκαλείται από διαφορές στο υψόμετρο των σταθμών των μετρήσεων. Δεδομένου ότι η βαρύτητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης, σχέση, είναι αναγκαίο να γίνει διόρθωση των τιμών των μετρήσεων για τις αλλαγές στο απόλυτο υψόμετρο μεταξύ των σταθμών μέτρησης έτσι ώστε όλες οι μετρήσεις να βρίσκονται σε ένα επίπεδο αναφοράς (συνήθως το επίπεδο της θάλασσας). Η διόρθωση που πρέπει να γίνει για να αναχθούν όλες οι τιμές στο ίδιο επίπεδο αναφοράς λέγεται διόρθωση ελεύθερου αέρα και δίδεται από την σχέση:

$$\Delta g_{FA} = 3.086 h \quad (\text{σε } g_u \text{ και το υψόμετρο } h \text{ σε } m)$$

Αν ο σταθμός μέτρησης είναι πάνω από το επίπεδο αναφοράς η διόρθωση προστίθεται, σε αντίθετη περίπτωση αφαιρείται.

Slab Effects. Αλλαγές στην παρατηρούμενη επιτάχυνση που προκαλείται από την υποκείμενη επιπλέον μάζα στους σταθμούς μετρήσεων (άμεσα συνδεδεμένη με τις αλλαγές εξαιτίας του υψομέτρου).

Η διόρθωση που γίνεται, ονομάζεται διόρθωση Bouguer και δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta g_{BC} = 0.4191 d h (\text{σε } g_u, \eta \text{ πυκνότητα } gr/cm^3 \text{ και το υψόμετρο } h \text{ σε } m)$$

Αν ο σταθμός μέτρησης είναι πάνω από το επίπεδο αναφοράς η διόρθωση αφαιρείται, σε αντίθετη περίπτωση προστίθεται

Τοπογραφικές επιδράσεις. Αλλαγές στην παρατηρούμενη επιτάχυνση που σχετίζονται με την τοπογραφία κοντά στους σταθμούς μετρήσεων.

1.10.Ανωμαλία Bougeur

Με τον όρο ανωμαλία Bougeur ορίζουμε την τιμή που προκύπτει μετά την εφαρμογή των αναγκαίων διορθώσεων στις αρχικές τιμές που πήραμε στην ύπαιθρο.

Υποθέτοντας ότι αυτές οι διορθώσεις έχουν εξηγήσει με ακρίβεια τις διαφορές στην επιτάχυνση της βαρύτητας που προορίζονταν να εξηγήσουν, τυχόν παραλλαγές στην επιτάχυνση της βαρύτητας σχετίζονται άμεσα με το υπέδαφος. (Γεωλογικές δομές, αρχαία, τεκτονικές δομές κλπ.)

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

2.1.Εισαγωγή

Αν θέλαμε να αξιολογήσουμε τις γεωφυσικές μεθόδους διασκόπησης με βάση τα χρήματα που επενδύονται και τον αριθμό των γεωφυσικών που δουλεύουν σε κάθε μία, τότε οι σεισμικές μέθοδοι κατέχουν την πρώτη θέση. Αυτό δεν είναι τυχαίο, καθώς οι συγκεκριμένες μέθοδοι μας δίνουν στοιχεία πολύ πιο ακριβή, αλλά και για βαθύτερα στρώματα, πράγμα που δύσκολα παρέχουν οι άλλες μέθοδοι διασκόπησης.

Οι σεισμικές μέθοδοι είναι αυτές που κυριαρχούν στο χώρο των ερευνών για υδρογονάνθρακες αλλά και στο καθορισμό του βραχώδους υποβάθρου όταν πρόκειται για σπουδαίες κατασκευές, όπως φράγματα, γέφυρες κλπ.

Δύο είναι οι σεισμικές μέθοδοι που πραγματοποιούνται:

- Σεισμικά διάθλασης: Τα σεισμικά διάθλασης βασίζονται στους χρόνους άφιξης της αρχικής κίνησης του εδάφους που δημιουργείται από μια πηγή καταγεγραμμένη σε διάφορες αποστάσεις. Οι μεταγενέστερες αφίξεις των σημάτων στην καταγεγραμμένη κίνηση του εδάφους απορρίπτονται. Έτσι, το σύνολο δεδομένων που προέρχεται από σεισμικά διάθλασης αποτελείται από μια σειρά χρόνων έναντι αποστάσεων. Αυτά ερμηνεύονται έπειτα ως προς τα βάθη στις υποεπιφανειακές διεπαφές και τις ταχύτητες με τις οποίες το κύμα ταξιδεύει μέσω της υποεπιφάνειας μέσα σε κάθε επίπεδο. Αυτές οι ταχύτητες ελέγχονται από ένα

σύνολο φυσικών σταθερών, που ονομάζονται ελαστικές παράμετροι και περιγράφουν το υλικό.

- Σεισμικά ανάκλασης: Στα σεισμικά ανάκλασης, η ανάλυση επικεντρώνεται στην ενέργεια που φθάνει μετά την αρχική κίνηση του εδάφους. Συγκεκριμένα, η ανάλυση επικεντρώνεται στα κύματα που ανακλώνται από τις διεπαφές υποεπιφάνειας. Υπό αυτήν την έννοια, η σεισμική ανάκλασης είναι μια πολύ εξελιγμένη εκδοχή της "ήχως" που χρησιμοποιείται σε υποβρύχια, πλοία και συστήματα ραντάρ. Εκτός από την εξέταση των χρόνων άφιξης αυτών, η σεισμική επεξεργασία ανάκλασης εξάγει πληροφορίες σχετικά με την επιφάνεια κάτω από το πλάτος και τη κινητικότητα του εδάφους. Οι δομές κάτω από την επιφάνεια μπορεί να έχουν περίπλοκο σχήμα, αλλά όπως και η μέθοδος διάθλασης, ερμηνεύονται ως όρια που διαχωρίζουν το υλικό με διαφορετικές ελαστικές παραμέτρους.

2.2.Θεωρητικό υπόβαθρο

Οι σεισμικές μέθοδοι βασίζονται στις γνώσεις που αποκτήθηκαν μελετώντας τους σεισμούς. Όταν πραγματοποιείται ένας σεισμός σαν αποτέλεσμα της διάρρηξης ενός πετρώματος, τα τμήματα του πετρώματος που μετακινούνται το ένα σχετικά με το άλλο δημιουργούν τα σεισμικά κύματα που, αρχίζοντας από το σημείο της διάρρηξης, την "εστία", διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτά καταγράφονται από ειδικές διατάξεις, τους σειсмоγράφους. Μελετώντας τώρα τις αναγραφές, σειсмоγραφήματα, μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τη φύση των πετρωμάτων μέσα από τα οποία ταξίδεψαν τα κύματα. Την ίδια τεχνική ακολουθούμε και στις σεισμικές μεθόδους διασκόπησης. Η μόνη διαφορά είναι ότι οι πηγές ενέργειας δεν είναι σεισμοί αλλά ελεγχόμενες τεχνικές πηγές. Σαν τέτοιες μπορεί να είναι είτε εκρήξεις, είτε βάρη που πέφτουν από κάποιο ύψος κ.α. Γνωρίζοντας τη θέση της πηγής, τη στιγμή της έναρξης γένεσης του σήματος και την απόσταση πηγής-δέκτη, μπορούμε να ερμηνεύσουμε τις αναγραφές με μεγαλύτερη ακρίβεια, αφού αποφεύγουμε τα σφάλματα που περιέχονται στους υπολογισμούς της θέσης της εστίας και του χρόνου έναρξης που είναι άγνωστα όταν πρόκειται για σεισμούς

Όταν το έδαφος ή το βραχώδες υπόβαθρο μετατοπίζεται γρήγορα ή παραμορφώνεται σε κάποιο σημείο, η ενέργεια που μεταδίδεται στη Γη από την πηγή της παραμόρφωσης

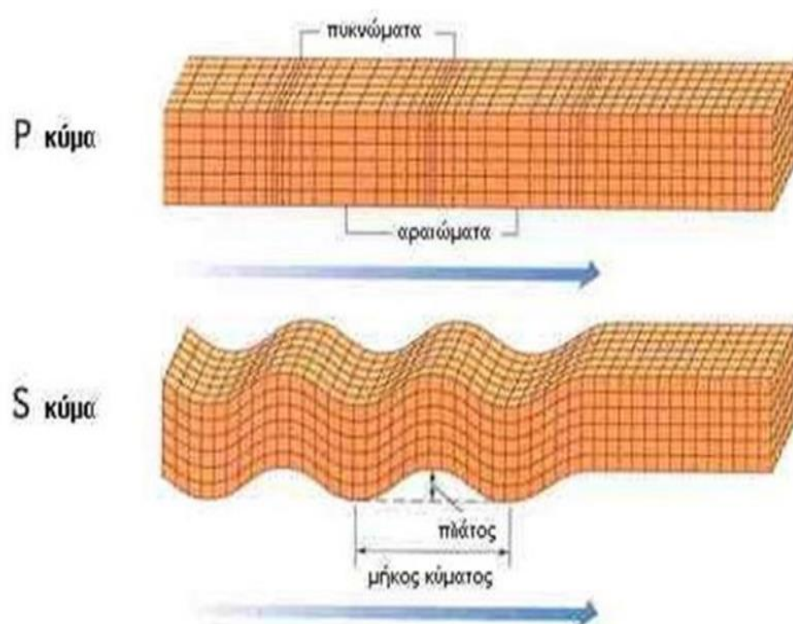
μπορεί να μεταδοθεί με τη μορφή ελαστικών κυμάτων. Ένα κύμα είναι μια διαταραχή που διαδίδεται μέσω ή στην επιφάνεια ενός μέσου. Τα ελαστικά κύματα ικανοποιούν αυτήν την κατάσταση και επίσης διαδίδονται μέσω του μέσου χωρίς να προκαλούν μόνιμη παραμόρφωση οποιουδήποτε σημείου στο μέσο. Τα ελαστικά κύματα είναι αρκετά κοινά. Για παράδειγμα, ο ήχος διαδίδεται μέσω του αέρα καθώς τα ελαστικά κύματα και τα κύματα του νερού διαδίδονται σε όλη την επιφάνεια μιας λίμνης ως ελαστικά κύματα.

Κύματα που διαδίδονται μέσω της γης ως ελαστικά κύματα αναφέρονται ως σεισμικά κύματα. Υπάρχουν δύο ευρείες κατηγορίες σεισμικών κυμάτων: κύματα χώρου και κύματα επιφανείας.

Τα σεισμικά κύματα χώρου μπορούν να υποδιαιρεθούν περαιτέρω σε δύο κατηγορίες κυμάτων: κύματα P(επιμήκη) και κύματα S(εγκάρσια).

Κύματα P: Τα κύματα P ονομάζονται επίσης πρωτεύοντα κύματα, επειδή διαδίδονται μέσω του μέσου ταχύτερα από τους άλλους τύπους κυμάτων. Στα κύματα P, σωματίδια που αποτελούν το μέσο μετατοπίζονται στην ίδια κατεύθυνση που το κύμα διαδίδεται. Έτσι, το υλικό επεκτείνεται και συμπιέζεται καθώς τα κύματα P διαδίδονται μέσω του μέσου. Τα κύματα P είναι αναλογικά με τα ηχητικά κύματα που διαδίδονται μέσω του αέρα.

Κύματα S: Τα κύματα S ονομάζονται μερικές φορές δευτερεύοντα κύματα, επειδή διαδίδονται μέσω του μέσου βραδύτερα από τα κύματα P. Στα κύματα αυτά τα σωματίδια που αποτελούν το μέσο μετατοπίζονται σε κατεύθυνση που είναι κάθετη προς την κατεύθυνση που διαδίδεται το κύμα. Αναλογικά όπως τα κύματα που προέρχονται από τη δόνηση του ελατηρίου. Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο στα στερεά.



Κύματα χώρου P και S.

Επιφανειακά κύματα: Τα επιφανειακά κύματα είναι κύματα που διαδίδονται κατά μήκος της επιφάνειας της Γης. Το πλάτος τους στην επιφάνεια της Γης μπορεί να είναι πολύ μεγάλο, αλλά αυτό το πλάτος μειώνεται εκθετικά με το βάθος. Τα επιφανειακά κύματα διαδίδονται σε ταχύτητες που είναι πιο αργές από τα κύματα S, παράγονται λιγότερο αποτελεσματικά από θαμμένες πηγές και έχουν πλάτη που ελαττώνονται με την απόσταση από την πηγή πιο αργά από ότι παρατηρείται για τα κύματα χώρου

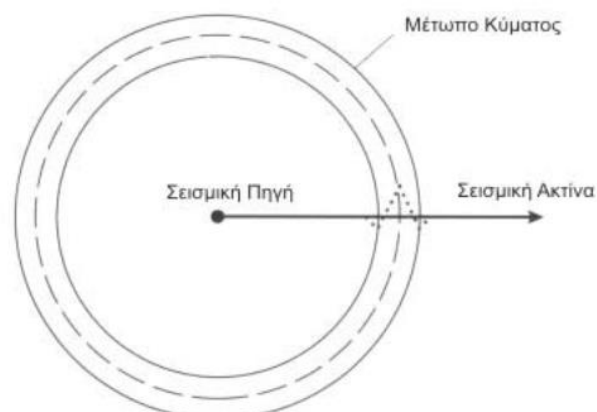
Όπως τα κύματα χώρου, υπάρχουν δύο κατηγορίες επιφανειακών κυμάτων, τα κύματα Love και Rayleigh, που διακρίνονται από τον τύπο της κίνησης των σωματιδίων που επιβάλλουν στο μέσο.

Αρκεί να πούμε ότι για σχεδόν όλες τις μεθόδους εξερεύνησης, τα επιφανειακά κύματα είναι μια μορφή θορύβου που προσπαθούμε να καταστρέψουμε. Για την μέθοδο ανάκλασης, η καταστολή της ενέργειας επιφανειακών κυμάτων καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική, επειδή τα πλάτη των επιφανειακών κυμάτων που δημιουργούνται από ρηχά θαμμένες πηγές συχνά παρατηρούνται ότι είναι μεγαλύτερα από τα πλάτη των κυμάτων σώματος που προσπαθούμε να καταγράψουμε και να ερμηνεύσουμε. Για έρευνες διάθλασης, τα επιφανειακά κύματα είναι λιγότερο προβληματικά επειδή ενδιαφερόμαστε μόνο για την ώρα άφιξης του πρώτου κύματος. Τα επιφανειακά κύματα, λόγω της ταχύτητάς τους, δεν είναι ποτέ η πρώτη άφιξη.

2.3. Νόμοι διάδοσης των ελαστικών κυμάτων

Δύο βασικές έννοιες για την διάδοση των σεισμικών κυμάτων είναι το μέτωπο κύματος και η σεισμική ακτίνα: Μέτωπο Κύματος (wavefront) είναι οι θέσεις όλων των σημείων όπου ο παλμός έχει φθάσει σε συγκεκριμένο χρόνο. Σεισμική ακτίνα (seismic ray) είναι ευθύγραμμα τμήματα της διαδρομής της ενέργειας (είναι πάντα κάθετη στο μέτωπο κύματος).

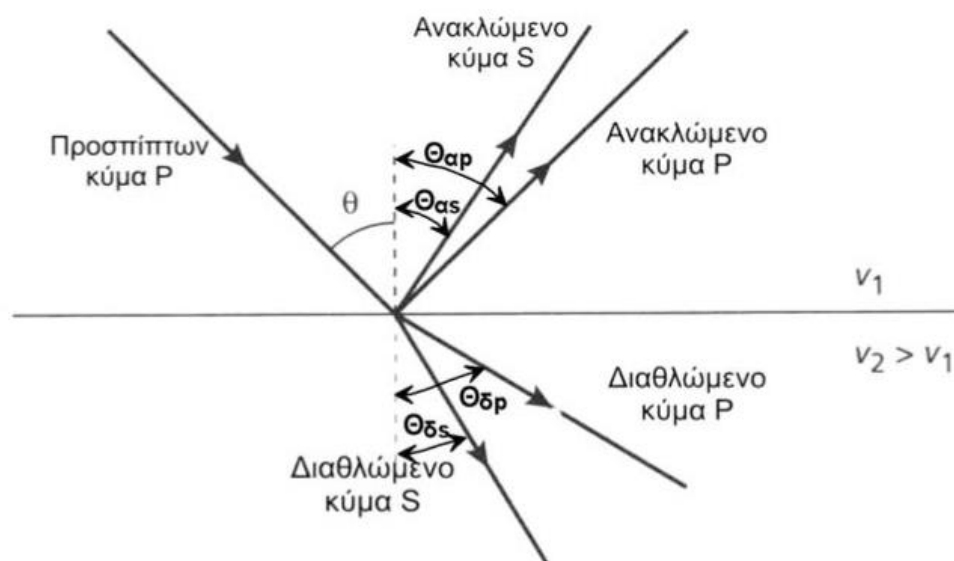
Μέτωπο κύματος και σεισμική ακτίνα.



Αρχή του Huygens: Κάθε σημείο του μετώπου σφαιρικού κύματος μέσα σε ισότροπο και ομοιογενές μέσο μπορεί να θεωρηθεί σαν πηγή νέου σφαιρικού κύματος. Έχοντας τη θέση του μετώπου σε μία δεδομένη χρονική στιγμή, η θέση που θα έχει το μέτωπο μετά από χρόνο Δt μπορεί να βρεθεί εύκολα αν θεωρήσουμε κάθε σημείο του πρώτου μετώπου σαν νέα πηγή κύματος.

Αρχή του Fermat: Σύμφωνα με την αρχή του Fermat το κύμα για να φτάσει σε ένα σημείο από ορισμένη πηγή ακολουθεί τον δρόμο ελαχίστου χρόνου.

Νόμος του Snell: Όταν ένα κύμα πέσει πάνω σε επιφάνεια που χωρίζει δύο μέσα με διαφορετικές ελαστικές ιδιότητες, μέρος της ενέργειας ανακλάται και παραμένει στο ίδιο μέσο όπως η αρχική ενέργεια, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια διαθλάται μέσα στο άλλο μέσο με σύγχρονη μεταβολή στη διεύθυνση διάδοσης. Ο τρόπος ανάκλασης και διάθλασης των σεισμικών κυμάτων είναι βασικά ο ίδιος όπως στη γεωμετρική οπτική και για μεγάλες αποστάσεις από τη πηγή μπορούμε να προσεγγίσουμε τα κύματα με ακτίνες. Έτσι οι αρχές των Huygens και Fermat μπορούν να εφαρμοστούν και για τα σεισμικά κύματα. Στην πραγματικότητα όμως η διαδικασία της ανάκλασης και της διάθλασης των σεισμικών κυμάτων είναι λίγο πιο σύνθετη απ' ό,τι στις φωτεινές ακτίνες μια και γενικά κάθε P (ή S) κύμα φτάνοντας στη διαχωριστική επιφάνεια παράγει δύο κύματα από ανάκλαση (P και S) και δύο κύματα από διάθλαση (P και S).



2.4. Ταχύτητες σεισμικών κυμάτων στα διάφορα πετρώματα

Η διαφορετική σύνθεση, υφή (π.χ. σχήμα κόκκων και βαθμός διάταξής τους), πορώδες και περιεκτικότητα ρευστών στους πόρους των πετρωμάτων, τα διαφοροποιεί σε σχέση με τις ελαστικές παραμέτρους και τις πυκνότητες. Ως εκ τούτου και ως προς τις ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων. Η γνώση της ταχύτητας των διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων, V_p και V_s αντίστοιχα, των στρωμάτων του υπεδάφους είναι πολύ σημαντική για δύο λόγους: α) είναι αναγκαία στις σεισμικές έρευνες για την μετατροπή των χρόνων διάδοσης των κυμάτων σε βάθη και β) παρέχει μία πρώτη ένδειξη για την λιθολογία του υπεδάφους και σε μερικές περιπτώσεις για την φύση των ρευστών στους πόρους.

Η υπόθεση ότι τα πετρώματα θεωρούνται ομοιογενή και ισότροπα θα πρέπει να επανεξεταστεί όταν θέλουμε να συσχετίσουμε λιθολογία και σεισμικές ταχύτητες. Η τυπική υφή ενός πετρώματος αφορά τους ορυκτούς κόκκους που το δημιουργούν (πλέγμα) και τον εναπομείναντα όγκο από κενό χώρο (πόροι). Ο κλασματικός όγκος του πορώδους χώρου αποτελεί το πορώδες (ϕ). Για λόγους απλούστευσης θεωρούμε ότι όλοι οι κόκκοι του πλέγματος έχουν τις ίδιες φυσικές ιδιότητες. Αυτή η υπόθεση θεωρείται αρκετά βάσιμη δεδομένου ότι τα υλικά που δημιουργούν τα πετρώματα κυρίως είναι χαλαζίας, άστριος και ασβεστίτης που έχουν αρκετά παρόμοιες φυσικές ιδιότητες. Σε αυτή την περίπτωση οι ιδιότητες του πετρώματος θα είναι ο μέσος όρος των ιδιοτήτων των υλικών του πλέγματος και των ρευστών μέσα στους πόρους με την επικράτηση του ενός ή του άλλου να εξαρτάται από το πορώδες. Στην απλούστερη των περιπτώσεων για την πυκνότητα ενός πετρώματος ισχύει: αντίστοιχα, των στρωμάτων του υπεδάφους είναι πολύ σημαντική για δύο λόγους: α) είναι αναγκαία στις σεισμικές έρευνες για την μετατροπή των χρόνων διάδοσης των κυμάτων σε βάθη και β) παρέχει μία πρώτη ένδειξη για την λιθολογία του υπεδάφους και σε μερικές περιπτώσεις για την φύση των ρευστών στους πόρους.

2.5. Σεισμικές πηγές και συστήματα καταγραφής

Τα βασικά τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά μιας σεισμικής πηγής συνοψίζονται στα παρακάτω

Τεχνικά χαρακτηριστικά.

- Ικανότητα να αποδώσει αρκετή ενέργεια,
- Μικρή χρονική διάρκεια του εκπεμπόμενου σεισμικού κύματος,

- Ελαχιστοποίηση του προκαλούμενου σεισμικού θορύβου.

Λειτουργικά -χαρακτηριστικά.

- Μεγάλη ταχύτητα επανάληψης εκπομπής σεισμικού σήματος.
- Σταθερότητα στη μορφή της εκπεμπόμενης κυματομορφής.
- Μεγάλη ασφάλεια και μικρό κόστος συντήρησης , με ολιγάριθμο λειτουργικό προσωπικό.

Σεισμικές πηγές ξηράς:

1) *Εκρηκτικά*: Αποτελούν το 45% των χρησιμοποιούμενων σήμερα σεισμικών πηγών. Αυτά που χρησιμοποιούνται στη γεωφυσική, είναι κυρίως δύο τύπων: Τρινιτροτολουόλιο και Νιτρικό αμμώνιο. Ευρίσκονται συσκευασμένα σε μικρούς κυλίνδρους διαμέτρου περίπου 5cm και περιέχουν 0.5-5 Kgr εκρηκτικό και εκρήγνυνται με τη βοήθεια ηλεκτρικού καψυλλίου. Η έκρηξη συνήθως γίνεται μέσα σε γεωτρήσεις και κάτω από το επιφανειακό στρώμα ή τον υδροφόρο ορίζοντα, για να ελαχιστοποιηθεί ο προκαλούμενος σεισμικός θόρυβος και να αυξηθεί η διάδοση της σεισμικής ενεργείας, σύζευξη με το έδαφος.

2) *Vibroseis*: Το σύστημα είναι τοποθετημένο σε κατάλληλο, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες περιβάλλοντος λειτουργίας, φορτηγό. Το φορτηγό ανυψώνεται στηριζόμενο σε μια μεταλλική πλάκα που εφάπτεται του εδάφους. Χρησιμοποιούνται υδραυλικοί δονητές και η δόνηση μεταφέρεται στη πλάκα.



Vibroseis. (Πηγή: Cornell University)

Θαλάσσιες σεισμικές πηγές:

Αεροβόλο (Airgun): Τα αεροβόλα αποτελούν τις πιο συνηθισμένες θαλάσσιες σεισμικές πηγές. Σε γενικές γραμμές, αποτελούνται από δύο δοχεία υψηλής πίεσης που συνδέονται με ένα κινούμενο έμβολο.

Σεισμικοί Φωρατές: Με τον όρο σεισμικοί φωρατές, εννοούμε κάθε διάταξη που χρησιμεύει στο να μετατρέπει τις σεισμικές δονήσεις που καταφθάνουν σε αυτή σε αντίστοιχα ηλεκτρικά σήματα. Διακρίνουμε κυρίως δύο τύπους. Οι σεισμικοί φωρατές ξηράς που βασίζονται στο ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο και οι θαλάσσιοι σεισμικοί φωρατές που βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Οι πρώτοι είναι γνωστοί με το όνομα γεώφωνα (geophones) ενώ οι δεύτεροι με το όνομα υδρόφωνα (hydrophones).

Γεώφωνα: Τα γεώφωνα αποτελούνται από ένα κινούμενο πηνίο και ένα μόνιμο μαγνήτη στερεωμένο στο στέλεχος του οργάνου. Μόλις τα σεισμικά κύματα φθάσουν στο γεώφωνο, προκαλείται μία σχετική κίνηση του πηνίου ως προς το μαγνήτη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρεργετικής δύναμης στα άκρα του πηνίου που είναι ανάλογη της ταχύτητας κίνησης του εδάφους.

Υδρόφωνα: Οι διατάξεις αυτές χρησιμεύουν για την ανίχνευση των κυμάτων πίεσης που προκαλούν οι θαλάσσιες σεισμικές πηγές. Οι μεταβολές πίεσης διαβιβάζονται δια μέσου του κελύφους του οργάνου επάνω σε λεπτά φύλλα χαλαζία, αναπτύσσοντας έτσι πιεζοηλεκτρικές τάσεις που είναι ανάλογες των μεταβολών πίεσης. Επομένως, τα υδρόφωνα μετρούν επιταχύνσεις παρά ταχύτητες. Τα υδρόφωνα ευρίσκονται μέσα σε κατάλληλα σεισμικά καλώδια τα οποία σύρονται μαζί με συστοιχίες αεροβόλων από κατάλληλα διαμορφωμένα πλοία.



Σεισμογραφικό πλοίο με ενδεικτικά τα αεροβόλα και τις σειρές με τα υδρόφωνα. (Πηγή: SATEL)

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση:

Burger, H. R., Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface, Prentice Hall P T R, 1992.

Colorado School of Mines, Exploration Geophysics: Gravity notes.

Colorado School of Mines, Exploration Geophysics: Seismic notes.

Everett, M.E., Near-Surface Applied Geophysics, Cambridge University Press, 2013.

Cornell University: <https://news.cornell.edu/stories/2018/09/cornell-conduct-earth-source-heat-seismic-survey-sept-21-25>

SATEL: <https://www.satel.com/>

USGS (United States Geological Survey): <https://www.usgs.gov/>

Ελληνική:

Giancoli, Douglas C, Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς, Εκδόσεις Τζιόλα, 2012.

Αποστολόπουλος, Γεώργιος, Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.