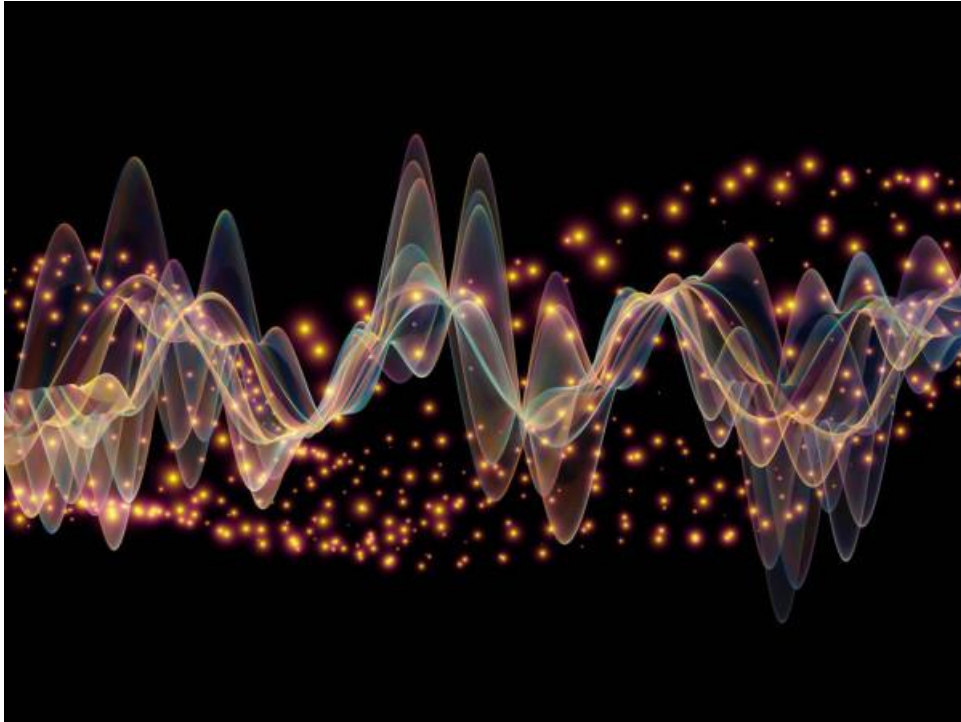


ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΠΑΝΤΕΛΙΔΑΚΗΣ &
ΝΤΕΙΒΙΝΤ ΚΕΛΙ



ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗ & ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΠΑΝΤΕΛΙΔΑΚΗΣ

ΝΤΕΙΒΙΝΤ ΚΕΛΙ

Κος. Γ. ΤΣΙΓΑΡΙΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ, ΕΜΠ

1ο ΕΞΑΜΗΝΟ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ
3. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗ

3.1. Ορισμός και είδη μηχανικών κυμάτων

3.2. Η έννοια της ταχύτητας

3.3. Η Κυματοσυνάρτηση

3.4. Γενική εξίσωση κύματος

3.5. Ενέργεια κύματος

3.6. Ισχύς κύματος

3.7. Επαλληλία κυμάτων

3.8. Συμβολή κυμάτων και διακρότημα

3.9. Διάθλαση κυμάτων

3.10. Φαινόμενο Doppler

4. ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

4.1. Ορισμός και είδη σεισμικών κυμάτων

4.2. Εστία, επίκεντρο και χρόνος γένεσης σεισμού

4.3. Καμπύλες χρόνων διαδρομής των κυμάτων χώρου

4.4. Μεταβολή της ταχύτητας των κυμάτων χώρου ανάλογα με το βάθος μέσα στη γη

4.5. Διάδοση των κυμάτων χώρου στο φλοιό

4.6. Κύματα διάθλασης

4.7. Διαυλικά κύματα

4.8. Κύματα ανάκλασης

4.9. Διάδοση κυμάτων χώρου στον μανδύα

4.10. Διάδοση κυμάτων χώρου στον πυρήνα

- 4.11. Επιφανειακά κύματα και διάδοση αυτών στη γη
- 4.12. Ελεύθερη ταλάντωση της γης
- 4.13. Μεταβολή των πλατών των κυμάτων κατά τη διάδοσή τους
- 4.14. Επιταχυνσιογράφος-Σεισμογράφος
- 4.15. Κλίμακα Ρίχτερ
- 4.16. Οι σεισμοί στην ιστορία της γης
- 5. Βιβλιογραφικές-Διαδικτυακές Πηγές

➤ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συγκεκριμένη ερευνητική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη της μηχανικής κυματικής και του φαινομένου των σεισμικών κυμάτων.

Στόχος της εργασίας είναι να περιγράψει με μαθηματικές πράξεις, παραδείγματα και σχήματα την μηχανική κυματική και τα σεισμικά κύματα.

Τα κύματα είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι της ιστορίας της γης και αποτελούν το αίτιο για την διαδραμάτιση πολλών φυσικών φαινομένων καθ' όλη την πορεία του ανθρώπου στον πλανήτη. Σε όλες τις επιστήμες, που έχει αναπτύξει ο άνθρωπος, η φυσική των κυμάτων παίζει σημαντικό ρόλο και βοηθάει στην εξέλιξη αυτών των επιστημών. Έτσι, η επιστήμη της σεισμολογίας ερευνά και αναπτύσσει τεχνολογίες με σκοπό να κατανοήσει, όσο το δυνατόν πιο ολοκληρωτικά, τα σεισμικά κύματα. Η κατανόηση των σεισμικών κυμάτων από τους επιστήμονες είναι ο δρόμος για την ανάπτυξη της γεωλογίας, της γεωφυσικής και άλλων πολλών κλάδων που εξελίσσονται λόγω αυτής της προσπάθειας. Τελικά, αποδεικνύεται ότι κυματική και σεισμολογία συνδέονται άμεσα μεταξύ τους με αποτέλεσμα η δεύτερη να αναπτύσσεται εξολοκλήρου στις θεμελιώδεις αρχές της πρώτης.

➤ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη συγκεκριμένη εργασία αναλύονται τα μηχανικά και σεισμικά κύματα. Αρχικά, γίνεται μια εισαγωγή στην Κυματική Φυσική με τον ορισμό, τα βασικά φυσικά μεγέθη κυμάτων και τα βασικά είδη των κυματικών διαταραχών. Παρουσιάζονται, επίσης, οι έννοιες της κυματικής συνάρτησης και της γενικής εξίσωσης μονοδιάστατων κυμάτων, της ταχύτητας, ενέργειας και της ισχύς τους. Έπειτα, εισάγονται οι έννοιες των κανονικών τρόπων ταλάντωσης και των χαρακτηριστικών συχνοτήτων (ιδιοσυχνότητες). Ακολουθεί η ανάλυση βασικών κυματικών φαινομένων που αφορούν στην επαλληλία και συμβολή κυμάτων, στο συντονισμό και στο φαινόμενο Doppler. Όσον αφορά την ενότητα των σεισμικών κυμάτων θα υλοποιηθεί ανάλυση της έννοιας και των ειδών που χαρακτηρίζουν τα κύματα αυτά. Θα επικεντρωθούμε στην διάκριση των στρωμάτων της Γης, των κυμάτων χώρου που τα διέπουν, καθώς και των παραγόντων που επιδρούν στη μεταβολή της ταχύτητας των κυμάτων αναλογικά με το βάθος. Έπειτα, θα γίνει κατηγοριοποίηση των κυμάτων σε διάθλασης, διαυλικά και ανάκλασης. Ακόμη, θα γίνει αναφορά στον τρόπο διάδοσης των κυμάτων κατά μήκος όλων των στρωμάτων της Γης και πως η ελεύθερη ταλάντωση της Γης αποτελεί ένα κύμα. Τέλος, θα γίνει επεξήγηση των αιτιών μεταβολής του πλάτους των κυμάτων κατά την διάδοσή τους και της

λειτουργικότητας διαφόρων εργαλείων, όπως οι επιταχυνσιογράφοι και οι σειсмоγράφοι.

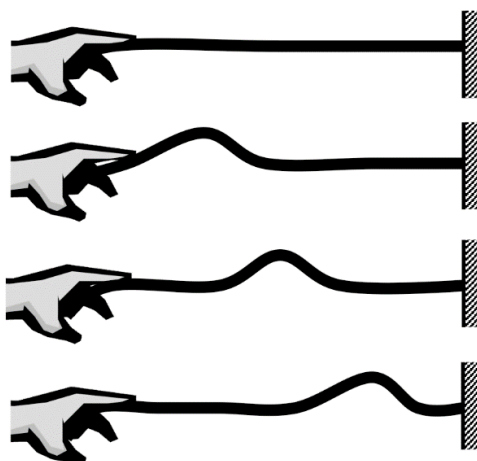
➤ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗ

• Ορισμός και είδη μηχανικών κυμάτων

Κύμα είναι μια διαταραχή από την ισορροπία, η οποία ταξιδεύει μέσα στον χώρο. Κυματική κίνηση εμφανίζεται σχεδόν παντού στη φύση: οι κυματισμοί του νερού, οι σεισμικές δονήσεις, τα ηχητικά κύματα, τα κύματα σε μια χορδή ή ένα ελατήριο, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα κυματικής κίνησης. Τρία είναι τα βασικά είδη κυμάτων, τα μηχανικά κύματα, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και τα κύματα πιθανότητας της Κβαντικής Φυσικής. Ειδικότερα, τα μηχανικά κύματα ταξιδεύουν διαμέσου ενός υλικού (π.χ. αέρας, νερό, στερεά κτλ.), τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία δε χρειάζονται ύλη για να ταξιδέψουν (ταξιδεύουν και στο κενό), ενώ τέλος, τα κύματα πιθανότητας της Κβαντικής Φυσικής, σύμφωνα με τα οποία, τα υποατομικά σωματίδια εμφανίζουν και κυματικές ιδιότητες.

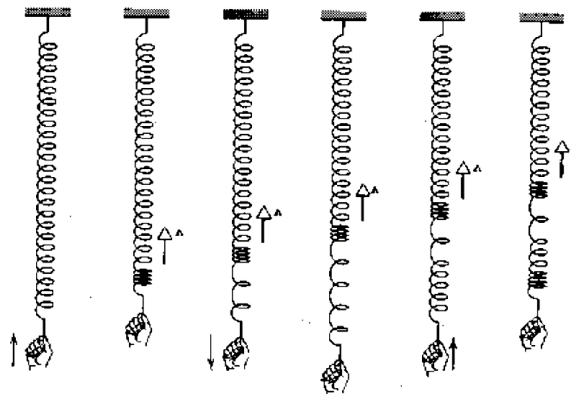
Τα μηχανικά κύματα διακρίνονται, ανάλογα με τη σχέση της κίνησης των σωματιδίων του μέσου με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, σε δύο ομάδες, τα εγκάρσια και τα διαμήκη κύματα.

Στα εγκάρσια κύματα, η μετατόπιση των υλικών σωματιδίων, που μεταφέρουν το κύμα, είναι κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του ίδιου του κύματος. Παράδειγμα εγκάρσιου κύματος είναι αυτό που δημιουργείται όταν τεθεί σε ταλάντωση το ένα άκρο τεντωμένου νήματος, του οποίου το άλλο άκρο είναι στερεωμένο σε σταθερό σημείο. (Εικόνα 1)



Εικόνα 1. (Δημιουργία κυματικής κίνησης σε τεντωμένο σχοινί με σταθερό άκρο)

Στα διαμήκη κύματα η μετατόπιση (ταλάντωση) των υλικών σωματιδίων, που μεταφέρουν το κύμα, γίνεται κατά μήκος (παράλληλα) της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος. Για παράδειγμα, όταν ένα κατακόρυφο, τεντωμένο ελατήριο τεθεί σε ταλάντωση στο ένα άκρο του κατά τη διεύθυνση του άξονα του ελατηρίου, τότε οι σπείρες του ταλαντώνονται στην παράλληλη του άξονα του ελατηρίου διεύθυνση στην οποία και διαδίδεται η διαταραχή, δημιουργώντας πυκνώματα και αραιώματα. Με τον τρόπο αυτό διαδίδεται ένα διάμηκες κύμα. (Εικόνα 2)



Εικόνα 2. (δημιουργία διαμήκους κύματος σε τεντωμένο κατακόρυφο ελατήριο με σταθερό άκρο)

Τελικά, ένα μηχανικό κύμα δεν είναι ένα είδος διαταραχής σε ένα υλικό, η οποία ταξιδεύει προς κάποια διεύθυνση στο χώρο. Τα σωματίδια του υλικού ταλαντώνονται τοπικά είτε κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης της κυματικής διαταραχής (εγκάρσιο κύμα) ή παράλληλα σε αυτήν (διάμηκες κύμα).

- Η έννοια της ταχύτητας

Η μορφή του κύματος έχει ένα επαναλαμβανόμενο σχήμα. Η συχνότητα, ν , του κύματος ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο η κυματική διαταραχή επαναλαμβάνεται στη μονάδα του χρόνου, και στο σύστημα SI μετριέται σε Herz(Hz). Το μήκος κύματος, λ , είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία του κύματος που, όταν διαταράσσονται, συμπεριφέρονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, και στο σύστημα SI μετριέται σε μέτρα(m). Η περίοδος, T , του κύματος είναι ο χρόνος στον οποίο η κυματική διαταραχή κάνει έναν πλήρη κύκλο, και στο σύστημα SI μετριέται σε δευτερόλεπτα(sec). Με άλλα λόγια, η περίοδος είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το κύμα διανύει απόσταση ίση με ένα μήκος κύματος. Από την άλλη πλευρά η συχνότητα, f , είναι το αντίστροφο της περιόδου. Για τα παραπάνω μεγέθη ισχύει:

$$\nu = 1/T$$

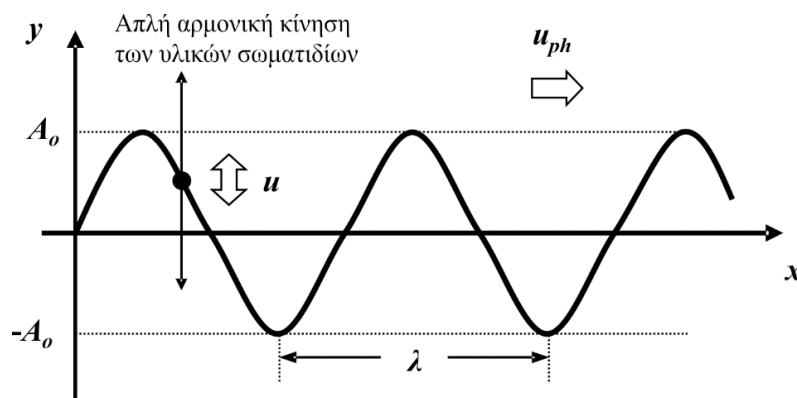
Ακόμα, η συχνότητα και η περίοδος συνδέονται με τη γωνιακή συχνότητα, ω , μέσω της σχέσης:

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$$

Επιπλέον, η μέγιστη μετατόπιση της διαταραχής ονομάζεται πλάτος του κύματος, A_0 .

Τέλος, στη κυματική ορίζονται τρεις διαφορετικές ταχύτητες, σωματιδιακή ταχύτητα, η κυματική ή φασική ταχύτητα και η ομαδική ταχύτητα.

Η σωματιδιακή ταχύτητα, u , είναι η απλή αρμονική ταχύτητα των ταλαντευόμενων σωματιδίων γύρω από την θέση ισορροπίας. Η κυματική ή φασική ταχύτητα, u_{ph} , είναι η ταχύτητα όπου επίπεδα με την ίδια φάση διαδίδονται στο μέσον (διάδοση διαταραχών), δηλαδή η ταχύτητα διάδοσης της κυματικής διαταραχής. Η ομαδική ταχύτητα, u_g , είναι η ταχύτητα με την οποία οδεύουν υπερθέσεις κυμάτων με διαφορετικά μήκη κύματος και διαφορετικές φασικές ταχύτητες. (Εικόνα 3)



Εικόνα 3. (Στιγμιότυπο ενός εγκάρσιου κύματος σε μια δεδομένη χρονική στιγμή.)

- [Η Κυματοσυνάρτηση](#)

Θεωρήστε ένα εγκάρσιο κύμα σε μια χορδή. Θεωρήστε, επίσης, ότι θέλουμε να υπολογίσουμε τη μετατόπιση y κάθε υλικού σημείου O πάνω στη χορδή, ως συνάρτηση του χρόνου t . Προφανώς, δεν έχουν όλα τα σημεία της χορδής την ίδια μετατόπιση σε όποια χρονική στιγμή. Το σχήμα 4.3.α είναι ένα στιγμιότυπο των θέσεων όλων των σημείων της χορδής σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή t . Μόνο σημεία που απέχουν ακέραια πολλαπλάσια του μήκους κύματος έχουν την ίδια μετατόπιση y από την ισορροπία. Σημεία με την ίδια μετατόπιση και την ίδια σωματιδιακή ταχύτητα (y -άξονας) λέμε ότι είναι μεταξύ τους σε φάση. Έτσι αυτό που μπορεί να μας δώσει μια ιδέα για το κύμα είναι μια σχέση που να υπολογίζει τη μετατόπιση y σαν συνάρτηση τόσο του x όσο και του t . Εάν έχουμε αυτή τη σχέση, θα γνωρίζουμε κάθε χρονική στιγμή την μετατόπιση, y , του τυχαίου σημείου O που βρίσκεται στη θέση x την χρονική στιγμή t . Αυτή η συνάρτηση θα έχει τη μορφή

$$y = f(x, t).$$

Θεωρήστε, τώρα, την κίνηση ενός σημείου O που βρίσκεται στη θέση $x = 0$. Εάν τα σημεία της χορδής κινούνται κάθετα ως προς τον άξονα της χορδής, εκτελώντας απλή αρμονική ταλάντωση, τότε η θέση του σημείου στο $x = 0$, με αρχικές συνθήκες $y = 0$ για $t = 0$ δίνεται από τη σχέση:

$$y = A_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

Η διαταραχή, ή το κύμα, ταξιδεύει από τα αριστερά προς τα δεξιά με μια ταχύτητα $u_{ph} = x/t$. Έτσι η διαταραχή ταξιδεύει από το σημείο 0 στο σημείο x σε χρόνο

$t = x/u_{ph}$. Θεωρήστε τώρα την κίνηση ενός σημείου O' που βρίσκεται στη θέση x . Η μετατόπιση του σημείου O που βρίσκεται στο x στον χρόνο t είναι ίδια με αυτή του σημείου O' που βρίσκεται στο $x = 0$ στον χρόνο $t - x/u_{ph}$. Συνεπώς, για να υπολογίσουμε την μετατόπιση του σημείου O στη θέση x στον χρόνο t , χρησιμοποιήστε την ίδια εξίσωση που θα χρησιμοποιούσαμε για την κίνηση του σημείου O' που βρίσκεται στο $x = 0$, αλλά στη θέση του χρόνου t βάζουμε τον προηγούμενο χρόνο $t - x/u_{ph}$. Έτσι, ισχύει:

$$y = A_0 \sin(\omega t + \varphi) = A_0 \sin[\omega(t - x/u_{ph}) + \varphi], \quad (1)$$

Ακόμα, ορίζεται ένα νέο μέγεθος, ο κυματαριθμός ο οποίος έχει μονάδα μέτρησης, στο SI, τα m^{-1} . Για τον κυματαριθμό ισχύει η σχέση:

$$K = 2\pi/\lambda$$

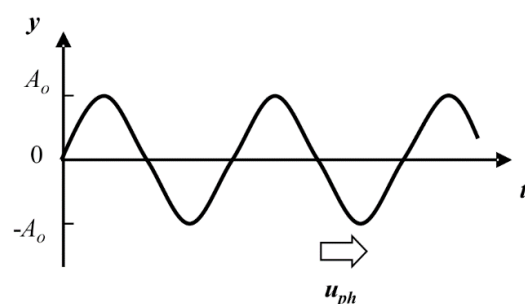
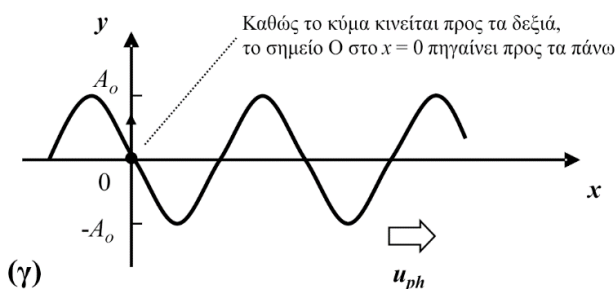
Τελικά, η φασική ταχύτητα γράφεται ως εξής:

$$u_{ph} = \omega/K$$

Έτσι, συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω η συνάρτηση (1) γράφεται ως εξής:

$$y = A_0 \sin(\omega t - Kx + \varphi), \quad (2)$$

Η εξίσωση (2) λέγεται κυματική συνάρτηση ή κυματοσυνάρτηση αρμονικού κύματος, και περιγράφει την μετατόπιση y ενός υλικού σημείου σε ένα κύμα από το σημείο ισορροπίας του, ως συνάρτηση του x (που προσδιορίζει τη θέση ενός συγκεκριμένου ταλαντωτή) και του χρόνου, t . Αξίζει να σημειωθεί ότι η εξίσωση (2) ισχύει τόσο για εγκάρσια όσο και για διαμήκη κύματα.



Εικόνα 4.[y ως συνάρτηση του x για σταθερό t (αριστερά) και y ως συνάρτηση του t για σταθερό x (δεξιά)]

- Γενική εξίσωση κύματος

Η ταχύτητα κάθε συζευγμένου ταλαντωτή, που βρίσκεται στη θέση x, μέσα στο υλικό που ταξιδεύει ένα αρμονικό κύμα, μπορεί να βρεθεί παραγωγίζοντας την μετατόπιση y ως προς t, κρατώντας το x σταθερό (μερική παράγωγος της μετατόπισης ως προς το χρόνο με σταθερό x). Η επιτάχυνσή του είναι η παράγωγος της ταχύτητας u ως προς t με το x σταθερό (μερική παράγωγος της ταχύτητας ως προς το χρόνο με σταθερό x), ή, αλλιώς, η δεύτερη παράγωγος της μετατόπισης y ως προς t με το x σταθερό (δεύτερη μερική παράγωγος της μετατόπισης ως προς το χρόνο με σταθερό x). Έτσι:

Μετατόπιση: $y=A_0\sin(\omega t-Kx+\varphi)$

Ταχύτητα: $u=\partial y/\partial t=\omega A_0\cos(\omega t-Kx+\varphi)$

Επιτάχυνση: $a=\partial u/\partial t=-\omega A_0\sin(\omega t-Kx+\varphi)$

Ακόμα, η μερική παράγωγος του y ως προς x διατηρώντας τον χρόνο t σταθερό είναι:

$$y=A_0\sin(\omega t-Kx+\varphi) \rightarrow \partial y/\partial x=-KA_0\cos(\omega t-Kx+\varphi)$$

Ας υπολογιστεί τώρα η μερική παράγωγος του y ως προς x διατηρώντας τον χρόνο t σταθερό:

$$\partial y/\partial x=-KA_0\cos(\omega t-Kx+\varphi)$$

καθώς και η δεύτερη μερική παράγωγος του y ως προς x διατηρώντας τον χρόνο t σταθερό:

$$\partial^2 y/\partial x^2=-(\omega^2/u_{ph})A_0\sin(\omega t-Kx+\varphi), (3)$$

Τελικά, συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω προκύπτει η εξίσωση:

$$\partial^2 y/\partial t^2=u_{ph}^2(\partial^2 y/\partial x^2), (4)$$

Η διαφορική εξίσωση (4) αποτελεί τη βασικότερη εξίσωση της Κυματικής και ονομάζεται γενική εξίσωση κύματος.

- Ενέργεια κύματος

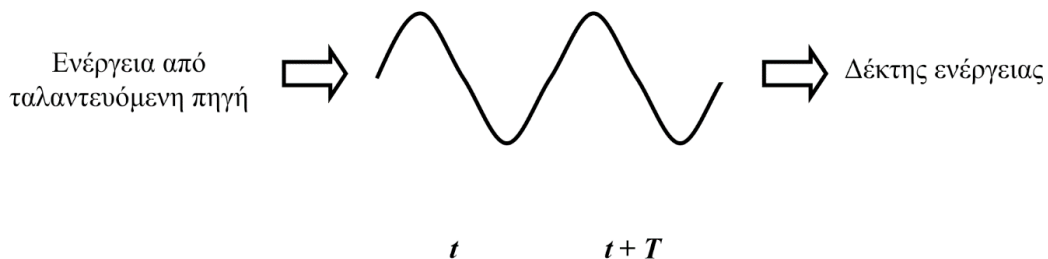
Στην εικόνα 5 φαίνεται σχηματικά η διάδοση ενέργειας μέσω κύματος. Μια εξωτερική πηγή καταναλώνει έργο, κάνοντας τα πρώτα σωματίδια να κινηθούν. Τα σωματίδια κινούνται πάνω - κάτω με απλή αρμονική κίνηση. Η ενέργεια των σωματιδίων μετατρέπεται από κινητική σε δυναμική και ανάστροφα. Η συνολική

ενέργεια των σωματιδίων παραμένει αμετάβλητη. Το κάθε σωματίδιο δίνει ενέργεια στο γειτονικό του από τα δεξιά με τον ίδιο ρυθμό, με τον οποίο προσλαμβάνει ενέργεια από το γειτονικό του από τα αριστερά. Με τον παραπάνω τρόπο αντιλαμβάνεται κανείς πώς η ενέργεια από τη πηγή μπορεί να φτάσει στο δέκτη. Η ενέργεια από την εξωτερική πηγή ταξιδεύει μέσα στο υλικό μέσο με μια συγκεκριμένη ταχύτητα. Η ταχύτητα αυτή είναι ίδια με τη φασική, αν έχουμε κύμα μίας συχνότητας, ενώ ισούται με την ομαδική, αν έχουμε ομάδα κυμάτων με διαφορετικές συχνότητες. Η συνολική ενέργεια του κάθε σωματιδίου είναι:

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A_0^2, \text{ (απλή αρμονική κίνηση)}$$

ενώ, η συνολική ενέργεια όλων των ταλαντευόμενων σωματιδίων σε μήκος όσο το μήκος κύματος λ είναι:

$$E_\lambda = \frac{1}{2} m \omega^2 A_0^2 (\rho \lambda), \text{ όπου } \rho \text{ είναι η μάζα ανά μονάδα μήκους του υλικού.}$$

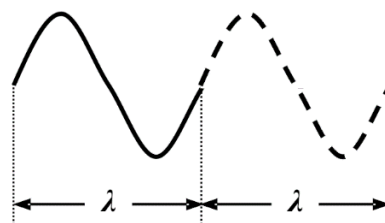


Εικόνα 5. (Διάδοση ενέργειας μέσω κύματος)

- Ισχύς κύματος

Έστω ότι παρατηρείται μια ταλαντευόμενη χορδή (Εικόνα 6). Σε μία περίοδο T , η ενέργεια που περιεχόταν σε μήκος του υλικού όσο ένα μήκος κύματος, έχει μετακινηθεί στη χορδή όσο ένα μήκος κύματος. Η ισχύς της μεταφοράς προφανώς ισούται με την ενέργεια που εμπεριέχεται σε ένα μήκος κύματος δια την περίοδο. Έτσι, ισχύει:

$$P_\lambda = E_\lambda / T = [\omega^2 A_0^2 (\rho \lambda)] / 2T \rightarrow P_\lambda = \frac{1}{2} \rho u_{ph} \omega^2 A_0^2 \rightarrow P_\lambda = 2\pi^2 \rho u_{ph} v^2 A_0^2$$



Εικόνα 6. (ταλαντευόμενη χορδή)

- Επαλληλία κυμάτων

Η επαλληλία (υπέρθεση) κυμάτων είναι το κυματικό φαινόμενο που μπορεί να απαντήσει στην ερώτηση: τι συμβαίνει, όταν δύο ή περισσότερα κύματα φτάνουν στο ίδιο σημείο του χώρου την ίδια χρονική στιγμή;

Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας (υπέρθεσης), η συνολική μετατόπιση των σωματιδίων μέσα στο υλικό στο συγκεκριμένο σημείο είναι το άθροισμα των μετατοπίσεων που θα προκαλούσε το κάθε κύμα, αν δρούσε μόνο του. Η γενική κυματική εξίσωση:

$$\partial^2 y / \partial x^2 = -(1/u_{ph}^2) \partial^2 y / \partial t^2$$

μπορεί να δώσει πληροφορίες για το σχήμα του κύματος, καθώς και την ταχύτητα και επιτάχυνση των σωματιδίων του υλικού διαμέσου, του οποίου το κύμα ταξιδεύει.

Ο βασικός νόμος της υπέρθεσης είναι ότι, εάν δύο κύματα με κυματοσυναρτήσεις $y_1(x,t)$ και $y_2(x,t)$ ικανοποιούν τη γενική κυματική εξίσωση, τότε το ίδιο κάνει και η επαλληλία τους (υπέρθεση) $y_R = y_1 + y_2$.

- [Συμβολή κυμάτων και διακρότημα](#)
→ [Συμβολή κυμάτων](#)

Ο όρος συμβολή χρησιμοποιείται, για να εκφράσει το αποτέλεσμα της υπέρθεσης των κυμάτων, και διακρίνεται σε ενισχυτική συμβολή και σε καταστρεπτική συμβολή.

Ενισχυτική συμβολή έχουμε, όταν το πλάτος του κύματος, που προέρχεται από την υπέρθεση, είναι μεγαλύτερο από κάθε πλάτος οποιουδήποτε από τα κύματα που υπερθέτονται.

Καταστρεπτική συμβολή έχουμε, όταν το πλάτος του κύματος, που προέρχεται από την υπέρθεση, είναι μικρότερο από κάθε πλάτος οποιουδήποτε από τα κύματα που υπερθέτονται.

Για παράδειγμα, θεωρήστε δύο κύματα που ταξιδεύουν στην ίδια διεύθυνση και έχουν το ίδιο πλάτος, συχνότητα και μήκος κύματος, αλλά διαφορετικές αρχικές φάσεις:

$$y_1 = A_0 \sin(\omega t - Kx + \varphi_1)$$

$$y_2 = A_0 \sin(\omega t - Kx + \varphi_2)$$

Παρακάτω περιγράφεται μία από τις πολλές χαρακτηριστικές περιπτώσεις σύνθεσης των παραπάνω κυμάτων, ανάλογα με τη διαφορά φάσης τους

$$\Delta\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2):$$

Έστω ότι $\Delta\varphi = 0$ (ίδια αρχική φάση $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$). Τότε:

$$y_R = y_1 + y_2 = A_0 \sin(\omega t - Kx + \varphi) + A_0 \sin(\omega t - Kx + \varphi) \rightarrow$$

$$y_R = 2A_0 \sin(\omega t - Kx + \varphi)$$

δηλαδή το συνιστάμενο κύμα y_R έχει διπλάσιο πλάτος, αλλά την ίδια συχνότητα και αρχική φάση με τα κύματα που συνθέτονται.

→ Διακρότημα

Ας θεωρηθούν δύο κύματα που ταξιδεύουν στην ίδια διεύθυνση με ίδιο πλάτος, αλλά με διαφορετικές συχνότητες:

$$y_1 = A_0 \sin(\omega_1 t - K_1 x)$$

$$y_2 = A_0 \sin(\omega_2 t - K_2 x)$$

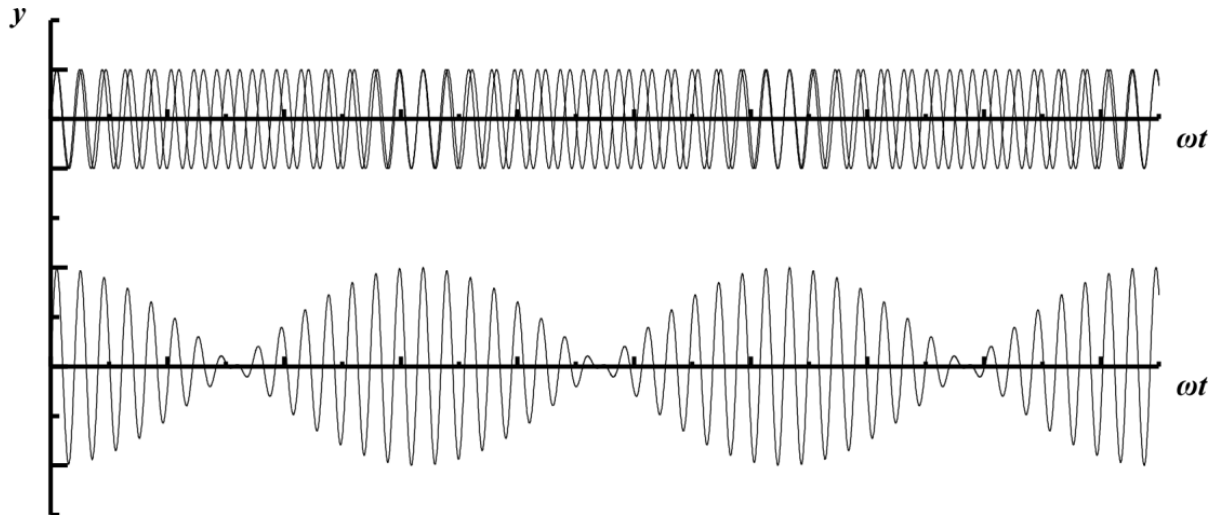
Πώς μοιάζει, όμως, το κύμα που προκύπτει από τη σύνθεση των παραπάνω; Στην εικόνα 7α φαίνεται η μετατόπιση ως συνάρτηση του χρόνου, κρατώντας το x σταθερό. Το αποτέλεσμα της σύνθεσης είναι:

$$y_R = A_0 \sin(\omega_1 t - K_1 x) + A_0 \sin(\omega_2 t - K_2 x) \rightarrow$$

$$y_R = 2A_0 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t/2 - (K_1 - K_2)x/2] \sin[(\omega_1 + \omega_2)t/2 - (K_1 + K_2)x/2]$$

Το συνιστάμενο κύμα μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει ένα «πλάτος» που από μόνο του αποτελεί μια κυματική διαταραχή με κυματοσυνάρτηση

$2A_0 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t/2 - (K_1 - K_2)x/2]$, με συχνότητα $\omega_1 - \omega_2/2$. Το ίδιο το κύμα έχει συχνότητα $\omega_1 + \omega_2/2$. Σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου και, επειδή το πλάτος του κύματος ταλαντώνεται με την ημιδιαφορά των συχνοτήτων, το αυτί (ή ο ηχητικός ανιχνευτής), που βρίσκεται στο σημείο ακρόασης, θα ακούσει ηχητικούς παλμούς συχνότητας $\omega_1 + \omega_2/2$, που το πλάτος τους, που αντανakλά στην ηχητική ένταση ακρόασης, θα είναι διαμορφωμένο με τη συχνότητα $\omega_1 - \omega_2/2$, όπως ακριβώς φαίνεται στην εικόνα 7β. Όσο πιο κοντά είναι οι δύο αρχικές συχνότητες τόσο πιο έντονη και αργή είναι η διαμόρφωση του πλάτους. Το στιγμιότυπο σχήμα που παίρνει πλέον το κύμα φαίνεται στην εικόνα 7β, και ονομάζεται διακρότημα. Τέτοιου είδους υπέρθεση μπορούμε να παρατηρήσουμε, όταν χτυπήσουμε δύο διαπασών που έχουν λίγο διαφορετική συχνότητα, οπότε και θα ακούσουμε μια περιοδική αυξομείωση του ήχου. Οι αυξομειώσεις αυτές λέγονται διακροτήματα. Τα διακροτήματα είναι μια περιοδική αυξομείωση της έντασης, που φτάνει σε ένα σημείο του χώρου, και οφείλονται στην επαλληλία κυμάτων που έχουν παραπλήσιες συχνότητες.



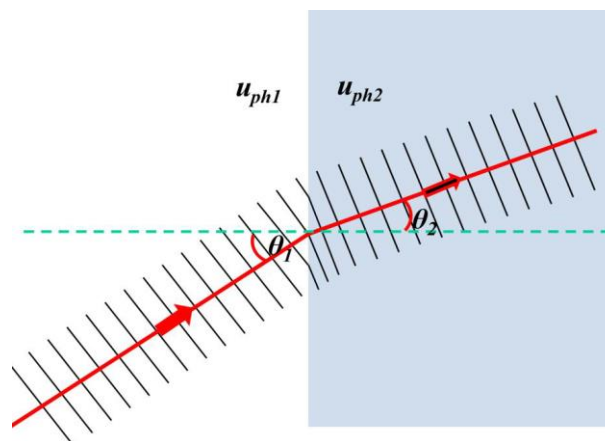
Εικόνα 7. [α. Μετατόπιση ως συνάρτηση του χρόνου για δύο κύματα με παραπλήσιες συχνότητες, και β. το αποτέλεσμα της επαλληλίας δύο τέτοιων κυμάτων (διακρότημα)]

- Διάθλαση κυμάτων

Όταν ένα μηχανικό κύμα διαδοθεί από ένα υλικό σε ένα άλλο υλικό (με διαφορετική φασική ταχύτητα), τότε, και εάν προσπίπτει στη διεπιφάνεια των δύο υλικών υπό γωνία, η πορεία του κύματος στο δεύτερο υλικό εκτρέπεται (Εικόνα 8). Η εκτροπή αυτή ονομάζεται διάθλαση του κύματος, και οφείλεται στο γεγονός ότι, όταν το μέτωπο του κύματος (μικρές μαύρες παράλληλες γραμμές στην Εικόνα 8) βρεθεί ακριβώς στο σύνορο των δύο περιοχών, ένα μέρος κινείται ακόμα στο ένα υλικό και ένα μέρος στο άλλο. Το αποτέλεσμα τελικά θα είναι η εκτροπή του μετώπου του κύματος, όταν αυτό εισέλθει πλήρως στο δεύτερο υλικό.

Γενικά, αν θ_1 είναι η γωνία πρόσπτωσης του κύματος στη διεπιφάνεια των δύο υλικών (σε σχέση με την κάθετο) και θ_2 είναι η γωνία εξόδου της πορείας του κύματος στο δεύτερο υλικό, στη διάθλαση ισχύει ο παρακάτω νόμος (γνωστός και ως νόμος του Snell):

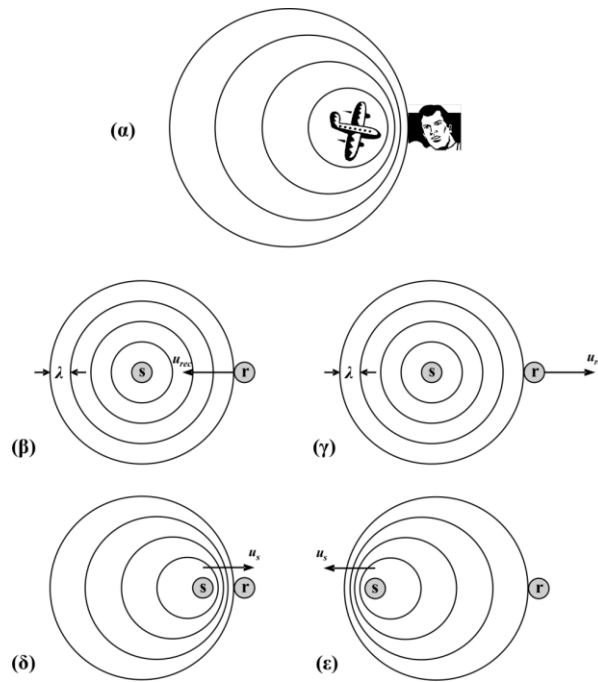
$$\sin\theta_1/\sin\theta_2 = u_{ph1}/u_{ph2}$$



Εικόνα 8. [Κύμα (την πορεία του κύματος τη δείχνει η κόκκινη γραμμή) που προσπίπτει υπό γωνία θ_1 (σε σχέση με την κάθετο στη συνοριακή επιφάνεια, μπλε διακεκομμένη γραμμή) πάνω σε συνοριακή επιφάνεια μεταξύ δύο υλικών με διαφορετική φασική ταχύτητα u_{ph1} και u_{ph2} αλλάζει κατεύθυνση, και κινείται πλέον σε νέα γωνία θ_2 .]

- [Φαινόμενο Doppler](#)

Οποτεδήποτε υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ της πηγής των κυμάτων και του δέκτη, η συχνότητα των κυμάτων που ανιχνεύει ο δέκτης είναι διαφορετική από αυτή που θα ανίχνευε ο ίδιος δέκτης, αν δεν υπήρχε σχετική κίνηση. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως φαινόμενο Doppler (Ντόπλερ), προς τιμήν του Αυστριακού φυσικού C.J. Doppler. Το φαινόμενο εξηγείται ποιοτικά, αν παρατηρηθεί η σχηματική του αναπαράσταση στην εικόνα 9α. Θεωρήστε ένα αεροπλάνο που κινείται προς το μέρος ενός ακίνητου ακροατή. Έστω ότι τα ηχητικά κύματα, που εκπέμπονται από τις μηχανές του αεροπλάνου, έχουν μια καθορισμένη συχνότητα ν . Ο ακροατής όμως λόγω της κίνησης του αεροπλάνου προς το μέρος του θα λαμβάνει τα μέγιστα των ηχητικών κυμάτων (οι κύκλοι του σχήματος) με συχνότητα ν' μεγαλύτερη από αυτή που πραγματικά έχουν (σχηματικά αυτό δείχνεται με το πύκνωμα των κύκλων). Οι χαρακτηριστικές περιπτώσεις σχετικής κίνησης πομπού (s) και δέκτη (r) είναι τέσσερις. Αρχικά, στην περίπτωση που το αεροπλάνο απομακρύνεται από τον ακροατή, είναι προφανές ότι οι κύκλοι θα αραιώναν (εικόνα 9α), και ότι η συχνότητα του κύματος, που θα άκουγε ο ακροατής, θα ήταν μικρότερη από την πραγματική. Ακόμα, μπορεί ο δέκτης να πλησιάζει τον ακίνητο πομπό (εικόνα 9β) με ταχύτητα u_{rec} . Επίσης, μπορεί ο δέκτης να απομακρύνεται από τον ακίνητο πομπό (εικόνα 9γ) με ταχύτητα u_{rec} . Επιπλέον, μπορεί ο πομπός να πλησιάζει τον ακίνητο δέκτη (εικόνα 9δ) με ταχύτητα u_s . Τέλος, μπορεί ο πομπός να απομακρύνεται από τον ακίνητο δέκτη (εικόνα 9ε) με ταχύτητα u_s .



Εικόνα 9. [(α) Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου Doppler. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις σχετικής κίνησης πομπού (s) και δέκτη (r): (β) δέκτης πλησιάζει ακίνητο πομπό με ταχύτητα u_{rec} , (γ) δέκτης απομακρύνεται από ακίνητο πομπό με ταχύτητα u_{rec} , (δ) πομπός πλησιάζει ακίνητο δέκτη με ταχύτητα u_s , και (ε) πομπός απομακρύνεται από ακίνητο δέκτη με ταχύτητα u_s .]

➤ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

• Ορισμός και είδη σεισμικών κυμάτων

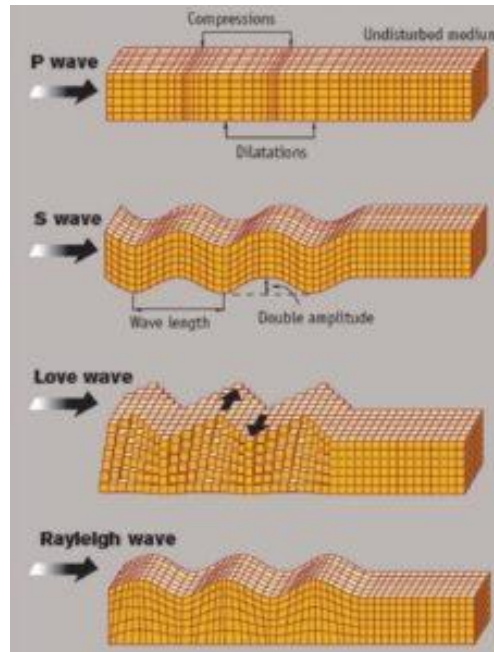
Τα ελαστικά κύματα που παράγονται με φυσικό ή τεχνητό τρόπο μέσα ή πάνω στην επιφάνεια της Γης και διαδίδονται μέσα σ' αυτή λέγονται σεισμικά κύματα. Τα σεισμικά κύματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα κύματα χώρου και τα επιφανειακά κύματα.

Κύματα χώρου, λέγονται τα κύματα τα οποία διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις μέσα στη γη. Τα κύματα χώρου διακρίνονται σε δύο είδη, τα επιμήκη κύματα (P) και τα εγκάρσια κύματα (S).

- Επιμήκη ή Πρωτεύοντα κύματα (P-Primary) λέγονται τα κύματα εκείνα όπου η ταλάντωση γίνεται παράλληλα προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος.
- Εγκάρσια ή Δευτερεύοντα κύματα (S-Secondary) είναι τα κύματα στα οποία η ταλάντωση γίνεται κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Επιφανειακά κύματα, λέγονται τα κύματα που ακολουθούν συγκεκριμένες διαδρομές μέσα στα επιφανειακά στρώματα της γης. Τα επιφανειακά κύματα διακρίνονται σε τρία είδη, τα κύματα Rayleigh (R) και τα κύματα Love (L).

- Οι τροχιές των κυμάτων Rayleigh (R) είναι ελλειπτικές, κάθετα στην επιφάνεια του εδάφους και παράλληλα με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.
- Τα κύματα Love (L) εμφανίζουν οριζόντια πόλωση και κινούνται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσής τους. Η ταχύτητά τους είναι μικρότερη των κυμάτων χώρου, αλλά μεγαλύτερη των κυμάτων Rayleigh (R).



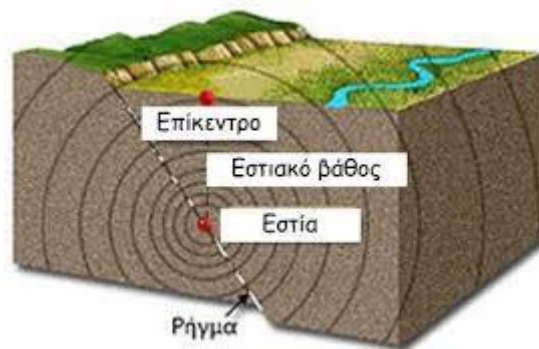
Εικόνα 10. (Κύματα S, κύματα P, κύματα R και κύματα L)

- [Εστία, επίκεντρο και χρόνος γένεσης σεισμού](#)
- Εστία του σεισμού: Καλείται η διάρρηξη των πετρωμάτων που οφείλονται στην υλοποίηση ενός σεισμού, αρχίζει σε έναν συγκεκριμένο χώρο και διαδίδεται ανομοιόμορφα πάνω στο σεισμικό ρήγμα με ορισμένη ταχύτητα έως ότου να σταματήσει. Ο χώρος που αρχίζει η διάρρηξη ενδέχεται σε πρώτη προσέγγιση να θεωρηθεί ως σημείο. Σε αυτή την περίπτωση το σημείο αποκαλείται μικροσεισμική εστία του σεισμού ή άλλως μικροσεισμικό υπόκεντρο.
- Επίκεντρο σεισμικής δόνησης: Εκείνο το σημείο το οποίο τέμνει την επιφάνεια της Γης η κατακόρυφη που διαπερνάει την μικροσεισμική εστία ονομάζεται μικροσεισμικό επίκεντρο.

Όσον αφορά όμως το επίκεντρο ενός σεισμού που καλείται μακροσεισμικό, τα αποτελέσματα και οι συνέπειες του είναι μέγιστα σε ένα τμήμα της επιφάνειας της Γης. Το κέντρο του τμήματος εκείνου που πλήττεται λέγεται μακροσεισμικό επίκεντρο και σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να μην συμπίπτει με το μικροσεισμικό.

Η απόσταση μεταξύ της εστίας πραγματοποίησης ενός σεισμού και του αντίστοιχου επικέντρου του καλείται εστιακό βάθος.

- Επικεντρική απόσταση, Δ , του επικέντρου του σεισμού, E , από τον σταθμό ταυτοποίησης, Σ , ονομάζεται το μήκος του τόξου μέγιστου κύκλου που βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια της Γης μεταξύ του σταθμού και του επικέντρου ή η αντίστοιχη επικεντρική γωνία θ , μεταξύ εστίας κέντρου του Γης και σταθμού. Μονάδα μέτρησης της επικεντρικής απόστασης είναι τα χιλιόμετρα (km) ή εναλλακτικά οι μοίρες, αν ληφθεί υπόψιν ότι πάνω σε πραγματική κλίμακα ισχύει 1 μοίρα~111.11 km.
- Χρόνος διαδρομής ενός σεισμικού κύματος αποτελεί ο χρόνος στον οποίο το κύμα διατρέχει το τμήμα του δρόμου που διαγράφεται από την σεισμική ακτίνα μεταξύ της εστίας και ενός σταθμού. Είναι φανερό πως ο χρόνος άφιξης ενός κύματος σεισμικής φύσεως σε έναν σταθμό είναι το άθροισμα του χρόνου γένεσης και του χρόνου διαδρομής αυτού.



Εικόνα 11. (Εστία, επίκεντρο, εστιακό βάθος)

- Καμπύλες χρόνων διαδρομής των κυμάτων χρόνου

Τα κύματα χώρου, που γεννιούνται στην εστία ενός σεισμού, διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης και φθάνουν στην επιφάνειά της, σε σημεία όπου υπάρχουν σεισμολογικοί σταθμοί(εικόνα 1).Αν η εστία και ο χρόνος γένεσης του σεισμού είναι γνωστά διευκολυνόμαστε στον υπολογισμό των επικεντρικών αποστάσεων και των αντίστοιχων χρόνων διαδρομής.

Αν αυτό επαναληφθεί για πληθώρα σεισμών, τότε είναι εφικτή από μέρους μας η κατασκευή πινάκων που να προσδιορίζουν τους χρόνους διαδρομής t , συναρτήσει των επικεντρικών αποστάσεων, Δ , οι λεγόμενοι πίνακες χρόνων διαδρομής.

Οι γραφικές παραστάσεις των σχέσεων διαδρομής και των επικεντρικών αποστάσεων ονομάζονται καμπύλες χρόνων διαδρομής(καμπύλη χρόνων).Η μορφή των καμπυλών χρόνων διαδρομής εξαρτάται από τον τρόπο μεταβολής των ταχυτήτων των κυμάτων χώρου μέσα στον φλοιό της Γης ενώ το εστιακό βάθος λαμβάνεται υπόψιν ως παράμετρος στους πίνακες και στις καμπύλες χρόνων διαδρομής.

Παράγοντας καθαρισμού των χρόνων διαδρομής αποτελεί το εστιακό βάθος του σεισμού. Για τον λόγο αυτόν, έχει επιδιωχθεί η κατασκευή τέτοιων πινάκων για διάφορα εστιακά βάθη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου πίνακα αποτελεί ο πίνακας των Harold Jeffreys και Keith Edward Bullen, κατασκευασμένος το 1948. Οι πιο σύγχρονοι πίνακες χρόνων διαδρομής βασίζονται στις αναγραφές πυρηνικών ή άλλων εκρήξεων, διότι οι εστίες και οι χρόνοι γένεσης των εκρήξεων είναι γνωστοί με μεγάλη ακρίβεια.



Εικόνα 12. (Καμπύλες χρόνων διαδρομής κυμάτων)

- [Μεταβολή της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων με το βάθος μέσα στη Γη](#)
→ Κανονική μεταβολή της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων με το βάθος μέσα στην Γη

Οι ταχύτητες των κυμάτων χώρου μεταβάλλονται κατά κύριο λόγο με το βάθος μέσα στην Γη και πολύ λιγότερο οριζόντια. Όταν η μεταβολή της ταχύτητας u με το βάθος h είναι συνεχής και η βαθμίδα αυτής της μεταβολής (du/dh) είναι μικρή, λέμε ότι έχουμε κανονική μεταβολή της ταχύτητας με το βάθος. Στο μεγαλύτερο μέρος του εσωτερικού της Γης η μεταβολή της ταχύτητας μπορεί να θεωρηθεί κανονική. Το σχήμα κάτω αναπαριστά σεισμικές ακτίνες (α) και την καμπύλη χρόνων διαδρομής (β) στην περίπτωση κανονικής μεταβολής της ταχύτητας με το βάθος. Φαίνεται ότι ο χρόνος διαδρομής, T , είναι μονοσήμαντη συνάρτηση της επικεντρικής απόστασης.

Κάθε σεισμική ακτίνα χαρακτηρίζεται από την παράμετρο p η οποία δίνεται από την σχέση $p = (r \sin i) / v$ όπου r είναι η απόσταση από το κέντρο της Γης, i η γωνία

πρόσπτωσης και v η ταχύτητα. Η τιμή της παραμέτρου αυτής είναι σταθερή για όλο το μήκος της διαδρομής της ακτίνας και ουσιαστικά διατυπώνεται ο νόμος του Snell για σφαιρική Γη.

Σύμφωνα με αυτόν στην επιφάνεια της Γης:

$$p = r_0 \sin i / v_0$$

ενώ στο βαθύτερο σημείο της διαδρομής:

$$r = r_p \text{ και } p = r_p / v_p$$

Η παράμετρος μίας σεισμικής ακτίνας σε επικεντρική απόσταση Δ , ισούται με την κλίση $dT/d\Delta$ της καμπύλης χρόνων διαδρομής στην απόσταση Δ .

→ Μη κανονική μεταβολή της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων με το βάθος μέσα στην Γη

Σε περίπτωση στρώματος μεγάλης ταχύτητας στο εσωτερικό της Γης, τότε οι σεισμικές ακτίνες, που περνάνε από την περιοχή αυτή, καμπυλώνονται ισχυρά με συνέπεια να φθάνουν αυτές σε αποστάσεις μικρότερες από εκείνες στις οποίες φθάνουν άλλες ακτίνες, που αναχωρούν από την εστία με μεγαλύτερες γωνίες ως προς την κατακόρυφο, αλλά βρίσκονται ολόκληρες πάνω από την περιοχή που προκαλεί την ανωμαλία (σχήμα α). Ο χρόνος διαδρομής, T , δεν είναι μονοσήμαντη συνάρτηση της επικεντρικής απόστασης, Δ , (σχήμα β), δηλαδή υπάρχουν κύματα του ίδιου τύπου (π.χ. Ρ κύματα) που αναχωρούν συγχρόνως από την εστία και φθάνουν σε διαφορετικούς χρόνους σε ορισμένο σταθμό, επειδή ακολούθησαν διαφορετικούς δρόμους.

Υπάρχει και η περίπτωση στρώματος χαμηλής ταχύτητας μέσα στη Γη, ενώ πάνω και κάτω από το στρώμα αυτό η ταχύτητα μεταβάλλεται κανονικά (π.χ. σε ορισμένα βάθη στον μανδύα, στον εξωτερικό πυρήνα και ίσως στον φλοιό, καθώς και στο όριο μεταξύ μανδύα και πυρήνα). Το σχήμα (α) παριστάνει τις σεισμικές ακτίνες ενώ το σχήμα (β) δείχνει την καμπύλη χρόνων διαδρομής. Φαίνεται η ασυνέχεια στην καμπύλη $T=f(\Delta)$ και συνεπώς υπάρχει περιοχή όπου δεν αναδύονται σεισμικές ακτίνες, η οποία ονομάζεται σκιερή ζώνη.

Η κατανόηση του τρόπου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μέσα στην Γη προϋποθέτει τη γνώση της μεταβολής των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων χώρου με το βάθος.

Η Γη χωρίζεται στον φλοιό, στον μανδύα και στον πυρήνα, ο οποίος χωρίζεται σε εσωτερικό και εξωτερικό πυρήνα. Με τα σύμβολα K και I παριστάνονται οι καμπύλες, που αφορούν τις ταχύτητες των επιμήκων κυμάτων στον εξωτερικό και στον εσωτερικό πυρήνα, ενώ με το σύμβολο J παριστάνεται η καμπύλη που αφορά την ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων στον εσωτερικό πυρήνα. Οι ταχύτητες των κυμάτων χώρου στο μεγαλύτερο μέρος της Γης αυξάνονται με το βάθος συνεχώς αλλά όχι έντονα, δηλαδή μεταβάλλονται κανονικά.

Υπάρχουν περιοχές του εσωτερικού της Γης όπου η ταχύτητα δεν μεταβάλλεται κανονικά με το βάθος. Υπάρχουν μάλιστα ορισμένα βάθη όπου η ταχύτητα μεταβάλλεται απότομα. Στα βάθη της υπάρχουν ασυνέχειες των ταχυτήτων. Δύο από τις ασυνέχειες αυτές είναι οι σπουδαιότερες και για αυτό ονομάζονται ασυνέχειες πρώτης τάξης. Αυτές αποτελούν επιφάνειες που χωρίζουν την Γη σε τρία συγκεντρικά στρώματα. Τα στρώματα αυτά είναι ο φλοιός, ο μανδύας και ο πυρήνας.

Η ασυνέχεια που χωρίζει τον φλοιό από τον μανδύα λέγεται ασυνέχεια Mohorovicic ενώ η ασυνέχεια που χωρίζει τον μανδύα από τον πυρήνα λέγεται ασυνέχεια Gutenberg, από τα ονόματα των επιστημόνων που τις ανακάλυψαν. Μία από τις ασυνέχειες δεύτερης τάξης είναι αυτή που βρίσκεται σε βάθος περίπου 670 km (ονομαζόμενη ως ασυνέχεια Lehmann) και σχεδόν συμπίπτει με το μεγαλύτερο βάθος στο οποίο γίνονται σεισμοί.

Τα παραγόμενα στην εστία ενός σεισμού επιμήκη και εγκάρσια κύματα διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης και φθάνουν στην επιφάνεια αυτής, όπου μπορούν να γράφουν από τα σεισμικά όργανα.

Το γεγονός ότι η Γη έχει πεπερασμένες διαστάσεις και δεν είναι ομογενής έχει ως συνέπεια την διάθλαση, ανάκλαση, περίθλαση, σκέδαση, απόσβεση ,κλπ. των διαδιδόμενων στο εσωτερικό της σεισμικών κυμάτων. Για το λόγο αυτό, πολλές κατηγορίες σεισμικών κυμάτων φθάνουν στην επιφάνεια της Γης και καταγράφονται από τους σειсмоγράφους. Οι κατηγορίες αυτές, που συνήθως καλούνται φάσεις των σεισμικών κυμάτων, διαφέρουν ως προς την φαινόμενη ταχύτητα διάδοσης, το πλάτος, την περίοδο και γενικά ως προς την μορφή τους. Η μελέτη των ιδιοτήτων αυτών οδηγεί στην εξακρίβωση των συνθηκών που επικρατούν αυτό εσωτερικό της Γης και συμβάλλουν στην γένεση των φάσεων αυτών.

Η φαινόμενη ταχύτητα, V , διαδρομής ενός κύματος σε ορισμένο σημείο της επιφάνειας της Γης είναι ίση με το αντίστροφο της κλήσης της καμπύλης χρόνων διαδρομής, $d\Delta/dT$, για απόσταση ίση με την επικεντρική απόσταση, Δ , του σεισμού από το σημείο, δηλαδή:

$$V = d\Delta/dT$$

Η φαινόμενη ταχύτητα είναι ίση με τη πραγματική ταχύτητα στο κατώτερο σημείο της ακτίνας, δηλαδή στο κατώτερο σημείο του δρόμου τον οποίο διατρέχει το κύμα από την εστία μέχρι το σημείο απόστασης.

- [Διάδοση των κυμάτων χώρου στον φλοιό](#)

Κατά την διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης ισχύουν οι αρχές του Fermat και του Huygens καθώς και ο νόμος του Snell:

→ Αρχή του Fermat: Όταν ένα κύμα διαδίδεται σε υλικό μέσο, ακολουθεί τη διαδρομή του ελάχιστου χρόνου.

→ Αρχή του Huygens: Κάθε υλικό σημείο που ταλαντώνεται κατά την διέλευση κύματος, γίνεται με την σειρά του πηγή δευτερογενούς ακτινοβολίας.

→ Νόμος του Snell: $\sin\theta_1/\sin\theta_2 = u_1/u_2$

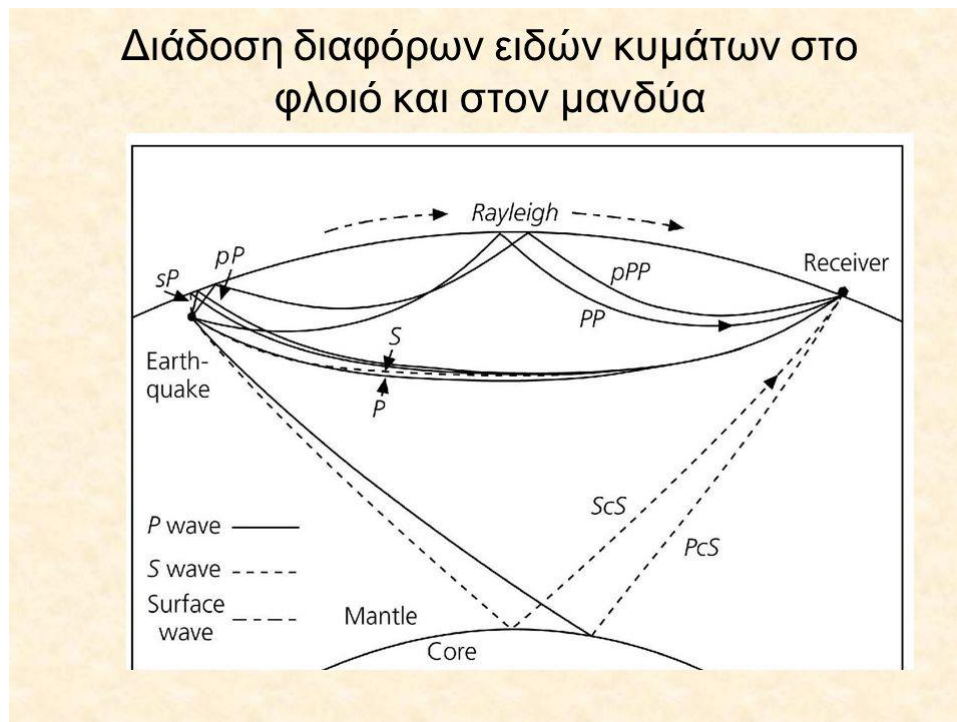
Όταν όμως η προσπίπτουσα ακτίνα αποκτά τιμή $i_1=i_c$, τέτοια που η i_2 να γίνει ίση με 90° , δηλαδή θα ισχύει $\eta \mu i_c = v_1/v_2$, τότε: η διαθλώμενη ακτίνα ακολουθεί τη διαχωριστική επιφάνεια την δύο μέσων και τα κύματα αυτά ονομάζονται μετωπικά κύματα (head waves). Η γωνία i_c καλείται οριακή γωνία.

Οι εξισώσεις των χρόνων διαδρομής σε συνάρτηση με την απόσταση Δ είναι:

1. Απευθείας κύματα: $T_1 = \Delta/v_0$
2. Διαθλωμένα κύματα: $T_2 = \Delta/v_1 + [2z \cdot \sqrt{v_1^2 - v_0^2}]/v_0 \cdot v_1$
3. Ανακλώμενα κύματα: $T_3 = \sqrt{\Delta^2 + 4z^2}/v_0$

Από αναφορές διαφόρων φάσεων τοπικών και γειτονικών σεισμών (Δ μέχρι 1000 km περίπου), έγινε δυνατός ο καθορισμός των βασικών ιδιοτήτων του φλοιού της Γης.

Αρχικά, η γνώση της ύπαρξης του <<γρανιτικού>> στρώματος οφείλεται στην καταγραφή από τα σεισμόμετρα μίας φάσης των επιμήκων κυμάτων, που συμβολίζεται με το P_g. Η ταχύτητα των κυμάτων αυτών είναι της τάξης των 6 km/sec. Παράλληλα παρατηρήθηκε και η αντίστοιχη φάση των εγκάρσιων κυμάτων, που παριστάνεται με το S_g και έχει ταχύτητα ίση με 3.4 km/sec περίπου. Ακόμα, η ύπαρξη του <<βαλσατικού>> στρώματος συμπεραίνεται από την αναγραφή μίας φάσης των επιμήκων κυμάτων, που παριστάνεται με το P_b (ή P) και της αντίστοιχης φάσης των εγκάρσιων κυμάτων, που παριστάνεται με το S_b (ή S), με φαινόμενες ταχύτητες περίπου 6.5 km/sec και 3.7 km/sec αντίστοιχα. Επιπλέον, η ανακάλυψη της ασυνέχειας Mohorovičić οφείλεται στην αναγραφή φάσης των επιμήκων κυμάτων που παρίσταται με το P_h και έχει φαινόμενη ταχύτητα ίση με 8.1 km/sec περίπου, ενώ η αντίστοιχη φάση των εγκάρσιων κυμάτων έχει συνήθως ταχύτητα 4.4 km/sec και παριστάνεται με το S_h. Τέλος, από τις φάσεις των κυμάτων χώρου που φθάνουν σε ένα σεισμολογικό σταθμό, ορισμένες οφείλονται σε κύματα διάθλασης, άλλες σε διαυλικά κύματα και άλλες σε κύματα ανάκλασης.



Εικόνα 13. (Διάδοση κυμάτων στον φλοιό και τον μανδύα)

- Κύματα διάθλασης

Τα κύματα P_g παρατηρούνται στους τοπικούς και γειτονικούς ηπειρωτικούς σεισμούς που έχουν τις εστίες τους μέσα στο γρανιτικό ή μέσα στο ιζηματογενές στρώμα. Αν η εστία βρίσκεται στο γρανιτικό στρώμα, τότε το P_g διαδίδεται ευθύγραμμα μέσα σε αυτό, μετά διαθλάται στην οριακή επιφάνεια που βρίσκεται μεταξύ του γρανιτικού και του ιζηματογενούς στρώματος και διαδίδόμενο μέσα στο ιζηματογενές στρώμα φθάνει στο σταθμό. Αν, από την άλλη πλευρά, η εστία βρίσκεται στο ιζηματογενές στρώμα, τότε το κύμα P_g αναχωρεί από την εστία που βρίσκεται μέσα σε αυτό το στρώμα, προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια που βρίσκεται μεταξύ του στρώματος αυτού και του γρανιτικού στρώματος υπό γωνία ίση με την οριακή και διαθλάται. Στη συνέχεια αυτό διαδίδεται κατά μήκος της τομής της διαχωριστικής επιφάνειας και του κατακόρυφου επιπέδου, που περνάει από την εστία και το σταθμό με τη ταχύτητα που έχει αυτό στο κάτω στρώμα (γρανιτικό), δηλαδή περίπου με 6.0 km/sec και φθάνει από το συμμετρικό δρόμο στην επιφάνεια της Γης, αφού υποστεί δεύτερη διάθλαση στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο στρωμάτων.

Τα P_b κύματα προσπίπτουν στην ασυνέχεια Conard υπό την οριακή γωνία και διαδίδονται κατά μήκος της τομής της επιφάνειας αυτής και του κατακόρυφου επιπέδου, με την ταχύτητα τους στο <<βασαλτικό>> στρώμα για να φθάσουν στο σταθμό από το συμμετρικό δρόμο. Αντίθετα, τα P_n κύματα προσπίπτουν στην ασυνέχεια Mohorovičić υπό την οριακή γωνία διαδίδονται κατά μήκος της τομής της επιφάνειας αυτής με το κατακόρυφο επίπεδο, με την ταχύτητα τους αμέσως κάτω

από τον φλοιό και φθάνουν στο σταθμό από το συμμετρικό δρόμο. Τέλος, αντίστοιχες πορείες ακολουθούν και τα κύματα S_g , S_b και S_n .

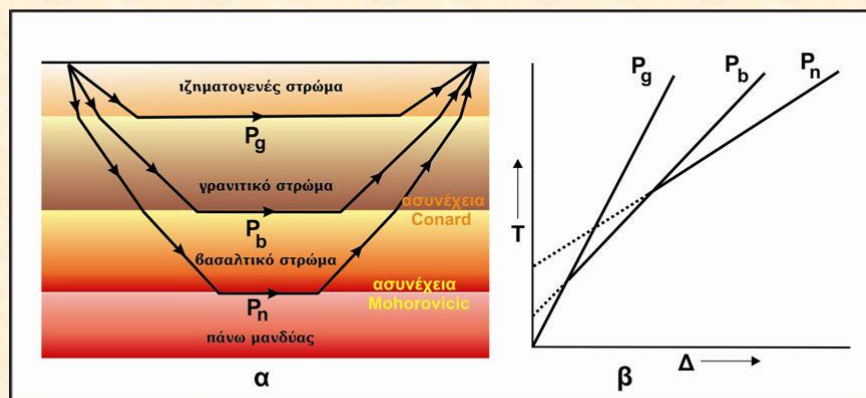
Κάθε οριακή γωνία (μεταξύ της σεισμικής ακτίνας και της κατακορύφου στο σημείο πρόσπτωσης) ορίζεται από την σχέση:

$$\eta \mu i_c = u/V$$

όπου u και V είναι η ταχύτητα του κύματος αμέσως πάνω και αμέσως κάτω από την διαχωριστική επιφάνεια αντίστοιχα.

Επειδή η φαινόμενη ταχύτητα ενός κύματος είναι ίση με την ταχύτητα αυτού στο κατώτερο σημείο της σεισμικής ακτίνας του, οι φαινόμενες ταχύτητες που αναφέρθηκαν παραπάνω οι οποίες ισούνται με τα αντίστροφα των κλίσεων των καμπύλων του προηγούμενου σχήματος, είναι οι πραγματικές ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων στο <<γρανιτικό>> και <<βασαλτικό>> στρώμα και στο μέρος του μανδύα που βρίσκεται αμέσως κάτω από τον φλοιό αντίστοιχα. Όσον αφορά επικεντρικές αποστάσεις μικρότερες των 130 km περίπου πρώτα φθάνουν τα P_g κύματα και ακολουθούν τα P_n κύματα τα οποία έχουν μικρότερα πλάτη ενώ για αρκετά μεγαλύτερες αποστάσεις (>150-200 km) πρώτα φθάνουν τα P_n κύματα. Η φάση P_b έχει γενικώς μικρά πλάτη και παρατηρείται καλύτερα σε καταγραφές σεισμών παρά σε αναγραφές τεχνητών εκρήξεων.

Κύματα διάθλασης α) στον φλοιό και β) οι αντίστοιχες καμπύλες χρόνων διαδρομής



Εικόνα 14. (Κύματα διάθλασης)

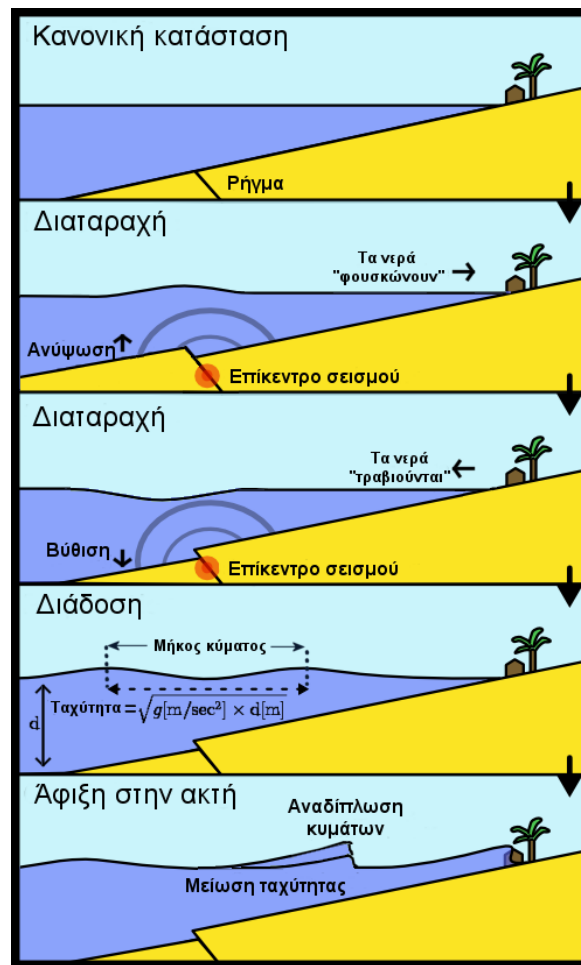
- [Διαυλικά κύματα](#)

Σε ορισμένες περιοχές της Γης υπάρχει στρώμα μικρής ταχύτητας, περίπου από το βάθος 10 km μέχρι το βάθος 20 km μέσα στο φλοιό, το οποίο ονομάζεται

λιθοσφαιρικός δίαυλος. Μέσα στο δίαυλο η ταχύτητα των Pg κυμάτων είναι σχετικά μικρή (~5.6 km/sec) σε σχέση με την ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων αμέσως πάνω και αμέσως κάτω από τον δίαυλο. Λόγω της ύπαρξης του διαύλου σημαντικό μέρος της σεισμικής ενέργειας που μπαίνει ή γεννιέται μέσα στον δίαυλο διαδίδεται μέσα σε αυτόν με ταχύτητα ίση με την φαινόμενη ταχύτητα των Pg ή Sg κυμάτων, λόγω διαδοχικών ανάκλασεων στην κάτω και πάνω επιφάνεια του διαύλου και χωρίς ισχυρή απόσβεση.

Έτσι, σε μικρές αποστάσεις ($\Delta < 60$ km) πρώτα φθάνουν στο σταθμό τα απ'ευθείας επιμήκη κύματα τα οποία παριστάνονται με το p. Μετά υπάρχει σκιερή ζώνη, δηλαδή περιοχή όπου δεν διαδίδονται κύματα και οι καμπύλες χρόνων διαδρομής διακόπτονται για τις αντίστοιχες επικεντρικές αποστάσεις. Όπως αναμένεται, για Δ μέχρι 130 km γράφονται πρώτα τα διαυλικά κύματα Pg, που παριστάνονται και με το Pd, ενώ σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 130 km γράφονται πρώτα τα κύματα Pn ή Pb.

Εκτός από τα ηπειρωτικά διαυλικά κύματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, υπάρχουν και ωκεάνια διαυλικά κύματα, ευρύτερα διαδεδομένα με την ονομασία φάση T. Η φάση αυτή διαδίδεται μέσα σε υδάτινο δίαυλο (SOFAR, SOund Fixing And Ranging) του οποίου ο άξονας βρίσκεται, κατά μέσο όρο, σε βάθος 1500 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, με περίοδο μικρότερη του 1 sec και φαινόμενη ταχύτητα ίση με 1.5 km/sec. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης με το βάθος είναι τέτοιες ώστε να δημιουργείται σε αυτό το βάθος στρώμα μικρής ταχύτητας, δηλαδή ο δίαυλος. Η φάση T έχει μεγάλη σημασία από πρακτικής άποψης, γιατί η αναγραφή της από σταθμούς που βρίσκονται κοντά στις ακτές τους Ειρηνικού ωκεανού αποτελεί προειδοποίηση για την άφιξη θαλάσσιων κυμάτων βαρύτητας (tsunami) που προκαλούν καταστροφές σε αυτές τις ακτές.



Εικόνα 15. (Τσουνάμι)

- Κύματα ανάκλασης

Τα κύματα ανάκλασης είναι κύματα τα οποία αναχωρούν από την εστία του σεισμού που βρίσκεται μέσα στο φλοιό και προσπίπτουν στην ασυνέχεια Mohorovicic, όπου παθαίνουν ανάκλαση και μετά επιστρέφουν στην επιφάνεια της Γης, όπου αναγράφονται από σεισμολογικούς σταθμούς σε σχετικά μικρές επικεντρικές αποστάσεις. Αν τόσο αυτό που προσπίπτει όσο και το ανακλώμενο κύμα στην επιφάνεια Mohorovicic είναι επιμήκη ή εγκάρσια, το αναγραφόμενο κύμα παριστάνεται με το PmP ή SmS αντίστοιχα.

- Διάδοση των κυμάτων χώρου στον μανδύα

Ο μανδύας της Γης αρχίζει από την ασυνέχεια Mohorovicic και φθάνει μέχρι το βάθος των 2890 km, όπου βρίσκεται η ασυνέχεια Gutenberg. Στο βάθος των 660 km υπάρχει αλλαγή της δομής(ασυνέχεια Lehmann) και για αυτό στο βάθος αυτό ο μανδύας χωρίζεται στον πάνω μανδύα και στον κάτω μανδύα. Ο μανδύας αποτελείται κυρίως από πυριτικά άλατα, όπως είναι ο ολιβίνης ($MgSiO_4$, $FeSiO_4$).

Η αιτία των γεωδυναμικών φαινομένων βρίσκεται στον πάνω μανδύα. Μεταξύ περίπου 60 και 220 km υπάρχει στρώμα χαμηλής ταχύτητας το οποίο καλείται ως ασθενοσφαιρικός δίαυλος και παρέχει τη δυνατότητα σχετικώς εύκολης κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών πάνω στην ασθενόσφαιρα λόγω της ευκαμψίας(ρευστότητας) του υλικού του διαύλου.

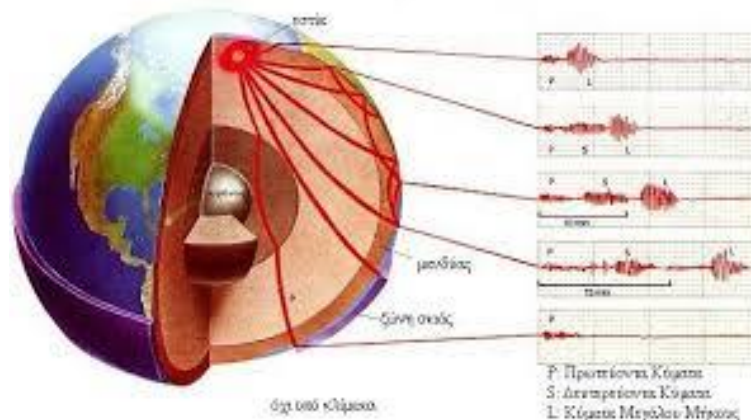
- ✓ Από το βάθος των 220 km μέχρι το βάθος των 400 km ή ταχύτητα αυξάνεται αργά.
- ✓ Το στρώμα μεταξύ 410 km και 660 km αποτελεί <<μεταβατική ζώνη>> που ορίζεται από τις ασυνέχειες των 410 και των 660 km στις οποίες οι ταχύτητες των κυμάτων χώρου αυξάνουν απότομα.
- ✓ Στον κάτω μανδύα, δηλαδή από το βάθος των 660 km μέχρι το βάθος των 2890 km η ταχύτητα των κυμάτων χώρου αυξάνεται ομαλά.

Τα κύματα αναχωρούν από μία εστία η οποία βρίσκεται μέσα στον φλοιό και προσπίπτουν στην επιφάνεια Mohorovicic υπό γωνία μικρότερη της οριακής μπαίνουν μέσα στον μανδύα. Εκείνα από αυτά τα κύματα που διαδίδονται μέσα στον μανδύα και επιστρέφουν στην επιφάνεια της Γης χωρίς να μπουν μέσα στον πυρήνα λέγονται κύματα μανδύα. Τα απλούστερα κύματα μανδύα(επιμήκη P, εγκάρσια S) είναι αυτά που γεννιούνται σε εστία που βρίσκεται στον φλοιό, διαθλώνται στην ασυνέχεια Mohorovicic, διαδίδονται στο μανδύα και αφού διαθλαστούν πάλι στην ασυνέχεια Mohorovicic, φθάνουν στην επιφάνεια της Γης. Τα P κύματα εμφανίζονται μέχρι την απόσταση $\Delta=103^\circ$ (1° - 111.11 km). Παρατηρούνται όμως και κύματα P πέρα από την απόσταση αυτή που λέγονται κύματα περίθλασης(P' ή P_{diff}).

Τα PP, SS κύματα είναι κύματα που έχουν ανακλασθεί μία φορά στην επιφάνεια της Γης. Όταν υποστούν και δεύτερη ανάκλαση τότε παρατηρούνται τα PPP κύματα. Τα PSP και τα SPS είναι σύνθετα κύματα (το πρώτο σύμβολο δείχνει το είδος του κύματος που αναχωρεί από την εστία και το τελευταίο σύμβολο το είδος του κύματος που φθάνει στην επιφάνεια της Γης).

Σε κύμα που, αφού υποστεί ανάκλαση στην εξωτερική επιφάνεια του πυρήνα φθάνει στην επιφάνεια της Γης παρεμβάλλεται το σύμβολο c μεταξύ των κλάδων του πριν και μετά την ανάκλαση (π.χ. PcP, ScS, PcS).

Τέλος, στα σειсмоγράμματα των σεισμών βάθους, δηλαδή των σεισμών που οι εστίες τους βρίσκονται σε βάθος μεγαλύτερο των 60 km, παρατηρήθηκαν απλά και σύνθετα κύματα, των οποίων το σημείο ανάκλασης βρίσκεται στην επιφάνεια και κοντά στο επίκεντρο. Τα κύματα αυτά παριστάνονται με τα σύμβολα pP, sS, pS, sP.

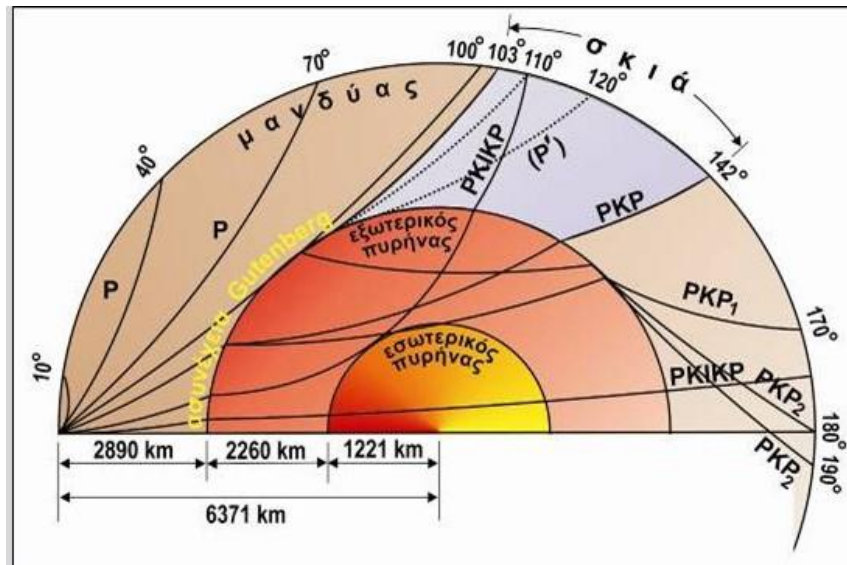


Εικόνα 16. (Διάδοση κυμάτων χώρου στον μανδύα)

- Διάδοση των κυμάτων χώρου στον πυρήνα

Ο πυρήνας της Γης αρχίζει από την επιφάνεια Gutenberg(2890 km) και φθάνει μέχρι το κέντρο της Γης(6371 km). Αυτός διακρίνεται στον εξωτερικό πυρήνα, ο οποίος βρίσκεται σε υγρή κατάσταση και στο εσωτερικό πυρήνα, ο οποίος βρίσκεται σε στερεά κατάσταση. Σήμερα πιστεύεται ότι ο πυρήνας αποτελείται κατά κύριο λόγο από σίδηρο με ελαφρά στοιχεία (οξυγόνο, θείο) σε ποσοστό 8-10%. Στον υγρό εξωτερικό πυρήνα (2890-5150 km) δεν διαδίδονται εγκάρσια κύματα ενώ η ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων αυξάνεται ομαλά με το βάθος. Αντίθετα, στον στερεό εσωτερικό πυρήνα (5150-6371 km) διαδίδονται επιμήκη και εγκάρσια κύματα. Η ταχύτητα τόσο των επιμήκων όσο και των εγκάρσιων κυμάτων διατηρείται σχεδόν σταθερή.

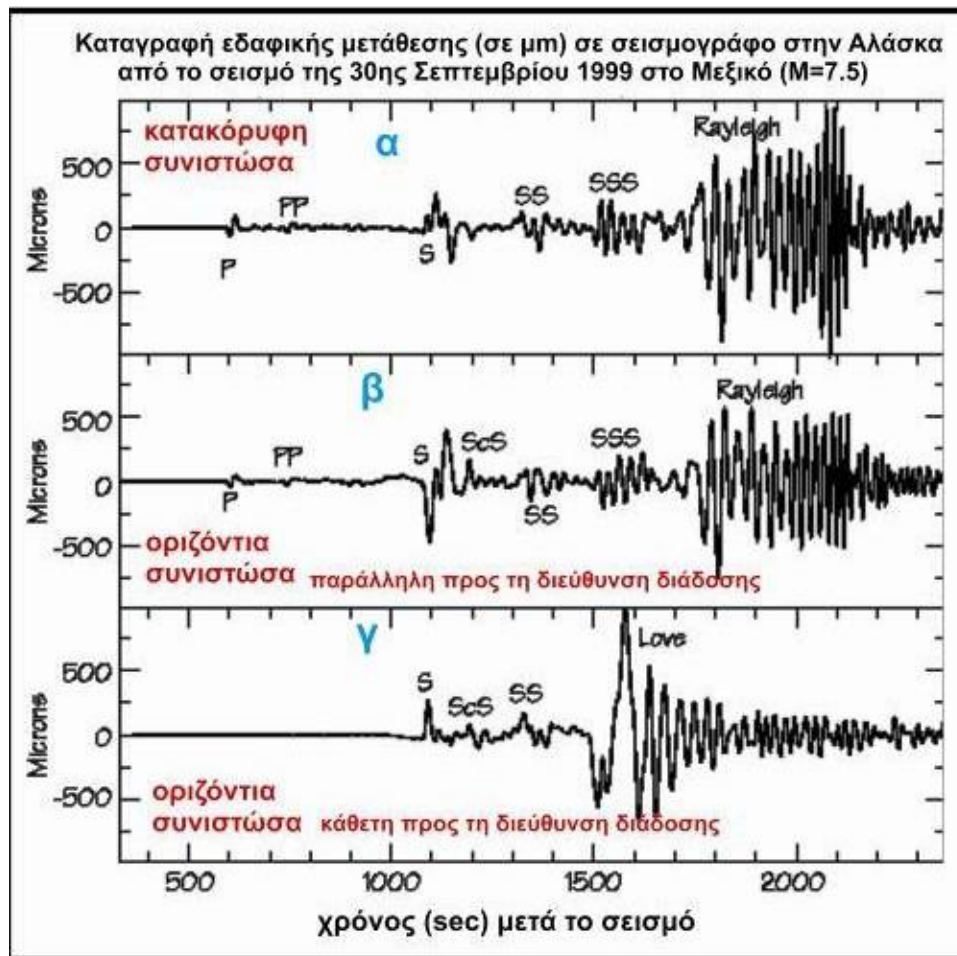
Ο κλάδος της τροχιάς ενός επιμήκους κύματος που βρίσκεται μέσα στον εξωτερικό πυρήνα παριστάνεται με το γράμμα K, που παρεμβάλλεται μεταξύ των συμβόλων του αρχικού και του τελικού κλάδου της σεισμικής ακτίνας. Για παράδειγμα το SKP αντιστοιχεί σε κύμα που από την εστία διαδίδεται ως εγκάρσιο μέσα στον μανδύα, ως επίμηκες κύμα στον εξωτερικό πυρήνα και κατόπιν επιστρέφει στον μανδύα και μέχρις ότου φθάσει στην επιφάνεια της Γης, διαδίδεται μέσα σε αυτόν ως επίμηκες κύμα. Ο κλάδος της σεισμικής ακτίνας του επιμήκους κύματος που βρίσκεται μέσα στον εσωτερικό πυρήνα παριστάνεται με το γράμμα I, ενώ ο κλάδος της τροχιάς του εγκάρσιου κύματος που βρίσκεται μέσα στον εσωτερικό πυρήνα παριστάνεται με το γράμμα J.



Εικόνα 17. (Διάδοση κυμάτων χώρου στο εσωτερικό της γης)

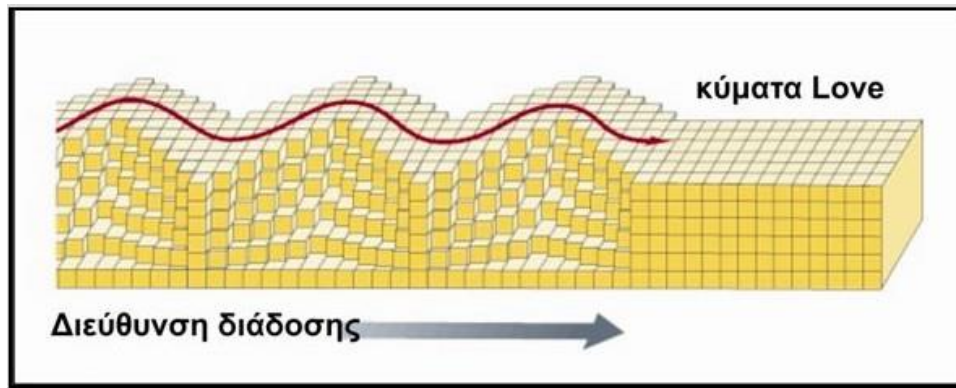
- [Επιφανειακά κύματα και διάδοση αυτών στην Γη](#)

Από τα επιφανειακά κύματα μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την Σεισμολογία παρουσιάζουν τα κύματα Rayleigh και Love. Τα δύο είδη των κυμάτων αυτών παθαίνουν σκέδαση, δηλαδή η ταχύτητα διάδοσης τους εξαρτάται από την περίοδο. Η σκέδαση τους είναι συνήθως κανονική, δηλαδή η ταχύτητα αυξάνεται όσο αυξάνεται η περίοδος. Η διάδοση των επιφανειακών κυμάτων μικρής περιόδου επηρεάζεται κυρίως από τις ιδιότητες του φλοιού, ενώ η διάδοση κυμάτων μεγάλης περιόδου επηρεάζεται από τις ιδιότητες του πάνω μανδύα.



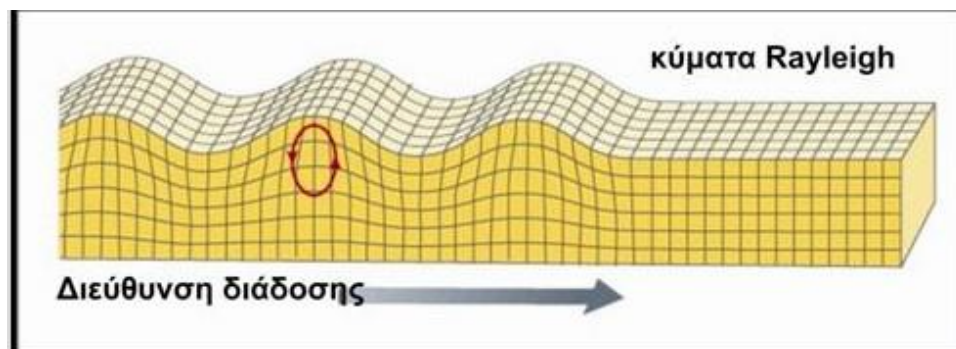
Εικόνα 18. (Σεισμόγραμμα σε επικεντρική απόσταση 110° στο οποίο φαίνονται οι καταγραφές των κυμάτων Rayleigh, Love (Stein and Wysession2003)

Κατά την διάδοση των κυμάτων Love, τα υλικά σημεία πραγματοποιούν ταλαντώσεις σε ευθείες παράλληλες προς το οριζόντιο επίπεδο και κάθετες προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τα κύματα αυτά είναι κύματα οριζοντίως πολωμένα και για το λόγο αυτό καταγράφονται μόνο από τα οριζόντια σεισμόμετρα. Οι περίοδοι των κυμάτων Love κυμαίνονται μεταξύ 8 και 140 sec συνήθως. Τα μεγάλης περιόδου κύματα έχουν σχετικώς μεγάλη μέση ταχύτητα (4.5 km/sec) επειδή κατά τη διάδοση τους επηρεάζονται από τη δομή του πάνω μανδύα και των βαθύτερων στρωμάτων του φλοιού. Τα κύματα αυτά παριστάνονται με το LQ και γράφονται αμέσως μετά τα εγκάρσια κύματα από τα μεγάλης περιόδου οριζόντια σεισμόμετρα. Τα κύματα Love δεν διαδίδονται σε ομογενές μέσο.



Εικόνα 19. (Διάδοση κυμάτων Love)

Στην διάδοση των κυμάτων Rayleigh τα υλικά σημεία διαγράφουν ελλείψεις οι οποίες έχουν το μέγιστο άξονα κατακόρυφο και τον ελάχιστο κατά την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Το πλάτος ταλάντωσης των υλικών σημείων κατά την διάδοση των κυμάτων Rayleigh ελαττώνεται εκθετικά με το βάθος όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Κοντά στην επιφάνεια της Γης η φορά κίνησης του υλικού σημείου πάνω στην ελλειπτική τροχιά του είναι τέτοια ώστε αυτή να συμπίπτει με τη φορά διάδοσης του κύματος στο κατώτερο σημείο της τροχιάς. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων αυτών μέσα σε ομοιογενές μέσο είναι περίπου ίση με τα 9/10 της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων και για αυτό αυτά καταγράφονται από τα κατακόρυφα και τα οριζόντια σεισμόμετρα αμέσως μετά τα εγκάρσια κύματα. Τα πλάτη στα κατακόρυφα σεισμόμετρα είναι όπως αναμένεται μεγαλύτερα από τα πλάτη στα οριζόντια σεισμόμετρα. Τα μεγάλης περιόδου κύματα των οποίων η διάδοση επηρεάζεται από την δομή του πάνω μανδύα και των βαθύτερων στρωμάτων του φλοιού, παριστάνονται με το LR και έχουν μέση ταχύτητα περίπου 4.0 km/sec.



Εικόνα 20. (Διάδοση κυμάτων Rayleigh)

Μια ειδικότερη κατηγορία κυμάτων Rayleigh είναι τα κύματα περιστροφής. Αυτά τα καταγράφονται σε ένα σταθμό αφού διατρέξουν μερικές φορές το μέγιστο κύκλο της Γης που περνάει από το επίκεντρο και το σταθμό. Παριστάνεται με το R_i , $i=1,2,\dots,n$. Με το R_1 παριστάνεται το απ'ευθείας κύμα, με το R_2 το κύμα φθάνει στο σταθμό αφού πρώτα περάσει από τα αντιποδικά σημεία του σταθμού και του επικέντρου ενώ με το R_3 το κύμα που κάνει μία παραπάνω περιστροφή από το R_1 κλπ. Οι περίοδοι των

κυμάτων περιστροφής κυμαίνονται μεταξύ 70 sec και 10 min. Υπάρχουν αναγραφές τέτοιων κυμάτων που διέτρεξαν τη Γη περισσότερο από 15 φορές.

- Ελεύθερη Ταλάντωση της Γης

Οι ελεύθερες ταλαντώσεις είναι στάσιμα κύματα που μπορούν να θεωρηθούν ως συνέπεια συμβολής αντίθετα διαδιδόμενων επιφανειακών κυμάτων και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις σφαιροειδείς ταλαντώσεις και τις στροφικές ταλαντώσεις.

Οι σφαιροειδείς ταλαντώσεις μπορούν να θεωρηθούν ότι παράγονται κατά την συμβολή αντίθετα διαδιδόμενων μακράς περιόδου κυμάτων Rayleigh και παριστάνονται με το σύμβολο ${}_nS_k$. Από την άλλη πλευρά, οι στροφικές ταλαντώσεις μπορούν να θεωρηθούν ότι παράγονται κατά την συμβολή αντίθετα διαδιδόμενων μακράς περιόδου κυμάτων Love και παριστάνονται με το σύμβολο ${}_nT_k$. Και στις δύο περιπτώσεις, τα n και k είναι ακέραιοι ή ίσοι με μηδέν αριθμοί που καθορίζουν τους αρμονικούς.

- ✓ Ο αριθμός k αποτελεί μέτρο του αριθμού των περιφερειών της σφαίρας της Γης, οι οποίες είναι παράλληλες προς ορισμένο μέγιστο κύκλο (ισημερινό) και που τα σημεία τους είναι κόμβοι, δηλαδή δεν υφίστανται μετάθεση κατά την ταλάντωση. Στην περίπτωση σφαιροειδούς ταλάντωσης, ο k παριστάνει τον αριθμό των περιφερειών μηδενικού πλάτους ταλάντωσης ενώ στην περίπτωση στροφικής ταλάντωσης, ο αριθμός των περιφερειών μηδενικού πλάτους είναι ίσος προς $k-1$.
- ✓ Ο αριθμός n παριστάνει τον αριθμό των σφαιρικών επιφανειών που είναι συγκεντρικές της επιφάνειας της Γης και τα σημεία τους αποτελούν κόμβους.

Οι ελεύθερες ταλαντώσεις της γης είναι δύο ειδών, οι σφαιροειδής ταλαντώσεις και οι στροφικές ταλαντώσεις. Παρακάτω δίνονται στοιχεία που βοηθούν στην αναγνώριση και τον διαχωρισμό αυτών των ταλαντώσεων.

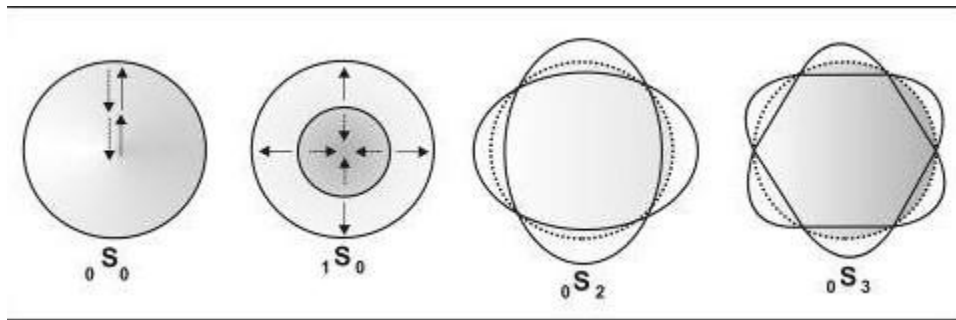
→ Σφαιροειδής ταλάντωση

Με το ${}_0S_0$ παριστάνεται η θεμελιώδης ταλάντωση κατά την οποία η Γη πραγματοποιεί συστολές και διαστολές χωρίς να μεταβάλλεται το σχήμα αυτής.

Το ${}_1S_0$ παριστάνει την ταλάντωση κατά την οποία υπάρχει μέσα στη Γη μηδενική επιφάνεια. Το περικλειόμενο από τη μηδενική επιφάνεια τμήμα της Γης εκτελεί δική του ταλάντωση, που είναι ακτινική συστολή και διαστολή. Τέτοια ταλάντωση πραγματοποιεί και το τμήμα της Γης που βρίσκεται έξω από τη μηδενική επιφάνεια.

Με το ${}_0S_2$ παριστάνεται η ταλάντωση που ονομάζεται <<ταλάντωση σφαίρας ράκμπυ>>, γιατί κατά αυτήν η Γη επιμηκύνεται διαδοχικά κατά τις διευθύνσεις δύο κάθετων διαμέτρων. Η ταλάντωση αυτή έχει τη μεγαλύτερη περίοδο από όλες τις ταλαντώσεις της Γης ($T=54$ min).

Το ${}_0S_3$ παριστάνει ταλάντωση κατά την οποία το πλάτος γίνεται συγχρόνως μέγιστο κατά τρεις διευθύνσεις, που σχηματίζουν γωνίες 120 μοιρών μεταξύ τους ή κατά τις τρεις διχοτόμους των γωνιών αυτών, εναλλασσόμενα.



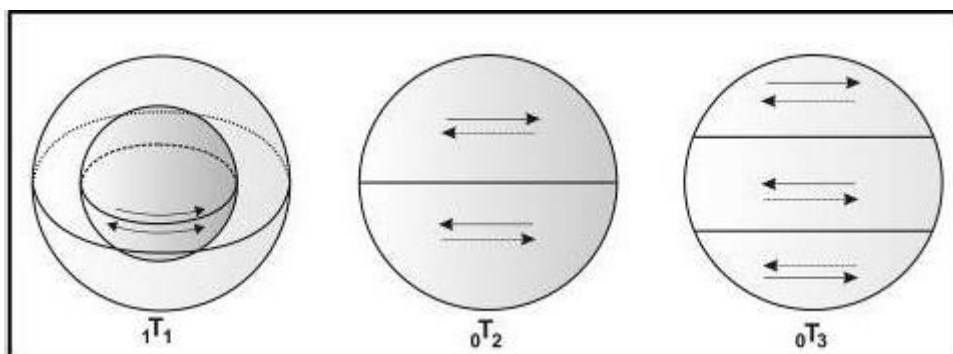
Εικόνα 21. (Σφαιροειδής ταλαντώσεις)

→ Στροφικές ταλαντώσεις

Το ${}_1T_1$ παριστάνει στροφική ταλάντωση κατά την οποία υπάρχει μηδενική σφαιρική επιφάνεια ομόκεντρη της επιφάνειας της Γης, της οποίας η ακτίνα r δίνεται σε συνάρτηση με τη γήινη ακτίνα, R , από την σχέση $r=0.7796 \cdot R$. Κατά την ταλάντωση αυτή, το μέρος της Γης η που βρίσκεται στο εσωτερικό της μηδενικής επιφάνειας εκτελεί περιστροφική ταλάντωση γύρω από ορισμένη διάμετρο, ενώ το μέρος της Γης που βρίσκεται στο εξωτερικό της επιφάνειας αυτής εκτελεί όμοια ταλάντωση αλλά αντίθετης φοράς.

Με το ${}_0T_2$ παριστάνεται ταλάντωση κατά την οποία δύο ημισφαίρια, στα οποία διαιρείται η Γη από ένα μέγιστο κύκλο, ταλαντώνονται κατά αντίθετες φορές γύρω από τη διάμετρο που περνάει από τους πόλους αυτών.

Κατά την ταλάντωση ${}_0T_3$ η Γη χωρίζεται με δύο μηδενικούς παράλληλους κύκλους σε τρεις σφαιρικές ζώνες. Οι ζώνες αυτές πραγματοποιούν στροφικές ταλαντώσεις γύρω από τον άξονα συμμετρίας τους.



Εικόνα 22. (Στροφικές ταλαντώσεις)

- [Μεταβολή των πλατών των σεισμικών κυμάτων κατά τη διάδοση τους στη Γη](#)

Η μεταβολή των πλατών των σεισμικών κυμάτων κατά τη διάδοση στο εσωτερικό της Γης εξαρτάται από τις ιδιότητες του μέσου διάδοσης. Εδώ παρουσιάζονται τρεις τέτοιες περιπτώσεις με ιδιαίτερο ενδιαφέρον:

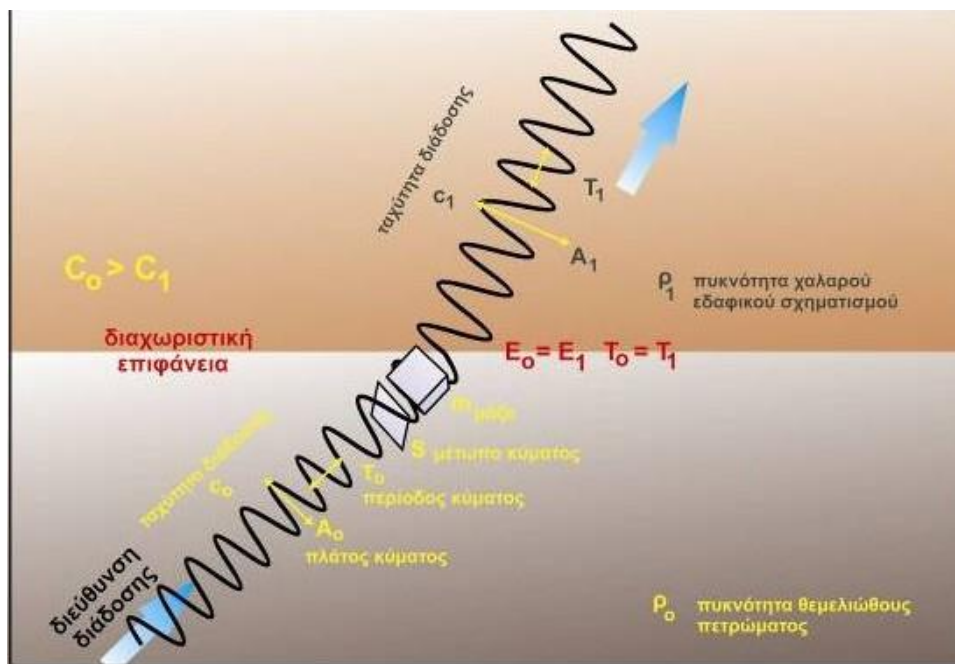
- ✓ Τη περίπτωση που το μέσο είναι ελαστικό.
 - ✓ Τη περίπτωση που το μέσο είναι ανελαστικό.
 - ✓ Τη περίπτωση που το μέσο είναι ανελαστικό και ανομοιογενές.
- Ελαστικό μέσο

Στη περίπτωση που το μέσο διάδοσης των σεισμικών κυμάτων είναι τελείως ελαστικό, η μεταβολή του πλάτους ενδέχεται να οφείλεται στην πρόσπτωση του κύματος στη διαχωριστική επιφάνεια δύο ελαστικών μέσων με διαφορετικές ιδιότητες ή σε γεωμετρική εξάπλωση του κύματος.

Όσον αφορά την γεωμετρική εξάπλωση (geometrical spreading) των κυμάτων, αυτή έχει ως συνέπεια την ελάττωση την πλατών των κυμάτων με την απόσταση r από την εστία τους, γιατί όσο απομακρύνονται από την εστία τόσο μεγαλύτερο εμβαδόν επιφάνειας διαπερνούν τα ίδια κύματα. Έχει δειχθεί ότι για μικρές σχετικά αποστάσεις τα πλάτη των κυμάτων χώρου στη Γη μεταβάλλονται ανάλογα του $1/r^2$ (κοντινό πεδίο) ενώ για μεγάλες αποστάσεις ανάλογα του $1/r$ (μακρινό πεδίο).

Κατά τη διάδοση των των επιφανειακών κυμάτων στην επιφάνεια μίας σφαίρας με ακτίνα a , τα πλάτη ελαττώνονται ανάλογα του $(a^* \eta \Delta)^{1/2}$ όπου Δ είναι η επικεντρική απόσταση σε ακτίνια.

Κατά την διάδοση των σεισμικών κυμάτων σε ένα τελείως ελαστικό μέσο δεν υφίστανται αυτά απώλεια της ενέργειας τους και για αυτό τα κύματα εξακολουθούν να υπάρχουν και να διαδίδονται για πάντα στο μέσο αυτό.



Εικόνα 23. (Ελαστικό μέσο)

→ Ανελαστικό μέσο

Σε ανελαστικό μέσο, τα πλάτη των κυμάτων ελαττώνονται ανάλογα με τη ποσότητα $\exp((- \zeta^* \omega^* r)/u)$ όπου ζ είναι ο παράγοντας τριβής και $\omega (= 2\pi/T)$ είναι η κυκλική

συχνότητα του κύματος. Αυτή η μείωση των πλατών των κυμάτων ονομάζεται εγγενής απόσβεση (intrinsic attenuation) και οφείλεται σε απώλεια ενέργειας που προκαλείται από ανελαστική φυσική διαδικασία και εσωτερική τριβή στο μέσο διάδοσης του.

Αν A_0 είναι το αρχικό πλάτος του κύματος, το πλάτος του A σε μεγάλη απόσταση r θα δίνεται από την παρακάτω σχέση, αν ληφθεί υπόψη τόσο η γεωμετρική εξάπλωση όσο και την απόσβεση:

$$A = (A_0 \cdot \exp[-2\pi \zeta r / T \cdot u]) / r$$

Δηλαδή όσο μικρότερη είναι η περίοδος του κύματος, τόσο εντονότερη είναι η απόσβεση του με την απόσταση.

Ο παράγοντας ποιότητας Q είναι μία αδιάστατη ποσότητα που παριστάνει την απώλεια ενέργειας παραμόρφωσης $-\Delta E$, ανά κύκλο. Ο τύπος που εκφράζεται συναρτήσει της ποιότητας είναι ο εξής:

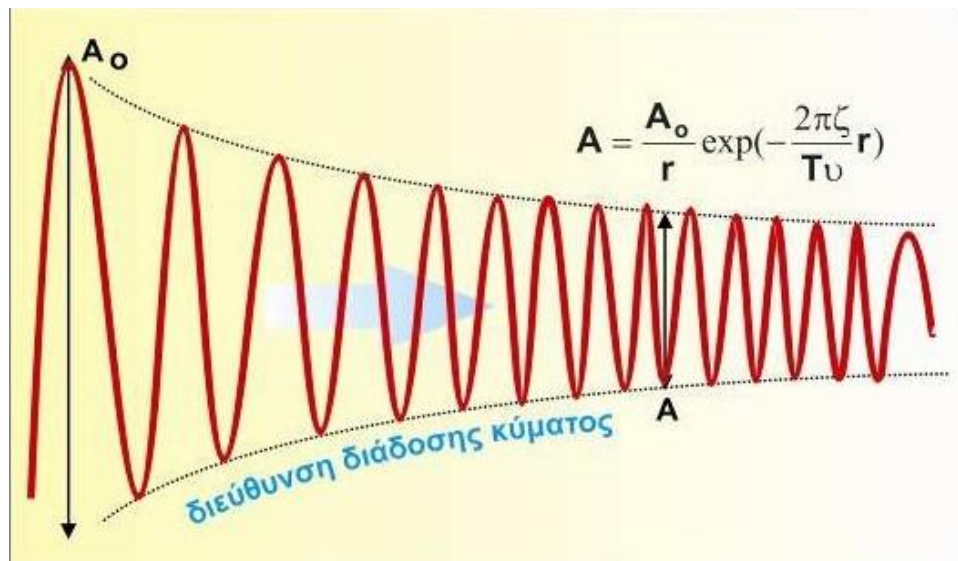
$$1/Q = (-\Delta E) / 2\pi E$$

όπου ποσότητα E είναι η μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης.

Ο παράγοντας ποιότητας παριστάνει την απόσβεση της κίνησης ενός σημείου κατά τη διάρκεια μίας περιόδου (Q_t) ή την απόσβεση της κίνησης σε ορισμένο χρονικό κατά μήκος μίας απόστασης ενός μήκους κύματος (Q_s). Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν για τιμές του $Q \gg 1$.

Το Q είναι περίπου ανεξάρτητο της συχνότητας των κυμάτων για συχνότητες μικρότερες του 1 Hz, ενώ για μεγαλύτερες συχνότητες αυξάνεται γενικά με τη συχνότητα.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα εγκάρσια κύματα αποσβένονται εντονότερα από τα επιμήκη κύματα ($Q_a > Q_b$). Ακόμα, για το μεγαλύτερο τμήμα του φλοιού και για τον μανδύα όπου τα υλικά έχουν πολυκρυσταλλική δομή υπάρχει αναλογική επίδραση στην απόσβεση των $P(Q_a)$ και $S(Q_b)$ κυμάτων. Τέλος, σημαντικό ρόλοίζει και το ότι κατά την διάδοση των σεισμικών κυμάτων σε ανελαστικό μέσο υπάρχει απώλεια ενέργειας παραμόρφωσης, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω της εσωτερικής τριβής στο μέσο διάδοσης.

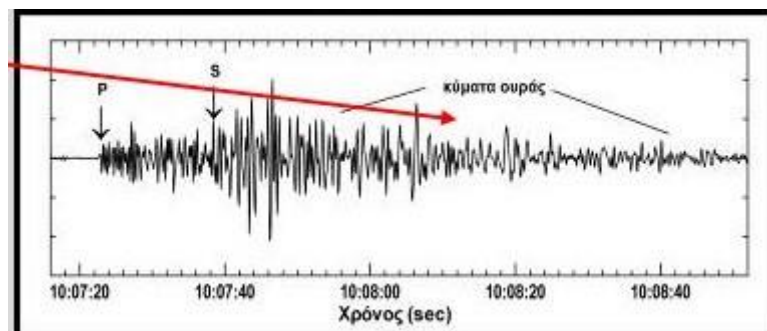


Εικόνα 24. (Μεταβολή πλάτων σε ανελαστικό μέσο)

→ Ανελαστικό και ανομοιογενές μέσο

Η μεταβολή των πλάτων των κυμάτων που διαδίδονται σε ανελαστικό και ανομοιογενές μέσο οφείλεται σε ανελαστική απόσβεση και σε διασπορά (scattering), η οποία προκαλείται από μικρής κλίμακας ανομοιογένειες του δρόμου διάδοσης.

Σε τέτοιες μεταβολές πλάτων οφείλεται η γένεση των κυμάτων ουράς (coda waves) τα οποία εμφανίζονται στα σειсмоγράμματα τοπικών σεισμών μετά τη φάση Lg ή τα S κύματα. Τα κύματα ουράς είναι αποτέλεσμα διαφόρων ανακλάσεων, διαθλάσεων, περιθλάσεων και μετατροπών του είδους του κύματος.



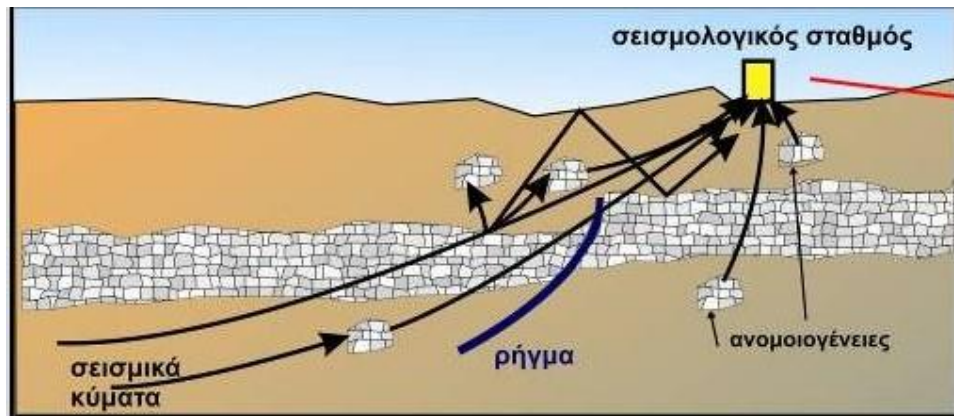
Εικόνα 25. (Ανελαστικό και ανομοιογενές μέσο)

Η μεταβολή (ελάττωση) των πλάτων των κυμάτων ουράς οφείλεται τόσο στην ανελαστικότητα όσο και στην ετερογένεια του μέσου. Για το λόγο αυτό, ο παράγοντας ποιότητας, Q_c , για τα κύματα ουράς εξαρτάται τόσο από τον παράγοντα εγγενούς απόσβεσης Q_i όσο και από τον παράγοντα διασποράς Q_s και είναι ίσος με:

$$1/Q_c = 1/Q_i + 1/Q_s$$

Ο παράγοντας Q_c είναι περίπου ίσος με τον παράγοντα ποιότητας των εγκάρσιων

κυμάτων $Q\beta$, που δείχνει ότι τα κύματα ουράς αποτελούνται κατά κύριο λόγο από εγκάρσια κύματα. Η διασπορά των κυμάτων συμβάλλει στην εκθετική ελάττωση των πλατών των κυμάτων, αλλά δεν συνοδεύεται από απώλεια ενέργειας, όπως συμβαίνει με την εγγενή απόσβεση όπου ο παράγοντας απόσβεσης, Q_i , αποτελεί μέτρο της απώλειας αυτής. Έτσι, ο παράγοντας διασποράς, Q_s , αποτελεί μέτρο της αναδιανομής της ενέργειας των κυμάτων.



Εικόνα 26. (Κύματα ουράς)

- [Επιταχυνσιογράφος-Σεισμογράφος](#)

→ Ορισμός και μέρη λειτουργίας σεισμογράφου

Οι σεισμογράφοι είναι όργανα με τα οποία γίνεται αυτόματη και, κατά το δυνατόν, πιστή αναγραφή της σεισμικής κίνησης. Η αναγραφή αυτή, που λέγεται σεισμόγραμμα, γίνεται σε μαγνητική ταινία, με γραφίδα πάνω σε αιθαλωμένη(καπνισμένη) ταινία ή σε θερμογραφικό χαρτί, με φωτεινή κηλίδα πάνω σε φωτογραφική ταινία ή ψηφιακά στη μνήμη Η/Υ.

Ένας σεισμογράφος αποτελείται από το εκκρεμές, το σύστημα ενίσχυσης (ή μεγέθυνσης), το σύστημα αναγραφής, το σύστημα απόσβεσης της ελεύθερης ταλάντωσης του εκκρεμούς και το σύστημα ψηφιοποίησης των σεισμογραμμάτων (οι ψηφιακοί σεισμογράφοι).

→ Τρόπος λειτουργίας σεισμογράφου

Το άκρο της γραφίδας το οποίο δε γράφει, συνδέεται με τη μάζα εκκρεμούς, η οποία βρίσκεται σε ασθενή σύνδεση με το έδαφος (Σ). Λόγω της τέτοιας σύνδεσης, η μάζα αυτή πραγματοποιεί, κατά το χρόνο της εδαφικής δόνησης, σχετική κίνηση ως προς το έδαφος και η γραφίδα γράφει την κίνηση αυτή, υπό μεγέθυνση, πάνω σε ταινία. Το εκκρεμές είναι το μέρος του σεισμογράφου που αποκρίνεται άμεσα στην εδαφική κίνηση. Η κίνηση του εκκρεμούς εξαρτάται όχι μόνο από το πλάτος της εδαφικής κίνησης αλλά και από το λόγο της περιόδου της εδαφικής κίνησης προς την ιδιοπερίοδο του εκκρεμούς. Ακόμα, η γραφίδα συνδέεται με τη μάζα του εκκρεμούς με σύστημα μοχλών, που μεγεθύνουν την κίνησή του κατά σταθερό

παράγοντα, ο οποίος λέγεται στατική μεγέθυνση. Οι μοχλοί αυτοί(ή κάποιο άλλο σύστημα ενίσχυσης) αποτελούν το σύστημα ενίσχυσης του σειсмоγράφου.

→ Περιστροφή κυλίνδρου αναγραφής

Για να είναι δυνατή η διάκριση των αναγραφώντων διαφόρων σεισμικών κυμάτων, η ταινία αναγραφής τυλίγεται σε κύλινδρο, ο οποίος περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ενώ συγχρόνως μετακινείται κατά τη διεύθυνση του άξονά του. Όταν δεν κινείται το έδαφος, η γραφίδα γράφει στο χαρτί γραμμή που έχει τη μορφή σπείρας, η οποία αποτελεί το γεωμετρικό τόπο των θέσεων ηρεμίας του άκρου της γραφίδας.

Η ταχύτητα περιστροφής του κυλίνδρου είναι συνήθως τέτοια, ώστε το άκρο της γραφίδας να κινείται πάνω στον κύλινδρο με ταχύτητα που κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 15 και 60 mm/min. Όταν γίνεται σεισμός, το άκρο της γραφίδας εκτελεί κίνηση κάθετη στη γραμμή ηρεμίας του και γράφει πάνω στην ταινία το σεισμόγραμμα.

Η εδαφική μετάθεση σε ένα σημείο αναλύεται σε τρεις συνιστώσες κάθετες μεταξύ τους (διάνυσμα της μετάθεσης).

Συνεπώς, για τον πλήρη καθορισμό της μετάθεσης σε ένα σταθμό, πρέπει να υπάρχουν τρεις σειсмоγράφοι.

Ο ένας από τους σειсмоγράφους αυτούς γράφει την κατακόρυφη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης και ονομάζεται «κατακόρυφος» σειсмоγράφος (Z).

Οι άλλοι δύο γράφουν τις δύο οριζόντιες συνιστώσες και ονομάζονται «οριζόντιοι» σειсмоγράφοι.

Ο ένας από τους οριζόντιους σειсмоγράφους γράφει την οριζόντια κίνηση κατά τη διεύθυνση Βορρά-Νότου (NS) και ο άλλος την οριζόντια κίνηση κατά τη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης (EW).



Εικόνα 23. (Σχηματική απεικόνιση σεισμομέτρου με συσκευή απόσβεσης)

→ Επιταχυνσιογράφοι

Οι **επιταχυνσιογράφοι** αποτελούν ειδική κατηγορία σεισμομέτρων. Τα σεισμογράμματα των οργάνων αυτών δίνουν τη σεισμική επιτάχυνση σε συνάρτηση με τον χρόνο. Χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά από την Τεχνική Σεισμολογία. Τοποθετούνται συνήθως μέσα στα κτίρια για την μέτρηση της επιτάχυνσης κατά την γένεση των σεισμών. Δεν βρίσκονται σε συνεχή λειτουργία, όπως συμβαίνει με τα άλλα σεισμόμετρα, αλλά μπαίνουν σε λειτουργία με κατάλληλη διέγερση στην αρχή του σεισμού και γράφουν την προκαλούμενη επιτάχυνση από το σεισμό. Ένας από τους πιο διαδεδομένους τύπους επιταχυνσιογράφων ήταν ο αναλογικός επιταχυνσιογράφος SMA-1, στον οποίο η καταγραφή της δόνησης γίνεται σε φωτογραφικό φιλμ. Ο επιταχυνσιογράφος αυτός σταδιακά αντικαθίσταται από ψηφιακούς σύγχρονους επιταχυνσιογράφους.



Εικόνα 24. (Επιταχυνσιογράφος SMA-1)

• Κλίμακα Ρίχτερ

Η Κλίμακα Ρίχτερ είναι διαδεδομένη λογαριθμική κλίμακα μέτρησης της ενέργειας που εκλύεται κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Η κλίμακα Ρίχτερ αναπτύχθηκε το 1935, στην Νότια Καλιφόρνια των ΗΠΑ από τον Αμερικανό φυσικό και σεισμολόγο Τσαρλς Ρίχτερ (Charles Francis Richter) και τον Γερμανό Μπένο Γκούτενμπεργκ.

→ Βασικές αρχές

Η κλίμακα Ρίχτερ είναι λογαριθμική. Αύξηση του μεγέθους του σεισμού κατά μία ακέραια μονάδα της κλίμακας αντιπροσωπεύει δεκαπλασιασμό του πλάτους των δονήσεων που καταγράφονται από ένα σειсмоγράφο Wood-Anderson και 31,5 φορές μεγαλύτερη έκλυση ενέργειας, ενώ αύξηση 2 βαθμών αντιπροσωπεύει 1.000 φορές μεγαλύτερη έκλυση ενέργειας.

Ως «βαθμός 0» επελέγη συμβατικά η ασθενέστερη δόνηση που μπορούσε να καταγραφεί την εποχή που καθιερώθηκε η κλίμακα. Οι σύγχρονοι σειсмоγράφοι καταγράφουν και ασθενέστερες δονήσεις από εκείνες που αρχικά είχαν επιλεγεί για να ορίσουν το «0» (οι οποίες ορίζονται με αρνητικές τιμές). Πρακτικώς, η ασθενέστερη δόνηση που μπορεί να υπάρξει είναι - 2,0 Ρίχτερ, που ισοδυναμεί με το σπάσιμο μίας πέτρας.

Μία εμπειρική αντίληψη του βαθμού «1» της κλίμακας είναι η δόνηση που παράγεται από τη διέλευση ενός τρένου ή ενός ερπυστριοφόρου άρματος με μέση ταχύτητα σε άσφαλτο, ενώ βαθμός «2» είναι η δόνηση που αντιλαμβάνονται οι θεατές παρέλασης από διέλευση ίλης αρμάτων.

Παρά τα παραπάνω, στη σύγχρονη πρακτική χρησιμοποιείται ένα πιο σωστά θεμελιωμένο μέτρο για το μέγεθος του σεισμού, η «σεισμική ροπή», η οποία παρέχει πολύ πιο ομοιόμορφη κλίμακα για το σεισμικό γεγονός.

Κλίμακα Ρίχτερ	
< 0 R Μικροσεισμός	6,0 - 6,9 R Ισχυρός
0 - 0,9 R Μικροσεισμός	7,0 - 7,9 R Καταστροφικός
1,0 - 1,9 R Μικροσεισμός	8,0 - 8,9 R Εξαιρετικά Καταστροφικός
2,0 - 2,9 R Ασήμαντος	9,0 - 9,9 R Ασύλληπτα Καταστροφικός
3,0 - 3,9 R Πολύ Ασθενής	
4,0 - 4,9 R Ασθενής	
5,0 - 5,9 R Μέτριος	≥ 10,0 R Παγκόσμιος

Εικόνα 25. (Κλίμακα Ρίχτερ)

- Οι σεισμοί στην ιστορία της γης
- Ρήγμα Αγ. Ανδρέα, Καλιφόρνια, ΗΠΑ

Το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα είναι ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης ή ρήγμα μετασχηματισμού και φέρνει σε πλευρική κίνηση την λιθοσφαιρική πλάκα Ειρηνικού με αυτή Βόρειας Αμερικής. Αρχικά, η σχετική μετατόπιση του ρήγματος γίνεται με ταχύτητα 46 mm/yr (46 mm τον χρόνο). Ακόμα, στα ευθύγραμμα τμήματα του ρήγματος οι δυο πλάκες (τεμάχια) κινούνται σχετικά πιο «ελεύθερα». Το ρήγμα δεν είναι ευθύ σε όλο του το μήκος αλλά κάμπτεται, οι θέσεις κάμψης παρεμποδίζουν την «ελεύθερη» οριζόντια ολίσθηση και «κλειδώνουν» το ρήγμα με αποτέλεσμα την συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων ελαστικής ενέργειας σε εκείνες τις θέσεις. Οι «κλειδωμένες» θέσεις είναι υποψήφιες για την εκδήλωση μεγάλων σεισμών στο παρόν αλλά και στο μέλλον. Όταν αυτές οι θέσεις «ξεκλειδώσουν» τότε τεράστια ποσά συσσωρευμένης ενέργειας αποδεσμεύονται και εκδηλώνονται μεγάλοι σεισμοί. Αντίθετα, οι «μη-κλειδωμένες» θέσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη σεισμική δραστηριότητα, έτσι, υπάρχει εκτόνωση ενέργειας από περισσότερους αλλά μικρότερους σεισμούς (creeping).

Το ρήγμα του Αγ. Ανδρέα έχει δώσει μεγάλους σεισμούς με κάποιους να είναι καταγεγραμμένοι από όργανα (μετά το 1900). Τον Απρίλιο του 1906 στο Σαν Φρανσίσκο συνέβη σεισμός 8.25 με αποτέλεσμα να μετακινηθεί τμήμα 15 km ρήγματος καθώς καταγράφηκαν μετατοπίσεις και δευτερογενείς διαρρήξεις σε απόσταση 200 km από το επίκεντρο. Η εκτιμώμενη απελευθερωμένη ενέργεια

υπολογίζεται περίπου ίση με 3.6×10^{20} joule. Επίσης, υπάρχουν και παλαιότεροι σεισμοί διαπιστωμένοι μέσα από γεωλογικές παρατηρήσεις. Οι γεωλόγοι μπορούν να αναγνωρίσουν σεισμικά γεγονότα βασιζόμενοι σε μετατοπίσεις πετρωμάτων γύρω από ρήγματα, να τα χρονολογήσουν αριθμητικά και να εκτιμήσουν το μέγεθος του αντίστοιχου σεισμού. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται παλαιοσεισμολογία και με την βοήθειά της ανακαλύφθηκαν μεγάλοι σεισμοί του ρήγματος του Αγ. Ανδρέα το 13ο, 12ο, 10ο αιώνα, αλλά και πολύ παλαιότερων γεωλογικών περιόδων. Άλλοι πιο πρόσφατοι μεγάλοι σεισμοί είναι οι παρακάτω:

1. Landers Earthquake 7.3 (1992)
2. Northridge earthquake 6.7 (1992)
3. Hector Mine earthquake 7.1 (1999)

→ Ρήγμα Ανατολίας

Το ρήγμα της Ανατολίας είναι παγκοσμίως γνωστό ρήγμα που επηρεάζει και την Ελλάδα. Το ρήγμα είναι οριζόντιας ολίσθησης με αφετηρία τη Αν. Τουρκία, αλλά συνεχίζει διαμέσου του Β. Αιγαίου έως τη Στερεά Ελλάδα. Επιπλέον, το συνολικό του μήκος είναι άνω των 1500 km ενώ η μετατόπισή του γίνεται με σχετική ταχύτητα 15 mm/yr. Ακόμα, η γεωλογική δομή και μηχανισμοί του ρήγματος είναι πολύ πιο σύνθετοι από το ρήγμα του Αγ. Ανδρέα. Επίσης, η συμπεριφορά του ρήγματος της Ανατολίας επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση 3 λιθοσφαιρικών πλακών στην περιοχή της Αν. Μεσογείου. Ειδικότερα, η κίνηση της αραβικής πλάκας (κατά μήκος ενός άλλου «ξακουστού» ρήγματος-της Νεκράς Θάλασσας-με την ευρωπαϊκή στην περιοχή του Καυκάσου αποκόπτει τον φλοιό της Τουρκίας (Ανατολίας) από την υπόλοιπη Ευρασία και τον καθιστά ανεξάρτητη λιθοσφαιρική πλάκα, τον συμπιέζει και τον εξωθεί σε κίνηση. Η κίνηση της Ανατολίας λαμβάνει χώρα κατά μήκος του ρήγματος της Ανατολίας.

Από το 1939 και μετά το ρήγμα της Ανατολίας βρίσκεται σε διέγερση. Έχουν παρατηρηθεί σεισμοί μεγαλύτεροι των 7 Ρίχτερ. Ο μεγαλύτερος σεισμός που έχει καταγραφεί ποτέ στην Ανατολία έλαβε χώρα το 1939 και είχε μέγεθος 7.8 Ρίχτερ. Τέλος, ο πιο πρόσφατος σεισμός συναίβη στη περιοχή του Izmit το 1999 και ήταν σεισμός που ξεπερνούσε τους 7,4 βαθμούς της κλίμακας Ρίχτερ. Στη διάρκεια αυτού του σεισμού δραστηριοποιήθηκαν πάνω από 100 km ρήγματος, ενώ είχε τραγικό απολογισμό με πάνω από 20,000 θανάτους.

➤ Βιβλιογραφικές-Διαδικτυακές Πηγές

- 1)Κυματική Φυσική για Μηχανικούς Ήχου και Ακουστικής, Νεκτάριος Παπαδογιάννης & Ευθύμιος Μπακαρέζος.
- 2)Γεωλογία- Θεμελιώδεις Έννοιες για Μηχανικούς, Θεοδώρα Ροντογιάννη-Τσιαμπάου.
- 3)Εισαγωγή στη Σεισμολογία, Β.Κ.Παπαζάχος & Γ.Φ.Καρακαίσης & Π.Μ.Χατζηδημητρίου

