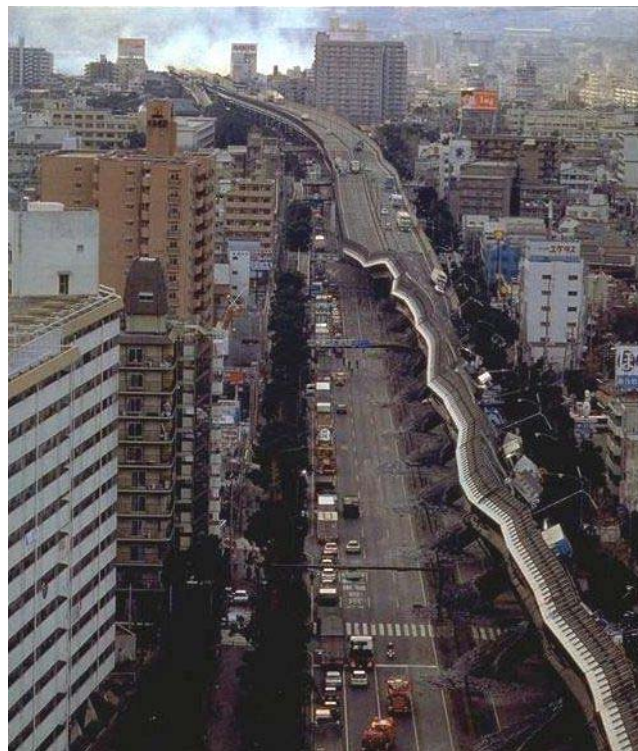




**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΑΘΗΝΑΣ (Τ.Ε.Ι.)**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**



**Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας**

**Επιστημονικός υπεύθυνος : Πνευματικός Νικόλαος**

# 1 Εισαγωγή

Σαν εισαγωγή παρουσιάζονται μερικές πληροφορίες για τη χρησιμότητα της Αντισεισμικής Μηχανικής και για τους ιστορικούς σεισμούς και τις συνέπειές τους και συνάγονται κάποια συμπεράσματα για τη σημερινή κατάσταση.

## 1.1 Η σημασία της Αντισεισμικής Μηχανικής

Σεισμοί, που θα προκαλούν αγωνία και θα κατατρομάζουν τους ανθρώπους, θα συμβαίνουν πάντοτε. Τα δομικά έργα και οι φέρουσες κατασκευές καταρρέουν, πολλές φορές μάλιστα θα θρηνούμε και πολλούς νεκρούς και τραυματίες. Οι μεγάλες υλικές ζημιές, και στο περιεχόμενο των κτιρίων και στις εγκαταστάσεις υποδομής, καθώς και οι έμμεσες δαπάνες από απώλειες παραγωγής και ενδεχόμενες βλάβες στο περιβάλλον επιβαρύνουν τις ανθρώπινες οικονομίες. Έτσι πρέπει να γίνεται; Η απάντηση είναι μια και μοναδική: όχι! Κι' αυτό γιατί η Τεχνική της ασφαλούς αντισεισμικής δόμησης είναι ένας πολύ ανεπτυγμένος κλάδος της Επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού στο θεωρητικό και στο κατασκευαστικό πεδίο. Προσπάθειες δεκαετιών σε έρευνα και πράξη κατέστησαν δυνατή τη σημαντική μείωση των θυμάτων και των ζημιών. Αποφασιστικής σημασίας όμως είναι και η περαιτέρω επεξεργασία των γνώσεων και της εμπειρίας, αλλά και η συστηματική εφαρμογή τους.

	<sup>M=6.9</sup> Αρμενία	<sup>M=7.1</sup> Loma Prieta Βόρεια Καλιφόρνια	<sup>M=6.0</sup> Αθήνα
Νεκροί	> 25'000	67	2:56 pm
Τραυματίες	31'000	2'435	
Άστεγοι	514'000	7'362	
Υλικές Ζημιές	άγνωστες	10·10 <sup>9</sup>	
	7-12-1988	Ελβ. Φράγκα 17-10-89	

Πίνακας 1.1: Στοιχεία για τα θύματα και τις ζημιές των σεισμών της Αρμενίας (μεγέθους 6.9, 7.12.1988) και της Βόρειας Καλιφόρνιας (μεγέθους 7.1, 17.10.1989)

Ο μακάβριος δυστυχώς απολογισμός των δυο συμβάντων δίνει την απόδειξη για την ανάγκη συνεχών και συστηματικών προσπαθειών. Πρόκειται για το σεισμό στο Spitak της Αρμενίας της 7ης Δεκεμβρίου του 1988 με μέγεθος  $M=6.9$  και το σεισμό της Loma Prieta στην Καλιφόρνια της 17ης Οκτωβρίου 1989 με μέγεθος  $M=7.1$ . Οι δυο σεισμοί αυτοί είχαν άρα την ίδια περίπου ένταση. Και οι συνθήκες όμως μορφολογίας του εδάφους (πεδιάδες/βουνά), οικιστικής ανάπτυξης (χωριά/ πόλεις) και η πληθυσμιακή πυκνότητα στις πληγείσες περιοχές είναι - χονδρικά - αντίστοιχες. Εξάλλου, και στις δυο περιοχές υπήρχε ένα σημαντικό ποσοστό δομικών έργων που είχε γίνει τις τελευταίες δεκαετίες. Στον Πίνακα

### 1.3 Συνέπειες των σεισμών

Οι σεισμοί προκαλούν ανθρώπινα θύματα και υλικές ζημιές με δυο κυρίως τρόπους:

#### 1. Άμεσες συνέπειες:

Μέσω των άμεσων συνεπειών της κίνησης του εδάφους στα δομικά έργα καθώς και τις εγκαταστάσεις και τον εξοπλισμό, προκύπτουν ζημιές και ενδεχομένως καταρρεύσεις.

#### 2. Έμμεσες συνέπειες:

Σαν αποτέλεσμα των άμεσων συνεπειών δημιουργούνται πυρκαγιές, εκρήξεις, πλημμύρες, μολύνσεις από αέρια που ξεχύνονται, βλάβες στο περιβάλλον, οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες.

Συνήθως, στο προσκήνιο βρίσκονται οι άμεσες συνέπειες (Σχήματα 1.4 έως 1.5). Σε περιπτώσεις ιδίως μεγάλων συγκεντρώσεων πληθυσμού (πόλεις) και περιορισμένης ετοιμότητας για την αντιμετώπιση καταστροφών, οι έμμεσες συνέπειες μπορεί να είναι πιο δυσάρεστες από τις άμεσες συνέπειες.



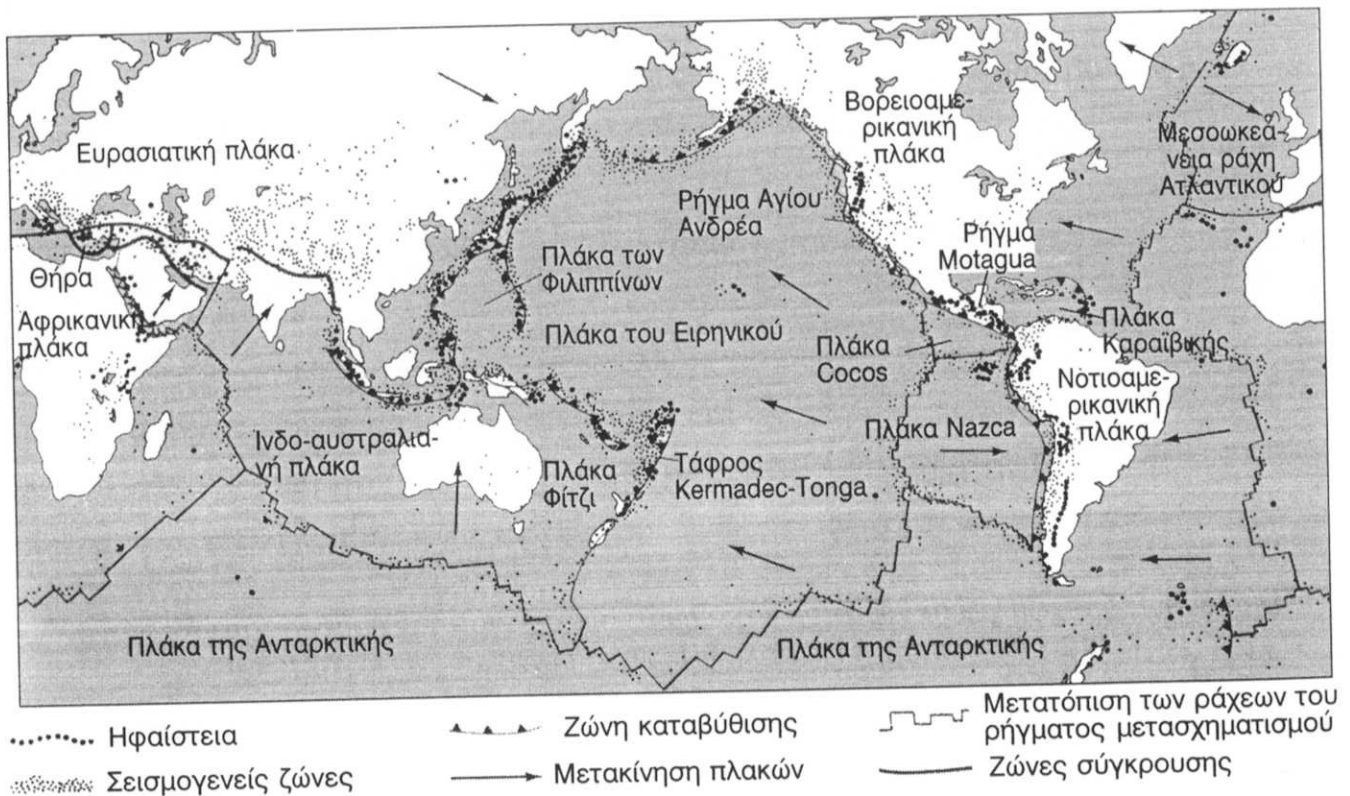
Σχήμα 1.4: Σεισμός της Loma Prieta της 17.10.1989: κατάρρευση γέφυρας υπερυψωμένου αυτοκινητόδρομου (αριστερά) και κατάρρευση γειτονικής κατοικίας (δεξιά) [Lom 89]



Σχήμα 1.5: Σεισμός Erzincan της 13.3.1992: Καταστροφή κτιρίου κατοικιών και καταστημάτων λόγω καθιζήσεων [WS 93]

1.1 υπάρχουν στοιχεία για τα θύματα και τις ζημιές. Η σύγκρισή τους καταλήγει σε αριθμούς με διαφορά τάξης μεγέθους από μια μέχρι τρεις δυνάμεις του δέκα.

Στην Καλιφόρνια, η εντατική ερευνά και η εκπαίδευση των Σπουδαστών-υποψήφιων Πολιτικών Μηχανικών και των Μηχανικών της πράξης στην Αντισεισμική Μηχανική άρχισε ήδη από τα χρόνια του πενήντα. Αργότερα άρχισε ο έλεγχος και η αναβάθμιση των παλαιότερων κτισμάτων ("earthquake assessment", "retrofitting", "upgrading") και οι οργανωτικές προετοιμασίες για την αντιμετώπιση σοβαρών καταστάσεων ("earthquake preparedness programs"). Οι Κανονισμοί για τις κατασκευές προσαρμόζονται διαρκώς στις καινούργιες γνώσεις. Για το λόγο αυτό, στο σεισμό της Loma Prieta οι περισσότερες ζημιές και καταρρεύσεις έγιναν σε παλαιότερα κτίρια και γέφυρες των οποίων η κακή προφανώς σεισμική συμπεριφορά ήταν πολλές φορές ήδη γνωστή από αρκετό χρόνο πριν. Από τις κατασκευές που είχαν μελετηθεί και διαστασιοποιηθεί με βάση τις σύγχρονες γνώσεις, ορισμένες ζημιές παρουσιάστηκαν μόνο σε ένα πολύ μικρό μέρος τους. Δυστυχώς όμως όλα αυτά δεν μπορεί να τα διαπιστώσει κανείς και στην Αρμενία ή στο σεισμό του Spitak. Τα περισσότερα από τα κτίρια που κατέρρευσαν είχαν κτισθεί τα τελευταία μόλις χρόνια, οι δε σύγχρονοι κανόνες και μέθοδοι της ασφαλούς αντισεισμικής δόμησης δεν τηρήθηκαν καθόλου ή εν πάση περίπτωσης όλως ανεπαρκώς. Η σύγκριση αποδεικνύει με εντυπωσιακό τρόπο την πρόοδο στον τομέα της Αντισεισμικής Μηχανικής τα τελευταία χρόνια.



Σχήμα 1.1: Παγκόσμιος χάρτης με τις τεκτονικές πλάκες, ηφαίστεια και σεισμογενείς ζώνες [Bol 84]

# Σεισμική δράση στις κατασκευές

Σεισμολογικά δεδομένα

Μέγεθος βίαιου

εστία, μηχανισμός

δυναμικός κ.λ.λ

Σεισμολόγοι

Γεωλογικά δεδομένα

δυναμικά, τοπο-

γραφικά και μηχαν-

νικά χαρακτηριστικά

του μέσου που διακρίβω-

τα βίαια κύματα

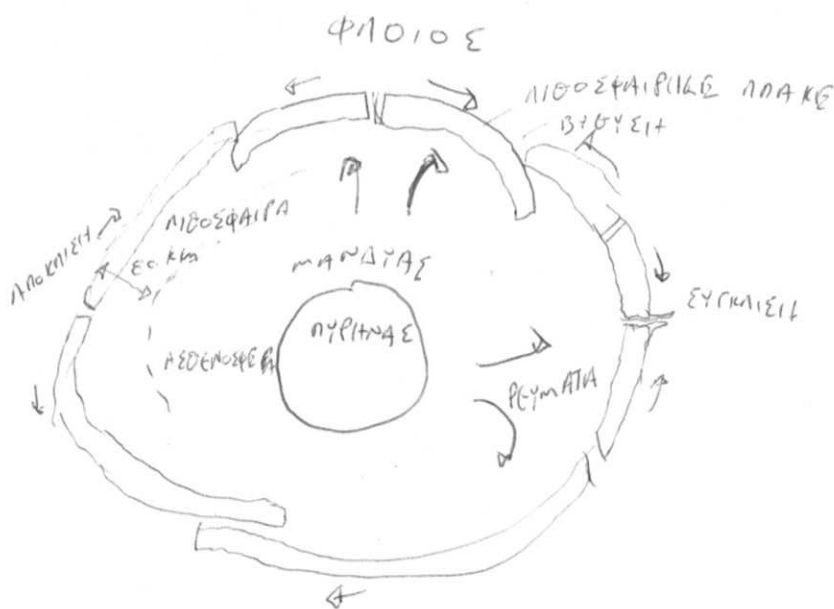
Γεωλόγοι, εδαφομη-

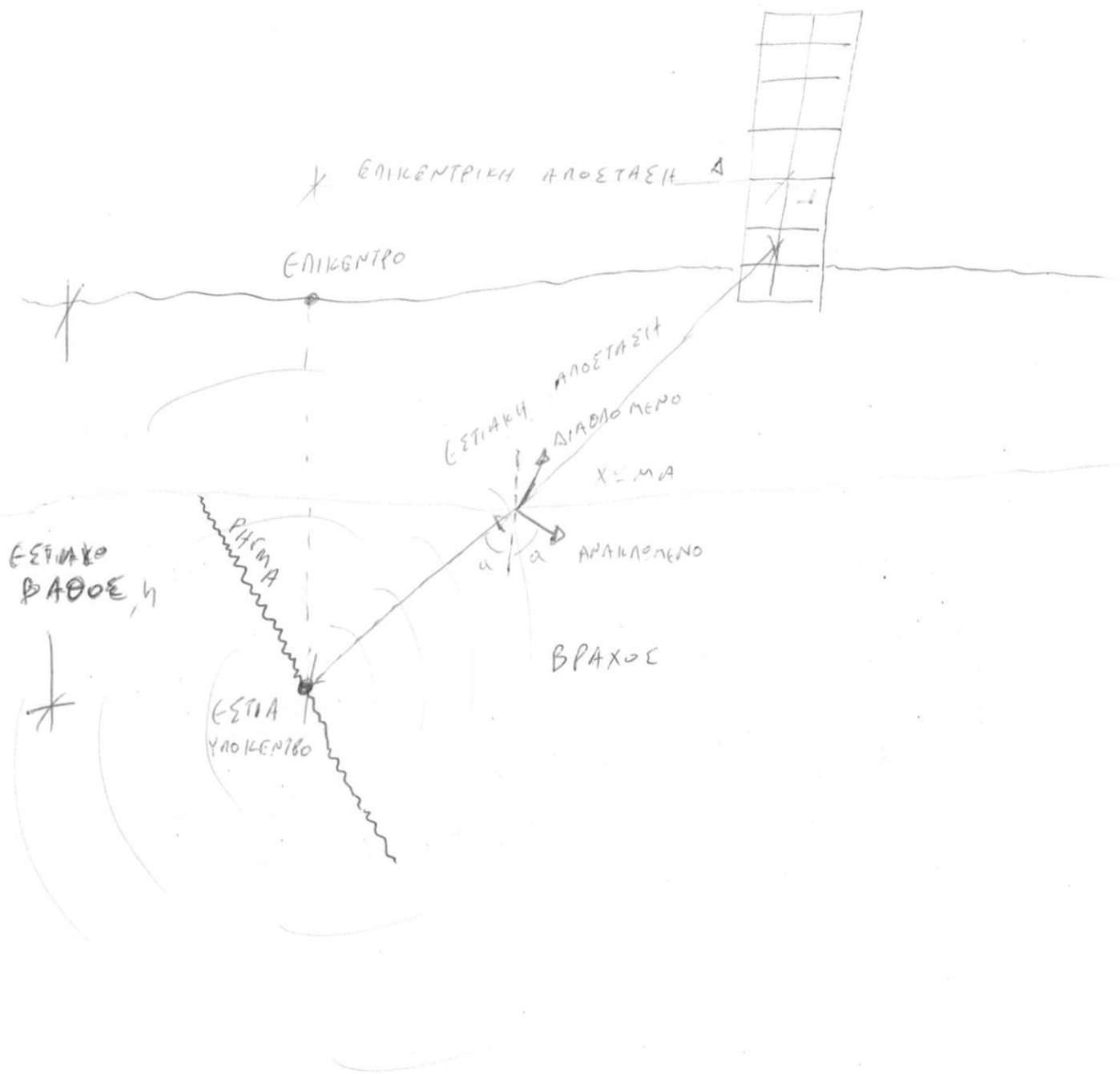
χανικοί

Δομή και βίαιη απόκριση της ίδιας της κατασκευής

Πολιτικοί μηχαν.

## Το φαινόμενο του βίαιου





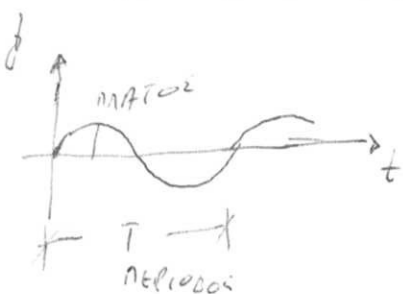
- $h < 60 \text{ km}$  ΕΠΙΦΑΝΙΑΚΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ
- $60 < h < 300 \text{ km}$  ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΒΑΘΟΥΣ
- $300 \text{ km} < h$  ΣΕΙΣΜΟΙ ΒΑΘΟΥΣ ΟΧΙ ΑΙΣΘΗΤΟΙ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΗΣ ΓΗΣ

ΤΕΙ Αθήνας - Τμ. Πολιτικών Έργων Υποδομής

Επιφανειακοί σεισμοί → εμφανίζονται με τη μορφή μιας ακολουθίας ο μεγαλύτερος λέγεται κύριος, οι πριν από αυτόν προσεισμοί και μερικοί μετασεισμοί. Γιατί φεύγουμε από τα επιτρία

ΕΣΤΙΑ → ΚΥΜΑΤΑ → ΤΑΛΑΝΤΟΝΟΜΙΑ ΠΡΟΣ ΟΛΕΣ ΤΙΣ

ΣΤΟ ΧΩΡΟ → ΕΠΙΜΗΚΗ Ρ, ΕΓΚΑΡΣΙΑ S



$(7-8) \frac{km}{s}$  (ελαττωμα-βαρική)

$U-S \frac{km}{s}$

ΜΙΚΡΗ ΠΕΡΙΟΔΟ  
ΜΙΚΡΟ ΠΛΑΤΟΣ  
ΠΙΕΣΗ - ΕΝΤΕΣΗ

ΔΙΑΣΜΗΤΙΚΑ → ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΗΜΑΤΟΣ  
ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΔΟ  
- - - ΠΛΑΤΟΣ  
ΔΕΝ ΔΙΑΔΙΔΟΝΤΑΙ ΣΤΑ ΡΕΥΣΑ

ΣΕ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ, ΤΩΝ ΕΔΑΦ. ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ, ΚΑΙ ΑΛΑΓΗ <sup>P,S</sup> → ΑΝΑΚΛΩΝΤΑΙ ΚΑΙ ΔΙΑΘΛΗΝΤΑΙ → ΦΤΑΝΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΙΖΟΥΝ ΤΑ

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΚΥΜΑΤΑ (L-ΚΥΜΑΤΑ)  
ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΟΧΟΡΙΚΑ  
ΜΕΓΑΛΟ ΠΛΑΤΟΣ ΤΑΛΑΝΤΟΣΗΣ

Rayleigh (R-κύματα)

κυκλικοι κυματες ελλειψεις

Love (Q-κύματα)

ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΑ ΠΡΟΣ ΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΟΣ.

Από σύνθεσή προκύπτει η τελική κίνηση σε τυχόν σημείο αναπτύσσεται σε τρεις συμπεριφορές → Δύο οριζόντιες (ισότητα μεγαλύτερες από την κατακόρυφη, εκτός κ=μτα στο σεισμό) → κατακόρυφη

ΜΕΘΟΔΟΣ Μ

Ποσοτική σύγκριση διαφορών  
 ζέσεων μεταξύ τούτων  
 κλίμακα Richter 1935

τοπικό μέγεθος  $M_L$

$$M_L = \text{Log } A(\Delta) - \text{Log } A_0(\Delta)$$

$\Delta$  ελικοκέντρικη απόσταση 1km

$A, A_0$  μέγιστα πλάτη αναγραφής

σε σεισμόμετρο Wood-Anderson

του υποθη σεισμού και ενός προτύπου  
 σεισμού. (οριστική πρότυπος ο σεισμός  
 που εγράφει πλάτος 1μ σε απόσταση 100km)

$$A_0(\Delta) = \text{πλάτος}$$

καταλληλότητα για κοντινούς σεισμούς

↓ Gutenberg 1945

επιφανειακό μέγεθος  $M_S \equiv M$  - μέγεθος

για τον ελλην. χώρο

$$M = \text{Log } \alpha + 1.41 \text{ Log } \Delta + 0.2$$

$$\alpha = \frac{A_x + A_y}{2} \text{ (m)}$$

$\Delta$ : ελικοκ. απόσταση σε χιλιόμετρα

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 

.....

ΕΝΕΡΓΕΙΑ  $E$  που εκλύεται

15/06/10  
 $\text{Log } E = 18.24 + 1.41 M$  ΟΤΑ  $M \uparrow$   $I_{\text{max}} \uparrow$   $\rightarrow E \uparrow$

ΕΝΤΑΣΗ I

Μέτρο των επιπτώσεων του  
 υποθη σεισμού στον άνθρωπο  
 και στον περιβάλλοντα χώρο

• Δεκαβάθμια Mercalli

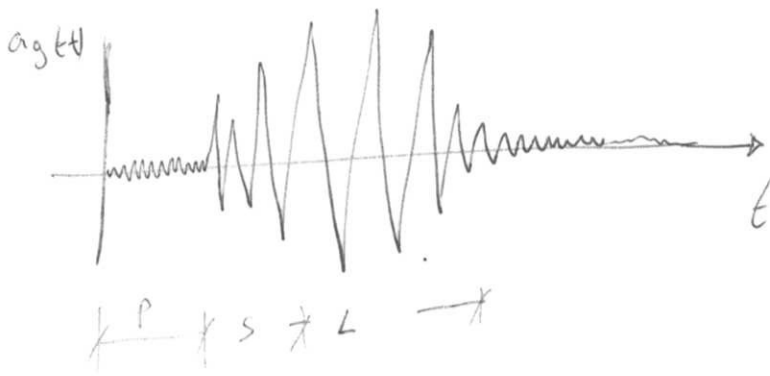
• -1- Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK)

• Επτάβαθμια Ιαπωνική κλίμακα JMA

ΕΝΤΑΣΗ ΜΕΤΡΟ ΓΙΑ ΤΟ ΑΣΕ  
 ΓΙΝΕΤΑΙ ΑΝΤΙΛΗΠΤΟΣ ΕΝΑΣ ΣΕΙΣΜΟΣ

ΜΕΘΟΔΟΣ Μ ΑΠΟΤΕΛΕΙ ΜΕΤΡΟ ΓΙΑ  
 ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΟΥ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΕΙ Η  
 ΕΣΤΙΑ ΗΛΟ ~~ΜΟ~~ ΜΟΡΦΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

$$M = \text{Log } (A/T)_{\text{max}} + f(\Delta, \eta) + C_S + C_V$$



$x$  } οριζοντίες παροφθαίτες  
 $y$  }  
 $z$  → κατακάρυφη < οριζοντίων  
 όχι πάνω για  
 (κατακάρυφος σε.ο.π. π.χ.)

ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΣΕΙΣ

- ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ, ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΚΟΡΥΦΩΝ
- ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΣΕΙΣΜΟΥ, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΧΩΡΟΤΗΤΩΝ (ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΕΛΕΥΣΕΩΝ ΑΝΤΩ ΜΗΔΕΩΝ)
- ΚΑΤΑΚΕΡΤΗ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ → ΒΡΙΣΚΟΥΜΕ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΠΑΝΩ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

## 2 Βάσεις σεισμολογίας

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες βάσεις σεισμολογίας που έχουν σημασία για τον Πολιτικό Μηχανικό. Σε αυτές ανήκουν τα είδη και τα χαρακτηριστικά των σεισμών, οι εν χρήσει σεισμικές κλίμακες, η γένεση και η διάδοση των σεισμικών κυμάτων, η καταγραφή και η αξιολόγηση των σεισμών καθώς και ο ορισμός και η εύρεση ενός σημαντικού εργαλείου, του φάσματος απόκρισης.

### 2.1 Είδη και χαρακτηριστικά των σεισμών

#### 2.1.1 Είδη

Ανάλογα με τα αίτια που τους προκαλούν, οι σεισμοί μπορεί να χωρισθούν στα εξής είδη:

##### Τεκτονικοί σεισμοί

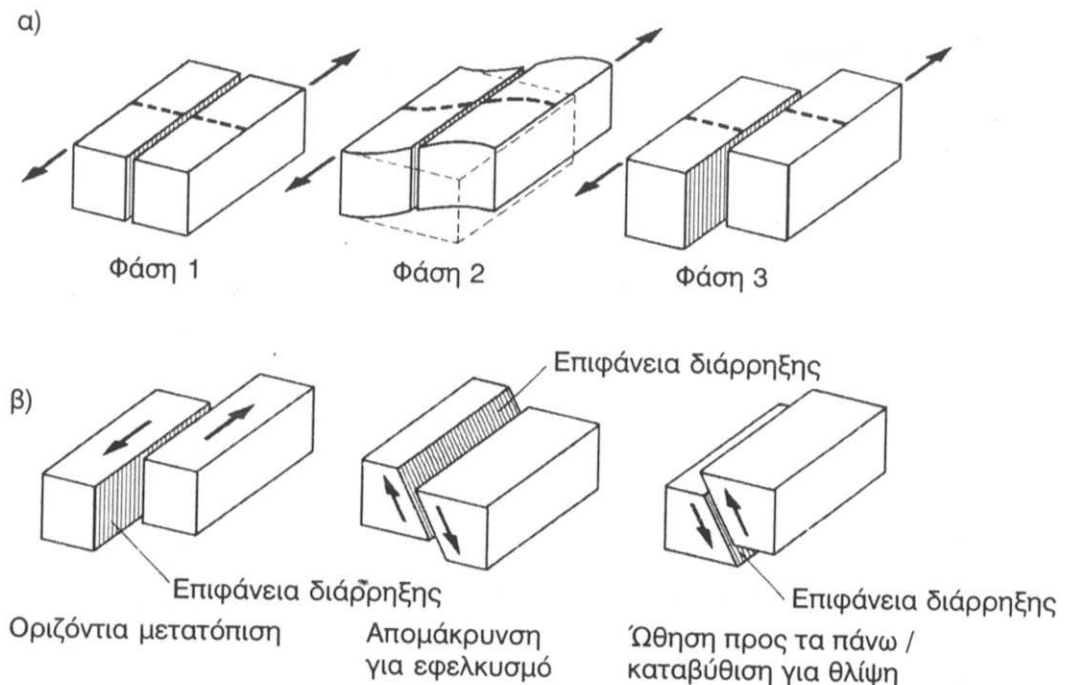
Οι περισσότεροι σεισμοί οφείλονται σε απότομες διαδικασίες θραύσης του φλοιού της γης. Ο φλοιός της γης είναι μια λεπτή επιδερμίδα με πάχος μεταξύ ~10 km (ωκεανοί) και ~70 km (Άλπεις). Ο φλοιός επιπλέει σε κάποια έκταση του στο μαλακό εσωτερικό της γης και βρίσκεται, λόγω γεωθερμικών ρευμάτων και άλλων αιτιών, σε συνεχή κίνηση. Οι μετατοπίσεις είναι πρώτα-πρώτα συνεχείς και εκδηλώνονται με αργό ρυθμό σαν ελαστικές παραμορφώσεις, καθώς και παραμορφώσεις λόγω ερπυσμού και διαρροής, και άρα η εντατική κατάσταση στο φλοιό της γης διαρκώς αλλάζει. Στη ζώνη που θα επακολουθήσει η θραύση, αυξάνονται οι τάσεις. Όταν οι τάσεις φθάσουν στην αντοχή θραύσης του πετρώματος (διατμητική, εφελκυστική ή θλιπτική αντοχή), επέρχεται τότε η θραύση με απότομες μετατοπίσεις. Έτσι δημιουργείται ένας σεισμός. Οι απότομες μετατοπίσεις συμβαίνουν συχνά σε μια παλιά επιφάνεια θραύσης (ρήγμα, σύνορο πλάκας, ζώνη αιχμής). Τότε δημιουργείται ακαριαία μια νέα εντατική κατάσταση με μικρότερες εν γένει τάσεις (διαδικασία εκτόνωσης, "energy release"). Η θραύση-διάρρηξη άρα επέρχεται κυρίως σε μια ολόπλευρα εντεινόμενη και ανομοιογενή περιοχή του φλοιού της γης. Στο Σχήμα 2.1 φαίνονται σχηματικά οι διαδικασίες, η παραμόρφωση δηλαδή και η μετατόπιση δυο γειτονικών τεμαχών (μπλοκ), καθώς και οι ενδεχόμενες μετατοπίσεις των τεμαχών [BWI 86]. Αυτές μπορεί να εκδηλωθούν κυρίως σαν οριζόντια μετατόπιση, σαν απομάκρυνση-αποχωρισμός σε περίπτωση εφελκυσμού και σαν ώθηση προς τα πάνω ή καταβύθιση (Subduktion) σε περίπτωση θλίψης.

Ηφαιστειογενείς σεισμοί

Ρήγματα στο φλοιό της γης και αντίστοιχοι σεισμοί μπορεί να προκληθούν κατευθείαν και από ηφαιστειακές δράσεις, δηλαδή από την απότομη κυρίως τοπική μεταβολή των συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης.

Σεισμοί εγκατακρημνίσεων

Σεισμοί μπορεί επίσης να προκληθούν από την κατάρρευση της οροφής κενών των πετρωμάτων. Εδώ μπορεί να πρόκειται για φυσικά κενά (π.χ. σε μια καρστική περιοχή) ή για τεχνητά κενά, π.χ. για τέτοια που δημιουργήθηκαν από μεταλλευτικά έργα.



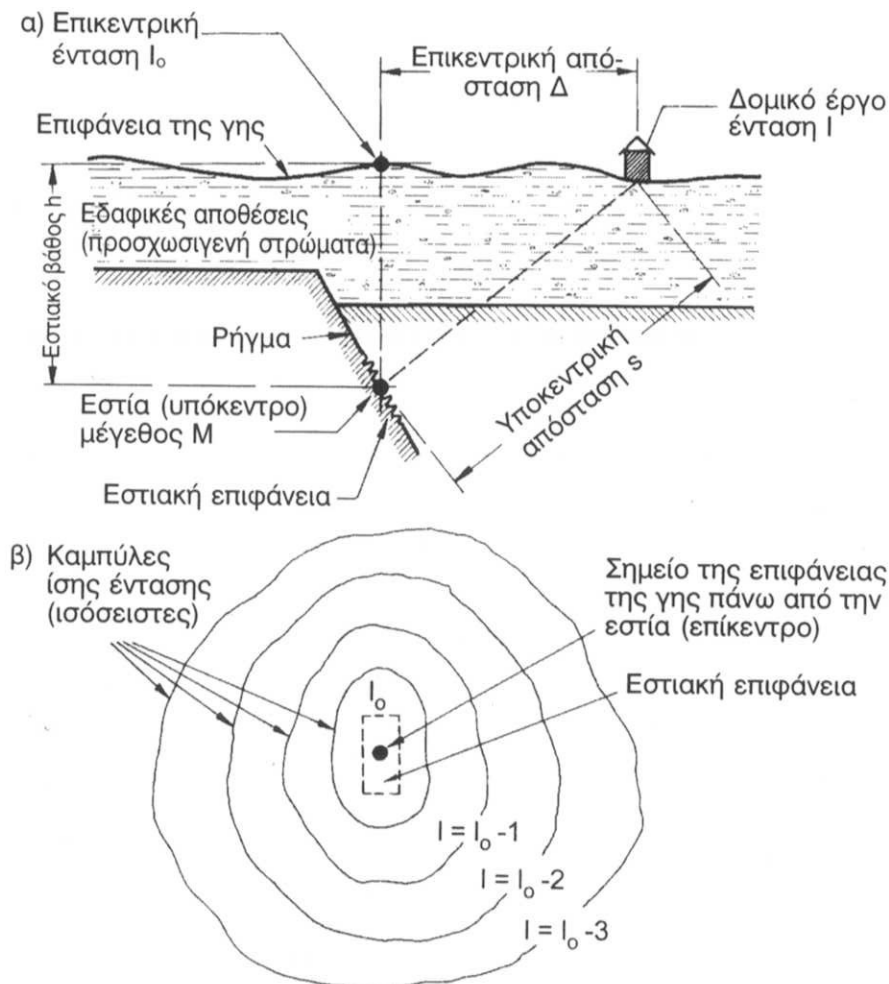
Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της γένεσης των σεισμών:  
 α) παραμόρφωση και μετατόπιση τεμαχίων (μπλοκ),  
 β) ενδεχόμενες μετατοπίσεις τεμαχίων (από το [BWI 86])

Σεισμοί προκαλούμενοι από υδροηλεκτρικά φράγματα

Κατά την πλήρωση - συνήθως την πρώτη φορά - μιας τεχνητής λίμνης κάποιου φράγματος μπορεί το υδάτινο φορτίο να προκαλέσει θραύσεις πετρωμάτων και αντίστοιχο σεισμό. Για παράδειγμα, στον προκληθέντα από τεχνητή λίμνη σεισμό (μεγέθους 6.5) κοντά στην Κογνα της Ινδίας το 1967 αναφέρθηκαν 177 νεκροί [Bol 84]. Στον τοίχο ανάσχεσης προκλήθηκαν σημαντικές ζημιές, εντούτοις υπέφερε την υδροστατική πίεση της όχι όμως ακόμη πλήρους (μέχρι της τελικής στάθμης της) τεχνητής λίμνης. Επίσης, στην τεχνητή λίμνη του Vogorno στο Verzascatal (Tessin) προκλήθηκαν δονήσεις που δεν προκάλεσαν όμως καθόλου ζημιές και εξασθένησαν σε τρεις περιόδους πλήρωσης (της λίμνης).

Τεχνητοί σεισμοί

Τέλος, τεχνητοί σεισμοί παράγονται από εκρήξεις και ιδίως από υπέργειες και υπόγειες εκρήξεις ατομικών βομβών



Σχήμα 2.2: Σημαντικά χαρακτηριστικά των σεισμών α) Τομή μέσω της εστιακής περιοχής, β) Χάρτης ισοσειστών (από το [BWI 86])

### 2.1.2 Χαρακτηριστικά

Σημαντικά χαρακτηριστικά των σεισμών και αντίστοιχες έννοιες είναι τα εξής (βλ. και Σχήμα 2.2):

Επιφάνεια διάρρηξης = Εστιακή επιφάνεια

Στους τεκτονικούς σεισμούς η διάρρηξη επέρχεται στο φλοιό της γης κατά μήκος μιας επιφάνειας που ονομάζεται επιφάνεια διάρρηξης ή και εστιακή επιφάνεια. Η επιφάνεια αυτή δεν είναι επίπεδη, θεωρείται όμως συνήθως από τους σεισμολόγους - προσεγγιστικά - σαν επίπεδη ("λύση εστιακής επιφάνειας"). Η εστιακή επιφάνεια μπορεί να έχει οποιαδήποτε θέση (εν γένει λοξή, ενδεχομένως και κατακόρυφη ή ακόμη και οριζόντια). Το μήκος της μπορεί να είναι λίγα μέτρα έως μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα και το πλάτος της λίγα μέτρα έως αρκετές δεκάδες χιλιόμετρα. Η υψομετρική της θέση, δηλαδή η θέση του κέντρου της εστιακής επιφάνειας, είναι συνήθως μεταξύ 5 και 40 km (Άλπεις) για να συμβεί διάρρηξη στο στερεό φλοιό της γης. Σπανιότερα το (εστιακό) βάθος φθάνει στα 700 km. Εκεί τα πετρώματα όμως δεν είναι πια σκληρά και ψαθυρά αλλά ιξωδο-πλαστικά. Δεν ήταν, για το λόγο αυτό, πολύ καιρό γνωστό ότι μια εστία μπορεί να βρίσκεται σε τόσο μεγάλο βάθος. Σήμερα, φαίνεται να επικρατεί η άποψη ότι στα υπέρθερμα πλαστικά πετρώματα του μανδύα της γης συμβαίνουν απότομες μεταλλαγές φάσεων [Gre 94].

### Εστιακός μηχανισμός

Σαν εστιακός μηχανισμός χαρακτηρίζεται ο τεκτονικός μηχανισμός στην εστία (πρβ. Σχήμα 2.1): οριζόντια μετατόπιση, απομάκρυνση, ώθηση προς τα πάνω, καταβύθιση (Subduktion) κ.λ.π.

### Ταχύτητα διάρρηξης

Στα σκληρά πετρώματα του γήινου φλοιού η θραύση-διάρρηξη αρχίζει οπουδήποτε και διαδίδεται με μια ταχύτητα περίπου 3 km/s.

### Ενέργεια διάρρηξης

Από την ενέργεια που αποδεσμεύεται μέσω της θραύσης των πετρωμάτων διακρίνονται δυο μέρη:

1. Απελευθέρωση επί τόπου μέσω διαδικασιών καταστροφής (του ιστού), θερμότητας τριβής κ.λ.π.
2. Ακτινοβολία από την εστιακή επιφάνεια με τη μορφή ελαστικών κυμάτων = σεισμικών κυμάτων. Εδώ αναφέρεται και σαν ενέργεια εστιακών κυμάτων ή εστιακή ενέργεια.

### Κατάσταση μετά τη θραύση

Μετά τη θραύση, η ζώνη διάρρηξης και η εγγύτερη ή και ευρύτερη περιοχή βρίσκεται σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας. Η διαδικασία θραύσης μπορεί να ερμηνευθεί και σαν διαδικασία εκτόνωσης και ισορροπίας. Μετά τη θραύση ακολουθεί συνήθως μια βραδεία ανακατανομή των τάσεων και των αντίστοιχων παραμορφώσεων μέχρις ότου τελικά μετά από χρόνια, δεκαετίες ή ακόμη και εκατονταετίες, στη ζώνη αυτή ή σε μια γειτονική συμβεί μια θραύση και άρα κι ένας σεισμός.

### Εστία = Υπόκεντρο

Η εστία, που ονομάζεται και υπόκεντρο, είναι τελικά η θέση όπου αρχίζει η θραύση του φλοιού της γης. Σαν εστία όμως θεωρείται συνήθως το κέντρο της ζώνης διάρρηξης. Χαρακτηρίζεται και σαν "σεισμική πηγή".

### Επίκεντρο

Το επίκεντρο είναι το σημείο της επιφάνειας της γης πάνω από την εστία.

### Εστιακό βάθος

Το εστιακό βάθος  $h$  είναι η απόσταση της εστίας από την επιφάνεια της γης, δηλαδή από το επίκεντρο. Γίνεται η διάκριση μεταξύ αβαθών (μικρού βάθους) σεισμών ( $h < 70$  km) και μεγάλου βάθους σεισμών ( $h \sim 70-700$  km).

### Υποκεντρική απόσταση

Υποκεντρική απόσταση  $s$  είναι η απόσταση μεταξύ της εστίας και της θέσης ενός παρατηρητή ή ενός δομικού έργου.

### Επικεντρική απόσταση

Επικεντρική απόσταση  $\Delta$  είναι η απόσταση μεταξύ επικέντρου και της θέσης ενός παρατηρητή ή ενός δομικού έργου. Μετριέται σε km, και καμιά φορά σε μοίρες γωνίας γήινου κύκλου.

### Περιοχή δόνησης

Περιοχή δόνησης (δονούμενη) είναι η περιοχή στην οποία οι κινήσεις του εδάφους γίνονται αισθητές-αντιληπτές από τους ανθρώπους (χωρίς όργανα μέτρησης, ένταση MSK μεγαλύτερη από 3 περίπου).

### Ισόσειστες

Ισόσειστες είναι καμπύλες ίσης έντασης (~ ίδιας δόνησης).

## 2.2 Σεισμικές κλίμακες

Για το χαρακτηρισμό της έντασης ενός σεισμού χρησιμοποιούνται οι κλίμακες μεγέθους και έντασης.

### 2.2.1 Κλίμακα μεγέθους (κλίμακα Richter) /

Το μέγεθος  $M$  αποτελεί ένα μέτρο για την εστιακή ενέργεια, δηλαδή ένα μέτρο για την ενέργεια που ακτινοβολεί η εστία υπό μορφήν ελαστικών κυμάτων σε ένα σεισμό. Ισχύει η ακόλουθη εμπειρική σχέση [Bol 84] [HS 84]:

$$M = \frac{2}{3} (\log E[\text{erg}] - 11.8) = \frac{2}{3} (\log E[\text{Joule}] - 4.8) \quad (2.1)$$

$$\log E[\text{erg}] = 11.8 + 1.5M \quad (2.2)$$

όπου  $E$  είναι η εστιακή ενέργεια. Για παράδειγμα, εστιακή ενέργεια  $10^{24}$  erg αντιστοιχεί σε ένα μέγεθος  $M = (2/3) (24 - 11.8) = 8.1$ .

Στην περίπτωση της “ανοιχτής προς τα πάνω” κλίμακας μεγεθών, που φέρει και το όνομα του εμπνευστή της C.F. Richter (1935), πρόκειται άρα για λογαριθμική κλίμακα. Η αύξηση κατά μια μονάδα, π.χ. από 5 σε 6, σημαίνει δηλαδή μια αύξηση της εστιακής ενέργειας κατά το συντελεστή  $10^{1.5} \approx 30!$  Το μέγεθος  $M$  υπολογίζεται από τα μέγιστα πλάτη των σειсмоγραφημάτων καταγραφής ταχύτητας [Bat 73]:

$$M = \log (A/T)_{\max} + f(\Delta, h) + C_s + C_r \quad (2.3)$$

$A$ : Πλάτος (εύρος) της εδαφικής μετατόπισης [σε μικρά = 0.001 mm]

$T$ : Περίοδος κύματος [s] για  $A$

$\Delta$ : Απόσταση από το επίκεντρο [μοίρες γωνίας γήινου κύκλου]

$h$ : Βάθος εστίας [km]

$C_s, C_r$ : Διορθωτικές σταθερές για τοπικές και περιφερειακές επιρροές (απόσβεση)

$A/T$ : Ταχύτητα εδαφικών κυμάτων · Συντελεστή εξαρτώμενο από το  $T$

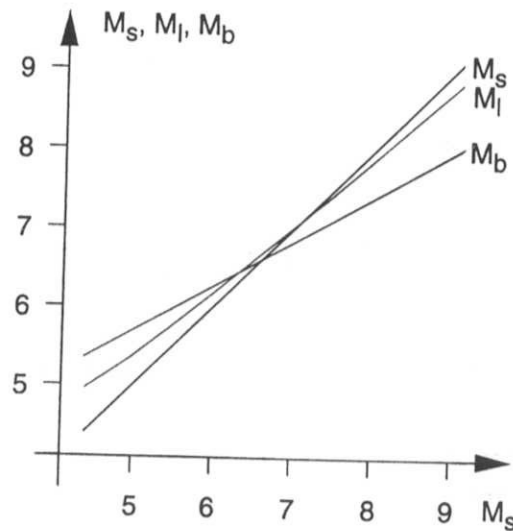
Υπάρχουν κυρίως τρεις διαφορετικοί ορισμοί του μεγέθους:

$M_l$ : Τοπικό μέγεθος = μέγεθος κοντινού σεισμού (“local magnitude”): ορίσθηκε από το Richter το 1935 και ισχύει για αποστάσεις από το επίκεντρο μέχρι  $\Delta \approx 500$  km.

$M_s$ : Μέγεθος επιφανειακών κυμάτων (“surface wave magnitude”): ορίσθηκε το 1945 από το Gutenberg και υπολογίζεται από τα μέγιστα πλάτη των επιφανειακών κυμάτων.

$M_b$ : Μέγεθος κυμάτων χώρου (“body wave magnitude”): ορίσθηκε το 1945 από το Gutenberg και υπολογίζεται από τα μέγιστα πλάτη των κυμάτων χώρου (ονομάζεται και μέγεθος μακρινού σεισμού).

Τα  $M_l, M_s$  και  $M_b$  καθορίζονται από τα επιταχυνσιογραφήματα με βάση διάφορες προδιαγραφές αξιολόγησης, το αποτέλεσμα όμως είναι όμοιες γενικά αριθμητικές τιμές (Σχ. 2.3). Οι προδιαγραφές αξιολόγησης των  $M_s$  και  $M_b$ , καθώς και οι κανόνες για την αναγωγή, καθώς και άλλες συμβάσεις διατυπώθηκαν το 1967 στην καλούμενη “Σύσταση της Ζυρίχης” σε ένα διεθνές συνέδριο σεισμολόγων [Bat 73], [HS 84]. Ο Πίνακας 2.1 δείχνει τυπικές αριθμητικές τιμές για το μέγεθος των επιφανειακών κυμάτων, ενώ στον Πίνακα 1.2 φαίνονται τα μεγέθη σημαντικών ιστορικών σεισμών.



Σχήμα 2.3: Σύγκριση μεγεθών κοντινών σεισμών, επιφανειακών κυμάτων και κυμάτων χώρου (από το [Bat 73])

Συμβάν	Αριθμητικές τιμές ( $M_s$ )
Σεισμός που μόλις γίνεται αισθητός	1-2
Σεισμός του Vaz στο Graubünden το 1991	~5
Σεισμός στις Σουηβικές Άλπεις το 1978	5.7
Σεισμός στο Vispताल του Βαλαί το 1855	~6
Σεισμός με τη μεγαλύτερη ισχύ που μπορεί να αναμένεται στην κεντρική περιοχή των Άλπεων	~7
Ο ισχυρότερος σεισμός που έχει ποτέ καταγράψει	8.7
Ο ισχυρότερος θεωρητικά ενδεχόμενος σεισμός	~9

Πίνακας 2.1: Τυπικές αριθμητικές τιμές για το μέγεθος  $M_s$

### 2.2.2 Κλίμακα έντασης

Η ένταση  $I$  είναι ένα μέτρο για το πώς γίνεται αντιληπτός ένας σεισμός και την τοπική καταστροφική δύναμη ενός σεισμού. Η κλίμακα εντάσεων ονομάζεται και "μακροσεισμική κλίμακα". Η τοπική καταστροφική δύναμη και επομένως και οι συνέπειες ενός σεισμού εξαρτώνται κυρίως από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Μέγεθος
- Περιεχόμενο συχνοτήτων στην πηγή (εξαρτάται από τον εστιακό μηχανισμό)
- Εστιακό βάθος
- Εστιακή απόσταση από τη θέση του έργου
- Γεωλογία/τοπογραφία
- Τοπικές συνθήκες υπεδάφους/έδαφος θεμελίωσης
- Περιεχόμενο συχνοτήτων στην θέση του έργου
- Διάρκεια του σεισμού στη συγκεκριμένη θέση

Το μέγεθος άρα είναι μόνον ένας από τους παράγοντες (μεταξύ πολλών άλλων) που επηρεάζουν τις συνέπειες ενός σεισμού.

Βαθμός	Ισχύς	Συνέπειες στα άτομα	Κτίρια	Φύση
I	απαρατήρητος	ανεπαίσθητος		
II	πολύ ελαφρός	αισθητός σε περιορισμένο αριθμό ατόμων		
III	ελαφρός	σαφώς αισθητός κυρίως από άτομα αναπαυόμενα		
IV	μέσης ισχύος	μέσα στα σπίτια γενικά αισθητός, αφυπνιστικός	τρίζουν τα παράθυρα	
V	σχεδόν ισχυρός	αισθητός γενικά στο ύπαιθρο	Ρωγμές σε επιχρίσματα, αιωρούνται τα κρεμαστά αντικείμενα, μετατοπίζονται τα κάδρα	
VI	ισχυρός	τρομαχτικός	Ζημιές σε καμινάδες και επιχρίσματα	μεμονωμένες ρωγμές σε υγρά εδάφη
VII	πολύ ισχυρός	πολλοί βγαίνουν στο ύπαιθρο	μέτριες ζημιές, κυρίως σε κακά κτίρια, οι καμινάδες πέφτουν	μεμονωμένες κατολισθήσεις σε εδάφη με απότομες κλίσεις
VIII	προκαλεί καταστροφές	Γενικεύεται ο φόβος	πολλά παλιά κτίρια εμφανίζουν ζημιές, σπάζουν σωληνώσεις	μεταβολές σε πηγές, κατολισθήσεις επιχωμάτων οδών
IX	καταστρεπτικός	πανικός	μεγάλες ζημιές σε ασθενή κτίρια, ζημιές και σε καλοχτισμένα σπίτια, θραύση υπόγειων αγωγών	ρήγματα στο έδαφος, καταπτώσεις βράχων, πολλές κατολισθήσεις γαιών
X	εξοντωτικός	γενικός πανικός	κτίσματα από οπτοπλινθοδομές καταρρέουν	στρέβλωση σιδηροδρομικών τροχιών, διαρροή χαλαρών εδαφών σε πλαγιές, δημιουργία νέων λιμνών
XI	καταστροφή		λίγα μόνον κτίρια στέκουν όρθια, σπάζουν οι αγωγοί	εκτεταμένες αλλαγές της επιφάνειας του εδάφους, παλιρροιακό κύμα
XII	ολική καταστροφή		κτίρια και υπόγειες κατασκευές καταστρέφονται ολοσχερώς	σε βάθος μεταμόρφωση της επιφάνειας της γης, παλιρροιακά κύματα

Πίνακας 2.2: Συνοπτική παρουσίαση της κλίμακας έντασης MSK [Pav 77]

Η ένταση I προσδιορίζεται μέσω της αξιολόγησης της δυνατότητας αντίληψης και των τοπικών ζημιών. Χρησιμοποιούνται διάφορες κλίμακες έντασης, δεν υπάρχουν όμως μεταξύ των διαφόρων 12-βαθμιων κλιμάκων μεγάλες διαφορές (το πολύ  $\frac{1}{2}$  βαθμός, πρβ. Πίνακα 2.3).

*Κλίμακα MSK (1964, από τα ονόματα των Medvedev-Sponheuer-Karnik)*

Η κλίμακα MSK είναι 12-βάθμια. Χρησιμοποιείται κυρίως στην Ευρώπη (και στον Ελβετικό Κανονισμό SIA 160). Στον Πίνακα 2.2 υπάρχει μια συνοπτική περιγραφή της [Pav 77]. Η πλήρης πρωτότυπη έκδοση του 1964 περιλαμβάνεται π.χ. στο [SM 78], μια ενημερωμένη έκδοση του 1980 υπάρχει στο [HS 84].

*Κλίμακα MM (1931, έκδοση 1956, χαρακτηρίζεται σαν τροποποιημένη κλίμακα Mercalli)*

Η κλίμακα MM είναι 12-βαθμια. Χρησιμοποιείται κυρίως στις ΗΠΑ, αλλά και στην Ευρώπη (π.χ. Ιταλία). Η κλίμακα MM υπάρχει π.χ. στο [NR 71].

*Κλίμακα MS (από τα ονόματα των Mercalli-Sieberg)*

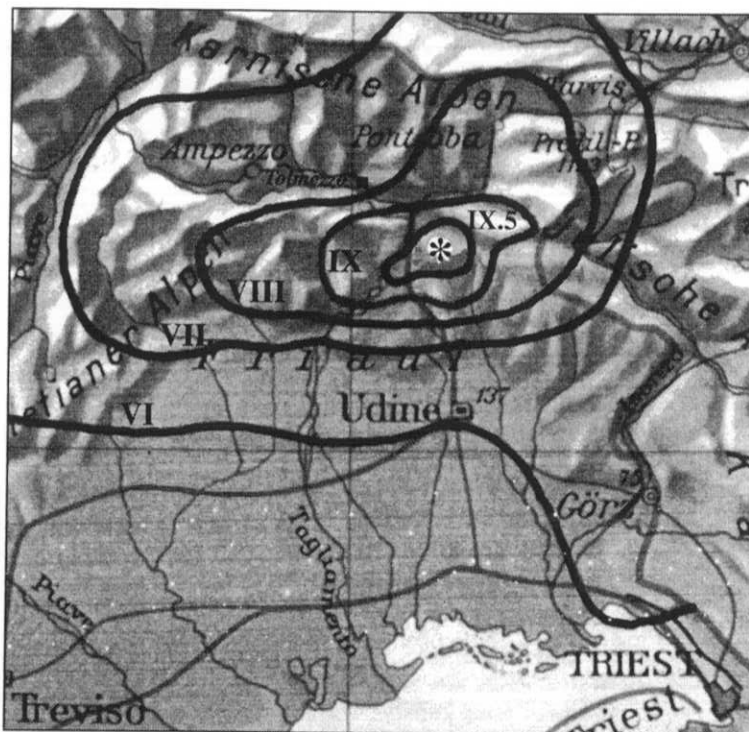
Η κλίμακα MS είναι 12-βαθμια. Χρησιμοποιείται κυρίως στη Γερμανία. Η κλίμακα MS είναι δημοσιευμένη π.χ. στο DIN 4149.

*Κλίμακα RF (1883, πήρε το όνομά της από τα ονόματα των λόγιων, από τη Γενεύη, Rossi-Forel)*

Η κλίμακα RF έχει 10 βαθμούς, σήμερα όμως μάλλον δεν χρησιμοποιείται πια.

Κλίμακα έντασης		Βαθμός της έντασης											
MSK	1964	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
MM	1931	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
RF	1883	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X			

Πίνακας 2.3: Σύγκριση μερικών κλιμάκων έντασης [Gla+ 76]



Σχήμα 2.4: Χάρτης ισόσειστων της περιοχής ισχυρότατης δόνησης με ένταση  $I \geq VI$  (κλίμακα MSK) και επίκεντρο (σημείο με αστερίσκο) του σεισμού στο Φρίουλι (Ιταλία) του 1976 (από το [Gla+ 76])

Σύμφωνα με τις κλίμακες έντασης, για ένταση V προκαλούνται οι πρώτες ελαφρές ζημιές (ρωγμές στα επιχρίσματα). Σημαντικές ρωγμές στα κτίρια εμφανίζονται από ένταση VII και πάνω.

Έχουν διατυπωθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις μεταξύ του μεγέθους  $M$ , της επικεντρικής έντασης  $I_0$  (έντασης στο επίκεντρο) και του εστιακού βάθους  $h$ . Π.χ., σύμφωνα με το [SM 78], για την Ελβετία με  $I_0$  (MSK) και  $h \leq \sim 50$  km ισχύει:

$$M = 0.67I_0 + 2.3 \log h \text{ [km]} - 2.0 \tag{2.4}$$

Παρόμοιες εξισώσεις για άλλες περιοχές υπάρχουν π.χ. στο [HS 84].

Κατά την αξιολόγηση των πληροφοριών που συλλέγονται για τις ζημιές μετά από ένα σεισμό, μπορεί πάνω σε ένα γεωγραφικό χάρτη να χαραχθούν καμπύλες ίσης έντασης, οι λεγόμενες ισόσειστες. Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται σαν παράδειγμα ο χάρτης ισοσειστών της περιοχής της πολύ ισχυρής δόνησης του σεισμού της 6ης Μάιου 1976 στο Φρίουλι (Ιταλία). Η ένταση στο επίκεντρο ήταν περίπου X.

ΣΕΙΣΜΟΣ : 1 ΜΕΓΕΘΟΣ, ΠΟΛΛΕΣ ΕΝΤΑΣΕΙΣ

## 2.3 Σεισμικά κύματα

Οι διεργασίες κατά τη διαδικασία διάρρηξης στην εστία του σεισμού καθορίζουν τις ιδιότητες των κυμάτων που ακτινοβολούνται (π.χ. χαρακτηριστικά ακτινοβολίας, σύνθεση φάσματος). Τα σεισμικά κύματα διαδίδονται από την πηγή μέσω της γης. Οι ιδιότητες του μέσου διάδοσης αυτού, μεταβάλλουν σε σημαντικό βαθμό το πλάτος και το περιεχόμενο συχνοτήτων των κυμάτων που ακτινοβολούνται. Τα κύματα που καταγράφονται σε μια συγκεκριμένη θέση περιλαμβάνουν, για το λόγο αυτό, και πληροφορίες για την πηγή (σεισμική εστία) καθώς και για το μέσο μέσω του οποίου διαδίδονται και το οποίο έχουν διατρέξει τα κύματα [HS 84].

### 2.3.1 Είδη κυμάτων

Γίνεται διάκριση μεταξύ δυο κυρίων τύπων κυμάτων, των κυμάτων χώρου και των επιφανειακών κυμάτων:

Κύματα χώρου	πρωτογενή κύματα (P) δευτερογενή κύματα (S)
Επιφανειακά κύματα	κύματα Love (L) κύματα Rayleigh (R)

Κύματα χώρου απαντώνται στο φλοιό της γης και εν μέρει (πρωτογενή κύματα) και στο εσωτερικό της γης.

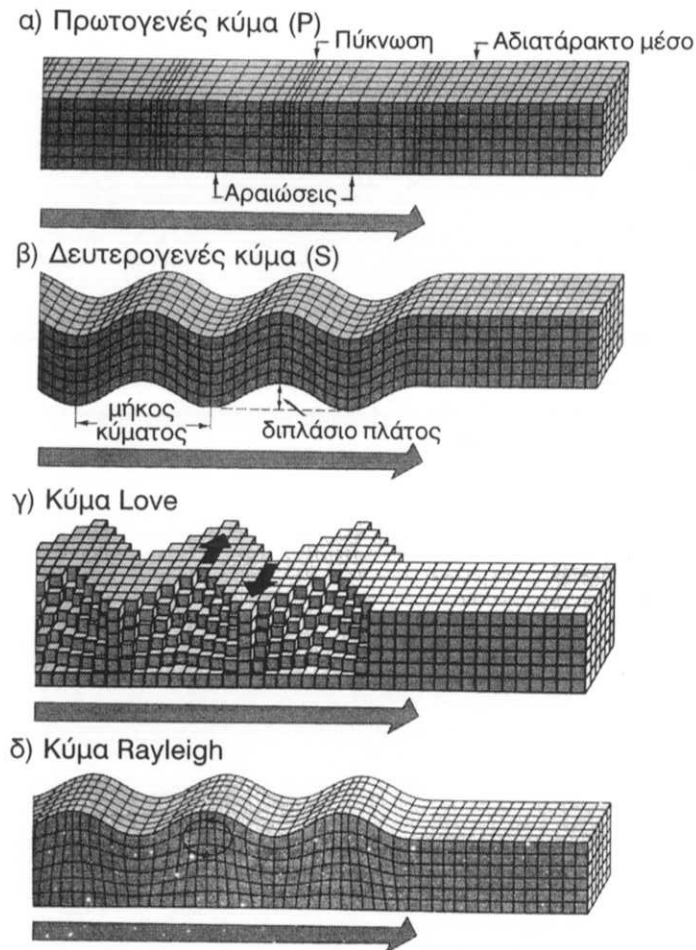
Τα πρωτογενή κύματα (P) είναι κύματα συστολής-διαστολής (θλίψης-εφελκυσμού), δηλαδή διαμήκη κύματα (Σχήμα 2.5α). Τα σωματίδια κινούνται κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος προς τα μπρος και προς τα πίσω, όπως στα ηχητικά κύματα. Αυτό ισχύει για σκληρά πετρώματα, στο ρευστό μάγμα, στο νερό. Στις επιφάνειες, τα ηχητικά κύματα μπορεί να ανακλώνται (συχνότητα στην περιοχή ακοής). Τα πρωτογενή κύματα φθάνουν πάντοτε στη θέση ενός παρατηρητή πριν από τα δευτερογενή κύματα, επειδή η ταχύτητα διάδοσής τους είναι μεγαλύτερη.

Τα δευτερογενή κύματα (S) είναι διατμητικά κύματα, εγκάρσια δηλαδή κύματα (Σχήμα 2.5β). Τα σωματίδια κινούνται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος δώθε-εκείθε και μάλιστα σε ένα οριζόντιο επίπεδο (κύμα SH) ή σε ένα κατακόρυφο επίπεδο (κύμα SV) ή σε συνδυασμό, δηλαδή και τα δυο συγχρόνως. Αυτό συμβαίνει μόνον στα σκληρά πετρώματα, όχι όμως στο ρευστό μάγμα ή στο νερό, επειδή τότε δεν υπάρχει καμία διατμητική αντοχή. Τα δευτερογενή κύματα φθάνουν πάντοτε στη θέση ενός παρατηρητή μετά τα πρωτογενή κύματα επειδή η ταχύτητα διάδοσής τους είναι μικρότερη.

Τα επιφανειακά κύματα απαντώνται μόνο στην επιφάνεια της γης, η κίνηση των σωματιδίων εξασθενεί προς τα κάτω σημαντικά. Το βάθος διείσδυσης αντιστοιχεί περίπου στο μήκος κύματος (εξαρτάται από τη συχνότητα). Τα επιφανειακά κύματα φθάνουν πάντοτε στη θέση ενός παρατηρητή μετά τα δευτερογενή κύματα επειδή η ταχύτητα διάδοσής τους είναι κάπως μικρότερη.

Τα κύματα L μοιάζουν με τα κύματα SH (Σχήμα 2.5γ). Τα σωματίδια κινούνται οριζοντίως κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης φθίνοντας όμως έντονα προς τα κάτω.

Τα κύματα R μοιάζουν με τα κύματα του νερού, τα κύματα δηλαδή στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού μετά το ρίξιμο μιας πέτρας (Σχήμα 2.5δ). Τα σωματίδια κινούνται σε μια ελλειπτική τροχιά σε ένα κατακόρυφο επίπεδο, δηλαδή συνδυασμένα οριζοντίως προς τα μπρος και πίσω, καθώς και κατακορύφως πάνω και κάτω.



Σχήμα 2.5: Τα διάφορα είδη σεισμικών κυμάτων [Βολ 84]

### 2.3.2 Ταχύτητες κυμάτων

Στα ομοιογενή μέσα η ταχύτητα του κύματος είναι συνάρτηση ελαστικών παραμέτρων και της πυκνότητας του υλικού, εξαρτάται δηλαδή από τη χημική-πετρογραφική σύνθεση, από την πίεση και τη θερμοκρασία.

$$v_p = \sqrt{\frac{E \cdot c(v)}{\rho}} \quad , \quad v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad , \quad c(v) = \frac{1 - \nu}{1 - \nu - 2\nu^2} \quad (2.5)$$

- $v_p$ : Ταχύτητα των πρωτογενών κυμάτων
- $v_s$ : Ταχύτητα των δευτερογενών κυμάτων (διατμητικά κύματα)
- $E$ : Μέτρο ελαστικότητας
- $G$ : Μέτρο διάτμησης,  $G = E/2 (1 + \nu)$
- $\nu$ : Συντελεστής εγκάρσιας μήκυνσης
- $\rho$ : πυκνότητα

Για  $\nu = 1/4$  (συνήθης παραδοχή για το φλοιό της γης) γίνεται  $c = 1.2$  και  $G = 0.4 E$  και  $v_s/v_p = 1/\sqrt{3}$

## 2.3 Σεισμικά κύματα

Τυπικές περιοχές των ταχυτήτων των κυμάτων είναι συγκεντρωμένες στον Πίνακα 2.4. Η ταχύτητα  $v_p$  των πρωτογενών κυμάτων αυξάνεται μέχρι τα όρια του πυρήνα της γης (~13 km/s) και μετά πάλι μειώνεται κάπως μέχρι το κέντρο της γης (11 km/s). Στο ρευστό-μαγματικό εξωτερικό πυρήνα δεν είναι δυνατή η διάδοση δευτερογενών κυμάτων, επειδή εκεί δεν υπάρχει καθόλου διατμητική αντοχή.

	Άμεσα κύματα στην περιοχή της εστίας (σεισμός με επίπεδη εστία)	Έμμεσα (διαθλώμενα) κύματα μπορεί να "προσπεράσουν" τα άμεσα κύματα
$v_p$	5.5 ... 6.2 km/s	7.8 ... 8.3 ... 13 km/s
$v_s$	3.2 ... 3.6 km/s	4.3 ... 4.7 ... 6 km/s

Πίνακας 2.4: Περιοχές των ταχυτήτων των κυμάτων

Η ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων (κυμάτων L και R) είναι κάπως μικρότερη από την ταχύτητα των εκεί διατμητικών κυμάτων:

$$v_R \approx 0.9 v_s \quad (2.6)$$

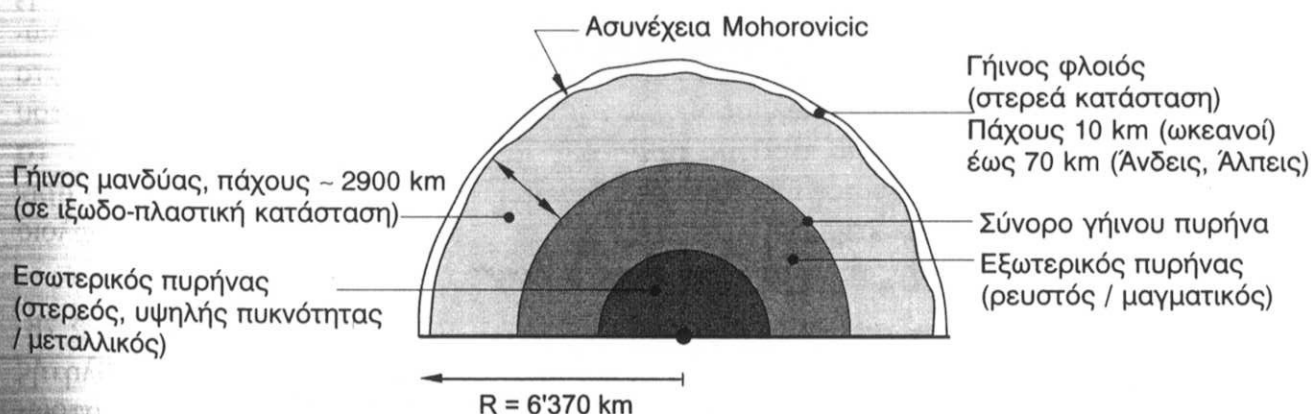
Τα επιφανειακά κύματα μπορεί να περιέχουν και πολύ μεγαλύτερες περιόδους, π.χ.  $T=20$  s έως μερικά λεπτά. Αυτό σημαίνει μεγάλα μήκη κύματος, π.χ.

$$\lambda = vT = 3 \text{ km/s} \cdot 20 \text{ s} = 60 \text{ km} \quad (2.7)$$

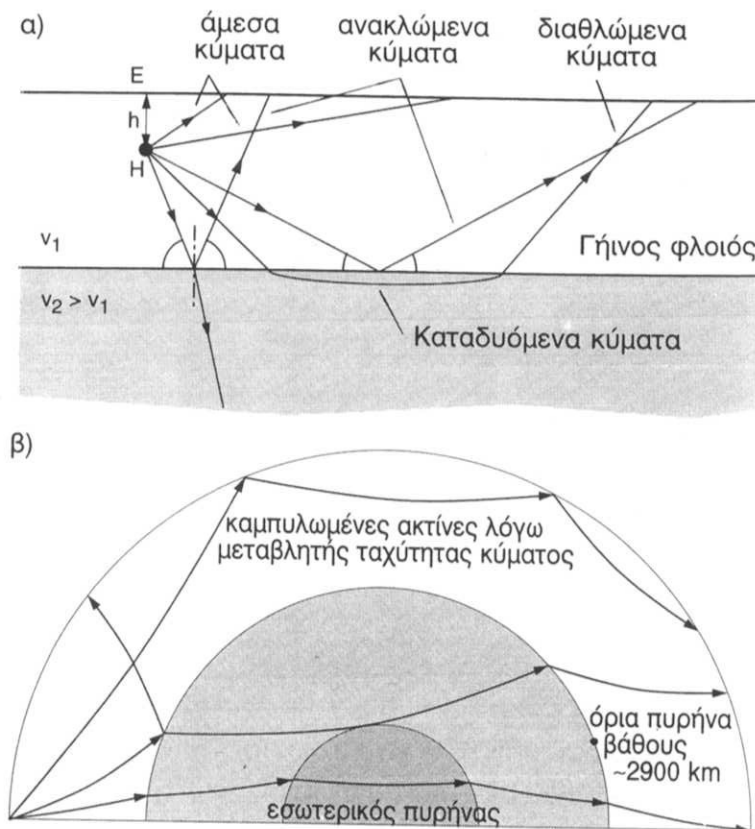
## 2.3.3 Διαδρομές κυμάτων

Το Σχήμα 2.6 δείχνει ένα απλό μοντέλο στρωμάτων της γης. Ο φλοιός της γης έχει πάχος μεταξύ ~10 km (ωκεανοί) και 70 km (περιοχές Άλπεων). Κάτω από το φλοιό, στην καλούμενη ασυνέχεια Mohorovicic (για συντομία "Μοχο"), γίνεται η μετάβαση στο μανδύα της γης. Αυτός είναι στρογγυλός πάχους 2900 km και βρίσκεται σε ιξωδο-πλαστική κατάσταση. Μετά ακολουθούν τα σύνορα του πυρήνα της γης, ο εξωτερικός πυρήνας σε ρευστή-μαγματική κατάσταση και ο εσωτερικός πυρήνας που είναι πάλι στερεός και - λόγω της μεταλλικής του φύσης- έχει μεγάλη πυκνότητα.

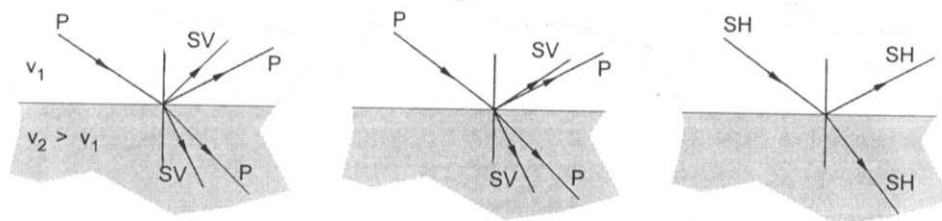
Ο σχετικά ψαθυρός φλοιός της γης, αποτελεί άρα σε κάποιο βαθμό μια λεπτή επιδερμίδα πάνω σε ένα μαλακό υπόστρωμα. Αν φαντασθεί κανείς ένα μοντέλο της γήινης σφαίρας με διάμετρο 13 m, η επιδερμίδα έχει πάχος μόνο 10 έως 70 mm και είναι απόλυτα κατανοητό το πώς σχηματίζονται στη μεμβράνη αυτή εδώ κι' εκεί ρωγμές και πώς ακτινοβολούνται τα κύματα χώρου.



Σχήμα 2.6: Απλό μοντέλο στρωματογραφίας της γης



Σχήμα 2.7: Πιθανές διαδρομές κυμάτων α) για κοντινό σεισμό και β) για μακρινό σεισμό



Σχήμα 2.8: Ανάκλαση και διάθλαση διάφορων ειδών κυμάτων στο σύνορο ενός στρώματος

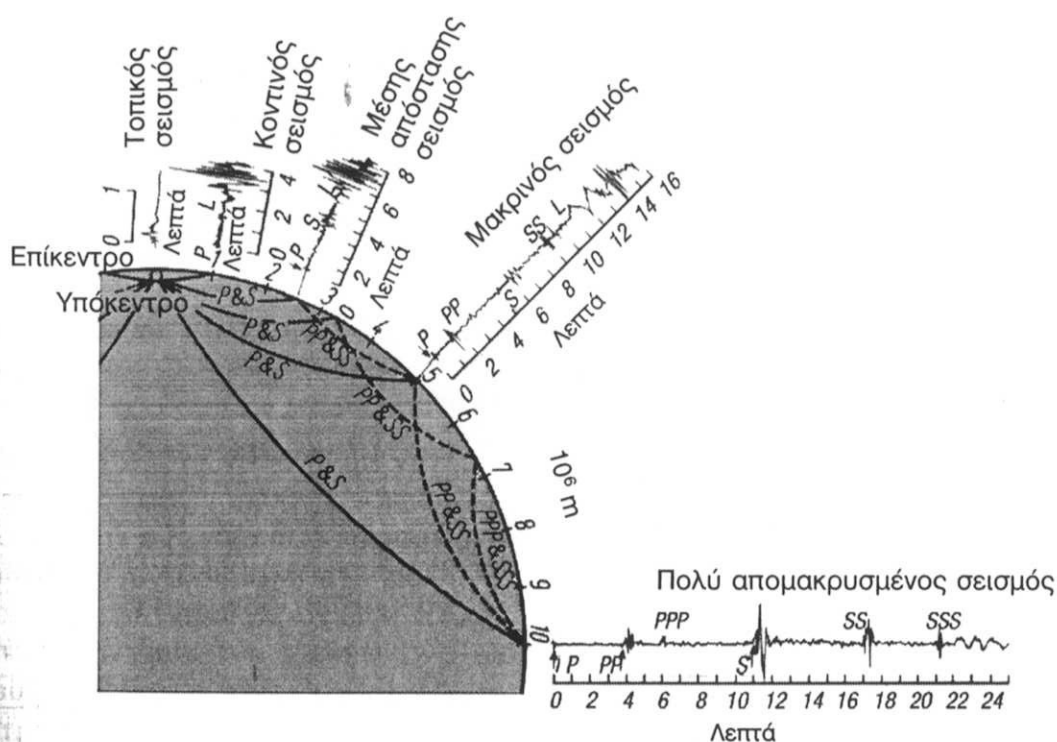
Πιθανές διαδρομές κυμάτων για κοντινό σεισμό ( $\Delta < \sim 1000$  km) δείχνει το Σχήμα 2.7α. Εκτός από τα άμεσα κύματα που οδεύουν κατευθείαν από την εστία προς την επιφάνεια της γης, υπάρχουν κύματα ανακλώμενα στο όριο ενός στρώματος (Μοχο) καθώς και διαθλώμενα, δηλαδή τεθλασμένα κύματα. Τα καλούμενα καταδυόμενα κύματα βυθίζονται στο Μοχο μέσα στο μανδύα της γης. Ακολουθούν εκεί καμπύλη τροχιά επειδή η ταχύτητα του κύματος μειώνεται προς τα κάτω, πράγμα που προκαλεί μια καμπύλωση (περίθλαση). Τα βυθισμένα κύματα μπορεί να προσπεράσουν τα άμεσα κύματα, να φθάσουν δηλαδή πριν από αυτά στη θέση ενός παρατηρητή στην επιφάνεια της γης, επειδή κάτω από το φλοιό της γης η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων είναι μεγαλύτερη από ό,τι μέσα σ' αυτόν.

Πιθανές διαδρομές κυμάτων για μακρινούς σεισμούς ( $\Delta > \sim 1000$  km) δείχνει το Σχήμα 2.7β. Η καμπύλωση ή αντίστοιχα περίθλαση των διαδρομών των κυμάτων λόγω μεταβλητής ταχύτητας κύματος καθώς και ανακλάσεων και διαθλάσεων στα σύνορα των γήινων στρωμάτων και την επιφάνεια της γης είναι και εδώ προφανής.

Το Σχήμα 2.8 δείχνει, με περισσότερες ακόμη λεπτομέρειες, τη διάδοση των κυμάτων P, SV και SH στα σύνορα μεταξύ δυο διαφορετικών στρωμάτων:

- Τα κύματα P, SV και SH ανακλώνται και διαθλώνται και προκύπτουν εν μέρει και άλλα είδη κυμάτων διαφορετικά από το είδος του αφικνούμενου κύματος, δηλαδή
- Τα κύματα P παράγουν και κύματα SV
- Τα κύματα SV παράγουν και κύματα P
- Τα κύματα SH αντίθετα δεν παράγουν κανένα άλλο είδος κύματος

Η κίνηση του εδάφους σε μια συγκεκριμένη θέση, ένα δηλαδή σειсмоγράφημα, προκύπτει άρα μέσω επαλληλίας των εδαφικών κινήσεων λόγω πολλών διαδρομών κυμάτων. Στο Σχήμα 2.9 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη των κινήσεων του εδάφους σε διαφορετικές αποστάσεις από την εστία [MK 84], ιδίως για ~ 1000 km (“κοντινός σεισμός”, ~2000 km (“μέσης απόστασης σεισμός”), ~5000 km (“μακρινός σεισμός”) και ~10000 km (“πολύ απομακρυσμένος σεισμός”). Στα σειсмоγραφήματα έχουν καταγραφεί οι καλούμενες “παρεμβολές” συγκεκριμένων κυμάτων (το πρώτο πλάτος ταλάντωσης της αντίστοιχης εδαφικής κίνησης), των αμέσων δηλαδή κυμάτων P, S (και L), των κυμάτων P και S που ανακλάστηκαν μια φορά στην επιφάνεια της γης, που χαρακτηρίζονται σαν PP και SS και των κυμάτων P και S που ανακλάστηκαν εκεί δυο φορές και χαρακτηρίζονται σαν PPP και SSS. Στην απεικόνιση, ο άξονας του χρόνου αρχίζει πάντοτε με την παρεμβολή των κυμάτων P· η χρονική όμως στιγμή αυτή είναι τόσο μεταγενέστερη όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση από την εστία. Και η διάρκεια του σεισμού αυξάνεται με την απόσταση από την εστία, επειδή συμμετέχουν περισσότερα κύματα με διαφορετικές διαδρομές και ταχύτητες διάδοσης. Στο Σχήμα 2.9 φαίνεται επίσης πολύ ωραία ότι ένας και ο αυτός σεισμός παράγει σε κάθε θέση της επιφάνειας της γης ένα άλλο σειсмоγράφημα, δηλαδή η εδαφική κίνηση στο χώρο σαν αποτέλεσμα της επαλληλίας όλων των κυμάτων που φθάνουν σε κάθε θέση είναι διαφορετική.



Σχήμα 2.9: Διάδοση των σεισμικών κυμάτων και η εμφάνισή τους στο σειсмоγράφημα [MK 84]