

## **Μάθημα 4<sup>ο</sup>**

### **Όργανα Αναγραφής των Σεισμών**

- Βασικές Αρχές Λειτουργίας των Σεισμογράφων
- Θεωρία Σεισμομέτρου
- Μηχανικοί Σεισμογράφοι
- Ηλεκτρομαγνητικοί Σεισμογράφοι
- Ηλεκτρονικοί Σεισμογράφοι

## Εισαγωγή

Η γενική κίνηση των υλικών σημείων ενός στερεού σώματος, συνεπώς και του εδάφους, μπορεί να αναλυθεί σε **μετάθεση** και **περιστροφή**.

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει για τη Σεισμολογία η μετάθεση και οι παράγωγοί της ως προς το χρόνο (ταχύτητα, επιτάχυνση). Για το λόγο αυτό, όλοι οι σεισμολογικοί σταθμοί είναι εφοδιασμένοι με όργανα τα οποία αναγράφουν την κίνηση αυτή σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων (~0.01–50 Hz).

Κινήσεις πολύ μεγάλης περιόδου ( $\geq 10000$  sec), που αντιστοιχούν σε πολύ αργές μεταθέσεις-παραμορφώσεις του εδάφους, καταγράφονται από ειδικά όργανα (παραμορφωσιόμετρα), όμως λίγοι σεισμολογικοί σταθμοί είναι εφοδιασμένοι με τέτοια όργανα.

**Το όργανο που χρησιμοποιείται για την παρατήρηση και καταγραφή της εδαφικής μετάθεσης και των παραγώγων της είναι ο σειсмоγράφος ενώ το μέρος του σειсмоγράφου που άμεσα αποκρίνεται στη σεισμική κίνηση (εκκρεμές σειсмоγράφου κλπ.) ονομάζεται σεισμόμετρο.**

Το παρόν κεφάλαιο έχει ως αντικείμενο τις βασικές αρχές λειτουργίας των σειсмоγράφων, τη θεωρία του σεισμόμέτρου και τα χαρακτηριστικά των μηχανικών, ηλεκτρομαγνητικών και ηλεκτρονικών σειсмоγράφων.

## Εισαγωγή

Μια εδαφική κίνηση θα αναγραφόταν κατά ιδανικό τρόπο, αν ήταν δυνατό να υπάρχει μια γραφίδα έξω από τη Γη, η οποία να παραμένει ακίνητη κατά τη διάρκεια της εδαφικής κίνησης και να γράφει την κίνηση σε ταινία που βρίσκεται σε στερεά σύνδεση με το έδαφος και γι' αυτό κινείται με το έδαφος.

Επειδή, όμως, ο τέτοιος τρόπος δημιουργίας σχετικής κίνησης μεταξύ γραφίδας και ταινίας είναι αδύνατος, επινοήθηκε ο τρόπος αναγραφής των εδαφικών δονήσεων ο οποίος περιγράφεται παρακάτω.

## **Βασικές Αρχές Λειτουργίας των Σεισμογράφων**

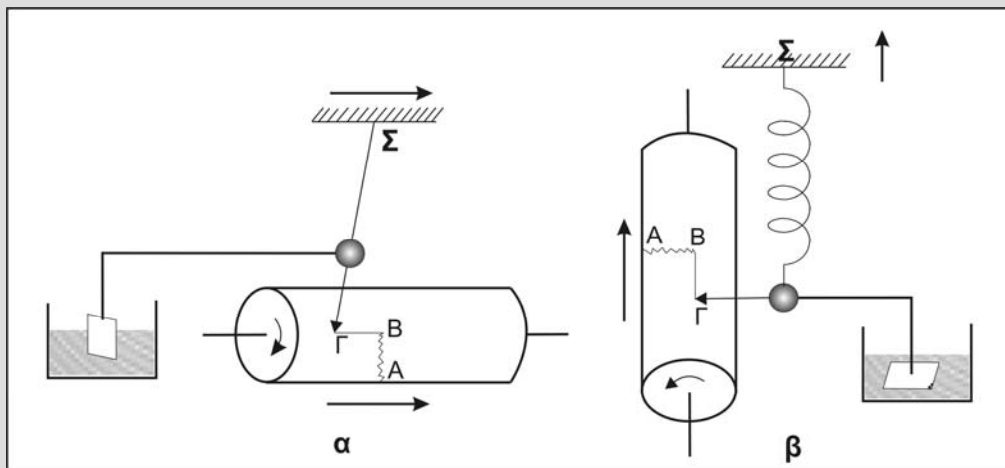
Οι **σεισμογράφοι** είναι όργανα με τα οποία γίνεται αυτόματη και, κατά το δυνατόν, πιστή αναγραφή της σεισμικής κίνησης.

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
- ψηφιακά στη μνήμη Η/Υ ή σε σκληρό δίσκο

Ένας σεισμογράφος αποτελείται από:

- το εκκρεμές
- το σύστημα ενίσχυσης (ή μεγέθυνσης)
- το σύστημα αναγραφής
- το σύστημα απόσβεσης της ελεύθερης ταλάντωσης του εκκρεμούς
- το σύστημα ψηφιοποίησης των σεισμογραμμάτων (οι ψηφιακοί σεισμογράφοι)



Σχ. 4.1. Αρχή λειτουργίας οριζοντίου (α) και κατακόρυφου (β) σεισμογράφου. Όταν το έδαφος κινείται απότομα κατά τη διεύθυνση του άξονα του κυλίνδρου τότε τόσο ο κύλινδρος όσο και το σημείο εξάρτησης  $\Sigma$  του εκκρεμούς θα εκτελέσουν την ίδια κίνηση, επειδή συνδέονται στερεά με το έδαφος ενώ το άκρο της γραφίδας θα γράψει πάνω στην ταινία τη (σχετική) κίνηση ΒΓ που είναι αντίθετης φοράς.

Το άκρο της γραφίδας το οποίο δε γράφει, συνδέεται με τη μάζα εκκρεμούς, η οποία βρίσκεται σε ασθενή σύνδεση με το έδαφος ( $\Sigma$ ). 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 μόνον από το πλάτος της εδαφικής κίνησης αλλά και από το λόγο της περιόδου της εδαφικής κίνησης προς την ιδιοπερίοδο του εκκρεμούς.

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 σεισμογράφου.

Κατά την κίνηση του εδάφους δημιουργείται τριβή στο σημείο επαφής της γραφίδας με την ταινία και στις αρθρώσεις των μοχλών. Για το λόγο αυτό, η μάζα του εκκρεμούς πρέπει να είναι σημαντική, ώστε η δύναμη αδράνειας να είναι αρκετά μεγάλη για να υπερνικάει τις τριβές.

Για να είναι πιστή η αναγραφή της εδαφικής κίνησης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη η **ελεύθερη ταλάντωση του εκκρεμούς**. Αυτό επιτυγχάνεται με τη **συσσκευή απόσβεσης**. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι απόσβεσης των αιωρήσεων του εκκρεμούς.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η κίνηση που αναγράφεται από τη γραφίδα στην ταινία δεν εξαρτάται μόνο από την εδαφική κίνηση αλλά και από παραμέτρους του σεισμογράφου, που λέγονται **σταθερές** αυτού και είναι:

- η ιδιοπερίοδος του εκκρεμούς
- η στατική μεγέθυνση
- η τριβή
- συντελεστής απόσβεσης

### **Περιστροφή κυλίνδρου αναγραφής**

Για να είναι δυνατή η διάκριση των αναγραφών των 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.

### **Χρονόμετρο**

Για να μπορούμε να προσδιορίσουμε το χρόνο άφιξης των διαφόρων σεισμικών κυμάτων σε ένα σταθμό, ο χρόνος γράφεται πάνω στην ταινία με χαρακτηριστική εκτροπή της γραφίδας ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Επειδή χρειάζεται ακρίβεια της τάξης του 0.1 sec (ή και μεγαλύτερη), το σφάλμα του χρονομέτρου καθορίζεται καθημερινά με τη σύγκριση του χρόνου αυτού με σήματα που εκπέμπουν διάφοροι σταθμοί ακριβείας. Σήμερα, η διόρθωση χρόνου του χρονομέτρου γίνεται αυτόματα με λήψη σημάτων από το σύστημα GPS.

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 σεισμογράφοι.

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

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

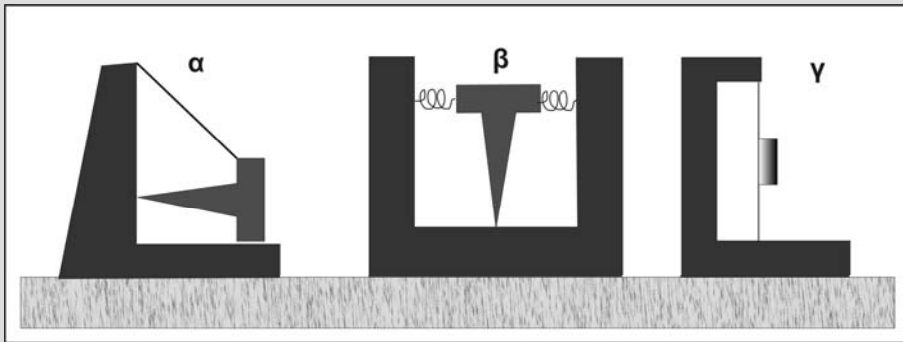
Ο ένας από τους οριζόντιους σεισμογράφους γράφει την οριζόντια κίνηση κατά τη διεύθυνση Βορρά-Νότου (**NS**) και άλλος την οριζόντια κίνηση κατά τη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης (**EW**).



## Τρόποι μεταβολής της περιόδου του εκκρεμούς σεισμομέτρου

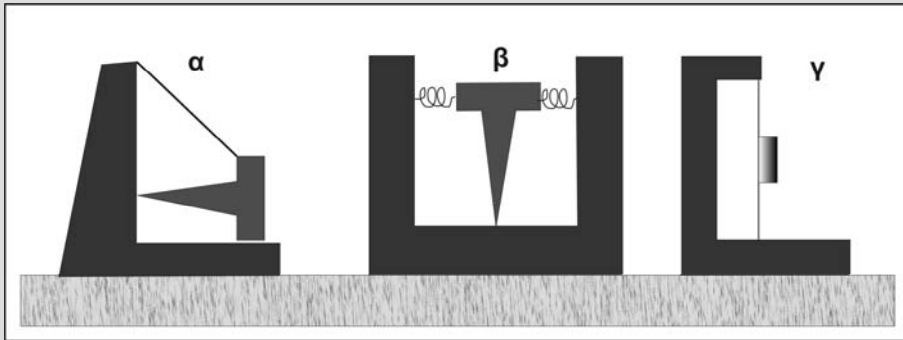
Η τιμή της **περιόδου του εκκρεμούς** παίζει σημαντικό ρόλο στην επιτυχή αναγραφή των σεισμικών κυμάτων, γιατί η **πραγματική μεγέθυνση εξαρτάται από το λόγο της περιόδου αυτής προς την περίοδο του σεισμικού κύματος και είναι τόσο μεγαλύτερη όσο ο λόγος αυτός πλησιάζει προς τη μονάδα.**

Για να γράφει ο σειсмоγράφος σεισμικές κινήσεις σχετικά μεγάλης περιόδου, πρέπει το εκκρεμές του να έχει σημαντικό μήκος. Έτσι, για να έχει το εκκρεμές οριζοντίου σεισμομέτρου περίοδο 10 sec, πρέπει το ανηγμένο μήκος του να είναι 25 m, πράγμα που δημιουργεί σοβαρές τεχνικές δυσκολίες. Για το λόγο αυτό, επιδιώκουμε να πετύχουμε αύξηση της περιόδου με όχι υπερβολική αύξηση του μήκους αλλά με την εφαρμογή διαφόρων τρόπων ανάρτησης.



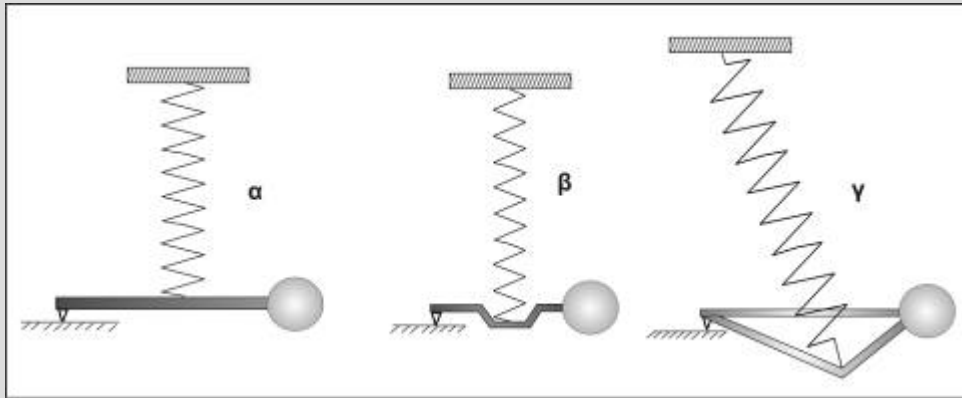
Σχ. 4.2. Βασικοί τρόποι ανάρτησης της μάζας εκκρεμών οριζοντίων σεισμογράφων (Richter, 1958).

- α) Εκκρεμές **κεκλιμένου άξονα αιώρησης**. Η μάζα συνδέεται με σύρμα με το πάνω μέρος του κεκλιμένου, ως προς την κατακόρυφη, άξονα και με ράβδο με το κάτω μέρος του άξονα αυτού. Όταν αυτός ο άξονας αιώρησης είναι κατακόρυφος, το εκκρεμές βρίσκεται σε ευσταθή ισορροπία, δηλαδή, η περίοδος αυτού έχει άπειρη τιμή. Η περίοδος ελαττώνεται, όταν αυξάνεται η γωνία του άξονα με την κατακόρυφη και αποκτάει την ελάχιστη τιμή, όταν ο άξονας γίνει οριζόντιος. Μπορούμε, συνεπώς, να πετύχουμε την επιθυμητή περίοδο με κατάλληλη κλίση του άξονα αιώρησης. Το εκκρεμές αυτό χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή των πρώτων σεισμογράφων από τους Milne, Ewing και Gray στην Ιαπωνία. Τέτοιο εκκρεμές χρησιμοποιήθηκε επίσης για την κατασκευή των οριζοντίων σεισμογράφων τύπου **Mainka**.



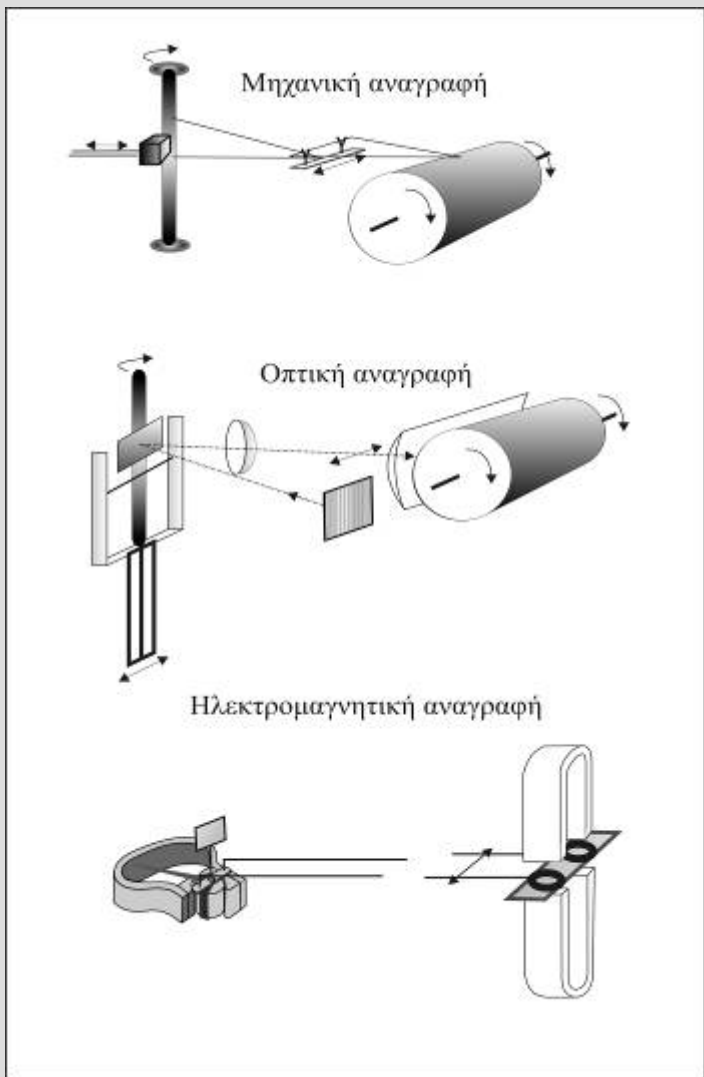
Σχ. 4.2. Βασικοί τρόποι ανάρτησης της μάζας εκκρεμών οριζοντίων σεισμογράφων (Richter, 1958).

- β) **Ανάστροφο εκκρεμές.** Η μάζα πραγματοποιεί αιωρήσεις γύρω από το κάτω άκρο της και στηρίζεται στα πλάγια σε ελατήρια, στα οποία δημιουργούνται δυνάμεις επαναφοράς κατά την αιώρησή της. Η περίοδος καθορίζεται από το εκκρεμές (μάζα, κλπ.) καθώς και από τη θέση των ελατηρίων και τις σταθερές τους. Επομένως, με τη μεταβολή των παραμέτρων αυτών μπορούμε να πετύχουμε την επιθυμητή περίοδο. Το ανάστροφο εκκρεμές χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή σεισμογράφων ορισμένων τύπων, όπως είναι οι οριζόντιοι σεισμογράφοι τύπου **Wiechert**.
- γ) **Εκκρεμές στρέψης.** Αποτελείται από λεπτό κατακόρυφο σύρμα από βολφράμιο, που βρίσκεται τεντωμένο μεταξύ δύο σημείων. Στο μέσο του σύρματος βρίσκεται προσκολλημένη μικρή χάλκινη μάζα κυλινδρικού σχήματος. Κατά την οριζόντια κίνηση του εδάφους, ο κύλινδρος πραγματοποιεί στροφική ταλάντωση, της οποίας η περίοδος εξαρτάται από το συντελεστή στρέψης του σύρματος. Είναι δυνατό να δοθεί στο σύρμα ορισμένη κλίση, οπότε η περίοδος εξαρτάται και από τη γωνία του σύρματος με την κατακόρυφη. Το εκκρεμές στρέψης χρησιμοποιείται στους σεισμογράφους **Wood-Anderson**.



Σχ. 4.3. Βασικοί τρόποι ανάρτησης της μάζας εκκρεμών κατακόρυφων σεισμογράφων (Richter, 1958).

Στην περίπτωση των κατακόρυφων σεισμογράφων εμφανίζεται παρόμοιο πρόβλημα, σχετικά με την περίοδο. Όταν η μάζα βρίσκεται στο άκρο ελατηρίου η περίοδος είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της επιμήκυνσης του ελατηρίου και γι' αυτό χρειάζεται ελατήριο υπερβολικού μήκους, για να πετύχουμε σχετικά μεγάλες περιόδους. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται διάφοροι τρόποι ανάρτησης των μαζών, όπως είναι αυτοί που δείχνονται στο σχήμα (4.3). Με αυτούς πετυχαίνεται αύξηση της περιόδου με ελατήρια σχετικώς μικρού μήκους.



**α) Μηχανική αναγραφή.** Η κίνηση του κέντρου βάρους του εκκρεμούς μεγεθύνεται με σύστημα μοχλών, οι οποίοι καταλήγουν σε γραφίδα. Κατά την αναγραφή αυτή δημιουργούνται σημαντικές δυνάμεις τριβής. Για την υπερνίκηση των δυνάμεων τριβής πρέπει να χρησιμοποιούνται εκκρεμή σημαντικής μάζας. Για να διπλασιάσουμε τη μεγέθυνση, για δοσμένη τριβή και ιδιοπερίοδο, χρειάζεται τετραπλασιασμός της μάζας.

**β) Οπτική αναγραφή.** Κατά την αναγραφή αυτή, λεπτή φωτεινή δέσμη πέφτει πάνω σε καθρέφτη στερεωμένο στη μάζα εκκρεμούς ή σε λεπτό κύλινδρο ο οποίος, με κατάλληλη διάταξη, εκτελεί γύρω από τον άξονά του ταλαντώσεις όμοιες με τις ταλαντώσεις του εκκρεμούς. Μετά την ανάκλασή της στον καθρέφτη, η φωτεινή δέσμη περνάει από συγκλίνοντα και μετά από κυλινδρικό φακό για να γίνει τελικά πολύ λεπτή και να σχηματίσει ζωηρή φωτεινή τελεία πάνω σε φωτογραφική ταινία που είναι τυλιγμένη γύρω από τον κύλινδρο αναγραφής.

**γ) Ηλεκτρομαγνητική αναγραφή.** Πλάκα από μονωτή (π.χ. μαρμαρυγία) τυλιγμένη με πηνία από λεπτό χάλκινο σύρμα βρίσκεται μεταξύ των πόλων μαγνήτη που συνδέεται με το έδαφος. Η μονωτική πλάκα συνδέεται με τη μάζα του εκκρεμούς έτσι ώστε, κατά την κίνηση αυτού, να κάνει όμοιες με αυτό κινήσεις ενώ τα άκρα των πηνίων συνδέονται με τους ακροδέκτες κατοπτρικού γαλβανομέτρου. Κατά την ταλάντωση του εδάφους, αναπτύσσεται, λόγω επαγωγής, εναλλασσόμενη τάση στα άκρα του πηνίου και παράγεται μεταβαλλόμενο ρεύμα, που διαρρέει το γαλβανόμετρο. Λόγω του ρεύματος αυτού, ο καθρέφτης του γαλβανομέτρου κάνει ταλαντώσεις, που εξαρτώνται από τις ταλαντώσεις του εδάφους και από τις ιδιοπεριόδους του εκκρεμούς και του γαλβανομέτρου. Οι ταλαντώσεις αυτές του γαλβανομέτρου αναγράφονται οπτικά.

Σχ. 4.4. Οι τρεις τρόποι αναλογικής αναγραφής των σεισμών (Jung, 1953, τροποποιημένο).

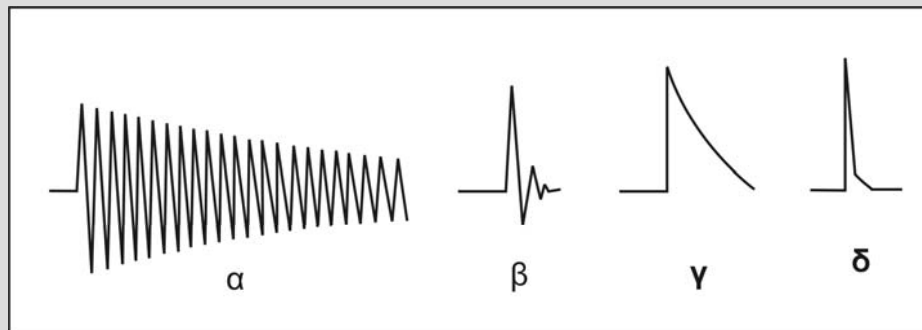
## Τρόποι απόσβεσης των αιωρήσεων του εκκρεμούς

Για την απόσβεση των αιωρήσεων του εκκρεμούς σεισμομέτρου χρησιμοποιούνται τα εξής τρία είδη συσκευών:

**α) Απόσβεση με υγρό.** Η συσκευή απόσβεσης με υγρό αποτελείται από δοχείο με παχύρρευστο υγρό (λάδι, γλυκερίνη, κλπ), μέσα στο οποίο μπορούν να κινούνται μια ή περισσότερες πλάκες που συνδέονται με μοχλό με το εκκρεμές του σεισμομέτρου (σχ. 4.1). Οι πλάκες μπορούν να βυθίζονται περισσότερο ή λιγότερο μέσα στο υγρό, ώστε ο συντελεστής απόσβεσης να ρυθμίζεται κατά βούληση. Η απόσβεση με υγρό παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι οι μεταβολές της θερμοκρασίας επηρεάζουν την πυκνότητα και το ιξώδες και γι' αυτό προκαλούν απρόβλεπτες και ανεπιθύμητες μεταβολές του συντελεστή απόσβεσης.

**β) Απόσβεση με αέρα.** Έμβολο μπορεί, με κατάλληλη εξάρτηση, να κινείται μέσα σε κύλινδρο, που τα δύο άκρα του κλείνονται με πλάκες και η εσωτερική του διάμετρος είναι λίγο μεγαλύτερη από τη διάμετρο του εμβόλου. Το ένα άκρο του εμβόλου συνδέεται με τη μάζα του εκκρεμούς. Κατά την ταλάντωση του εμβόλου παράγονται συμπύεση και αραίωση του αέρα, μέσα στους αεροθαλάμους που βρίσκονται από το ένα και το άλλο μέρος του εμβόλου με συνέπεια την εξάσκηση στο έμβολο δύναμης αντίστασης, της οποίας η φορά είναι αντίθετη της φοράς της ταχύτητας του εμβόλου και το μέτρο της ανάλογο, κατά προσέγγιση, προς το μέτρο της ταχύτητας και ανεξάρτητο του πλάτους της ταλάντωσης.

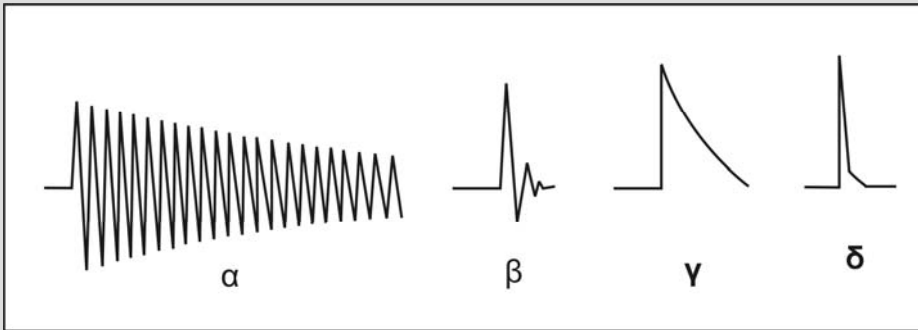
**γ) Μαγνητική απόσβεση.** Το εκκρεμές του σεισμομέτρου συνδέεται με χάλκινη πλάκα, η οποία μπορεί να ταλαντώνεται μεταξύ των πόλων πεταλοειδούς μαγνήτη. Κατά την κίνηση της πλάκας δημιουργούνται σ' αυτήν ρεύματα Foucault. Συνέπεια αυτού είναι η εξάσκηση πάνω στην πλάκα δύναμης που έχει φορά αντίθετη της φοράς της ταχύτητας με την οποία κινείται αυτή και μέτρο ανάλογο του μέτρου της ταχύτητας. Με μεταβολή του τμήματος της επιφάνειας της πλάκας από όπου περνάν οι μαγνητικές γραμμές, ρυθμίζεται κατά βούληση ο συντελεστής απόσβεσης.



Σχ. 4.5. Κίνηση του εκκρεμούς:

- (α) χωρίς απόσβεση
- (β) με ασθενή απόσβεση
- (γ) με ισχυρή απόσβεση
- (δ) με κρίσιμη απόσβεση (Bath, 1973).

## Τρόποι απόσβεσης των αιωρήσεων του εκκρεμούς (συνέχεια)



Σχ. 4.5. Κίνηση του εκκρεμούς:

(α) χωρίς απόσβεση

(β) με ασθενή απόσβεση

(γ) με ισχυρή απόσβεση

(δ) με κρίσιμη απόσβεση

(Bath, 1973).

Αν δώσουμε μια στιγμιαία ώθηση στη μάζα του εκκρεμούς σεισμομέτρου, η μορφή της αναγραφής που θα πάρουμε θα εξαρτηθεί από το βαθμό της απόσβεσης. Το σχήμα (4.5) δείχνει τέσσερις τέτοιες αναγραφές.

Στην (α) περίπτωση η αναγραφή είναι **χωρίς απόσβεση**. Το πλάτος ελαττώνεται με το χρόνο μόνο λόγω της τριβής και η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών πλατών είναι σταθερή.

Η **κρίσιμη απόσβεση** (δ) είναι η πιο ικανοποιητική για τη λήψη αξιόπιστων αναγραφών, γιατί στην περίπτωση αυτή ο χρόνος επανόδου του εκκρεμούς στη θέση ηρεμίας είναι ο ελάχιστος.

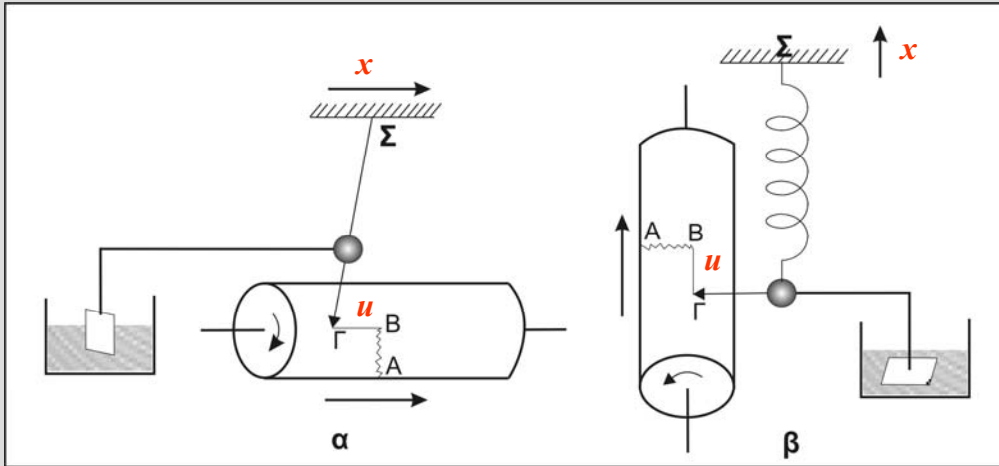
Πολλές φορές, όμως, εφαρμόζεται η **ασθενής απόσβεση** (β) για να είναι μεγάλη η μεγέθυνση. Στην περίπτωση αυτή ο **λόγος των πλατών δύο διαδοχικών προς αντίθετες κατευθύνσεις εκτροπών του εκκρεμούς του σεισμομέτρου λέγεται λόγος απόσβεσης,  $\nu$** .

## Θεωρία Σεισμομέτρου

Για την πληρέστερη κατανόηση της λειτουργίας ενός σειсмоγράφου αλλά και για να μπορούμε να κάνουμε με το σεισμογράφο ακριβείς μετρήσεις των εδαφικών δονήσεων είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη **βασική θεωρία του σεισμομέτρου**.

Να γνωρίζουμε, δηλαδή,

- την εξίσωση της κίνησης του σεισμομέτρου,
- την απόκριση του σεισμομέτρου σε αρμονική ταλάντωση του εδάφους,
- γιατί και πότε η αναγραφή ενός σεισμομέτρου μπορεί να παριστάνει τη χρονική μεταβολή της μετάθεσης ή της ταχύτητας ή της επιτάχυνσης της εδαφικής δόνησης.



Σχ. 4.1. Αρχή λειτουργίας οριζοντίου (α) και κατακόρυφου (β) σεισμογράφου. Όταν το έδαφος κινείται απότομα κατά τη διεύθυνση του άξονα του κυλίνδρου τότε τόσο ο κύλινδρος όσο και το σημείο εξάρτησης  $\Sigma$  του εκκρεμούς θα εκτελέσουν την ίδια κίνηση, επειδή συνδέονται στερεά με το έδαφος ενώ το άκρο της γραφίδας θα γράψει πάνω στην ταινία τη (σχετική) κίνηση ΒΓ που είναι αντίθετης φοράς.

Αν είναι:

- $x$  η μετάθεση της εδαφικής ταλάντωσης (μετάθεση σημείου  $\Sigma$ , σχ. 4.1)
- $u$  η μετάθεση της μάζας,  $m$ , του εκκρεμούς σε σχέση με το έδαφος ( $u = \text{ΒΓ}$ , σχ. 4.1)
- $y$  η συνολική μετάθεση (απόλυτη κίνηση) της μάζας

τότε θα ισχύει

$$y = u + x$$

(4.1)



Τη μετάθεση  $y$  πραγματοποιεί η μάζα υπό την επίδραση δύο δυνάμεων:

α) της δύναμης,  $f_k$ , του ελατηρίου η οποία είναι ανάλογη της σχετικής μετάθεσης,  $u$ , δηλαδή,

$$f_k = -ku, \text{ όπου } k \text{ είναι η σταθερά του ελατηρίου και}$$

β) της δύναμης απόσβεσης,  $F_c$ , η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας της σχετικής κίνησης, δηλαδή,

$$F_c = -cdu/dt \text{ όπου } c \text{ είναι ο συντελεστής απόσβεσης}$$

Από την εφαρμογή της θεμελιώδους εξίσωσης της δυναμικής προκύπτει, συνεπώς, ότι

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -ku - c \frac{du}{dt} \quad (4.2)$$

Από τη σχέση αυτή και την (4.1) προκύπτει ότι

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = m \frac{d^2 (u + x)}{dt^2} = m \frac{d^2 u}{dt^2} + m \frac{d^2 x}{dt^2} = -ku - c \frac{du}{dt} \Rightarrow$$

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + c \frac{du}{dt} + ku = -m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (4.3)$$

Αυτή είναι η εξίσωση της κίνησης του κέντρου βάρους της μάζας του σεισμομέτρου, γιατί η λύση της δίνει τη σχετική μετάθεση,  $u$ , της μάζας (η οποία μετάθεση αναγράφεται) σε σχέση με τη μετάθεση του εδάφους  $x$  (την οποία θέλουμε να μελετήσουμε).

Σε περίπτωση που έχουμε **κρίσιμη απόσβεση** ο συντελεστής,  $c$ , ονομάζεται **συντελεστής κρίσιμης απόσβεσης**,  $c_k$ , και δίνεται από τη σχέση:

$$c_k = 2m\omega_o \quad (4.4)$$

όπου  $\omega_o$  είναι η κυκλική ιδιοσυχνότητα του σεισμομέτρου.

Ο λόγος του συντελεστή απόσβεσης προς το συντελεστή κρίσιμης απόσβεσης ονομάζεται **παράγοντας απόσβεσης**,  $\zeta = c/c_k$ , και, αν λάβουμε υπ' όψη την (4.4)

$$c = 2\zeta m\omega_o \quad (4.5)$$

Ο παράγοντας απόσβεσης καθορίζει την απόσβεση της ιδιοταλάντωσης του σεισμομέτρου και παίρνει τιμές:

$\zeta > 1$  στην περίπτωση ισχυρής απόσβεσης  
 $\zeta = 1$  στην περίπτωση κρίσιμης απόσβεσης  
 $\zeta < 1$  στην περίπτωση ασθενούς απόσβεσης

Η κυκλική ιδιοσυχνότητα,  $\omega_0$ , μιας μάζας,  $m$ , η οποία βρίσκεται στο άκρο ελατηρίου σταθεράς  $k$ , δίνεται από τη σχέση :  $\omega_0^2 = k/m$ .

Επομένως προκύπτει η ακόλουθη μορφή της εξίσωσης κίνησης του σεισμομέτρου

$$\frac{d^2u}{dt^2} + 2\zeta\omega_0 \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = -\frac{d^2x}{dt^2} \quad (4.6)$$

όπου  $d^2x/dt^2$  είναι η επιτάχυνση του εδάφους.

Η λύση της διαφορικής αυτής εξίσωσης δίνει τη μετάθεση του κέντρου βάρους του εκκρεμούς, η οποία όταν μεγεθυνθεί αποτελεί το σεισμόγραμμα.

Εάν  $x = A\eta\mu\omega t$ , δηλαδή η κίνηση του εδάφους  $x$ , είναι αρμονική ταλάντωση πλάτους  $A$  και κυκλικής συχνότητας  $\omega$ , τότε η εξίσωση της κίνησης του σεισμομέτρου (4.6) γίνεται:

$$\frac{d^2u}{dt^2} + 2\zeta\omega_0 \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = A\omega^2\eta\mu\omega t \quad (4.7)$$

Η λύση της εξίσωσης αυτής έχει την ακόλουθη μορφή όταν  $\zeta < 1$ :

$$u = B\eta\mu\omega t + C \exp(-\zeta\omega_0 t)\eta\mu(\omega_0 t\sqrt{1-\zeta^2} + \phi) \quad (4.8)$$

## Απόκριση του σεισμομέτρου στην εδαφική κίνηση

Η λύση αυτή αποτελείται από δύο όρους.

$$u = B \eta \mu \omega t + C \exp(-\zeta \omega_0 t) \eta \mu(\omega_0 t \sqrt{1 - \zeta^2} + \phi) \quad (4.8)$$

$B \eta \mu \omega t$

$C \exp(-\zeta \omega_0 t) \eta \mu(\omega_0 t \sqrt{1 - \zeta^2} + \phi)$

Εκφράζει τη σχετική κίνηση του σεισμομέτρου η οποία επιβάλλεται από την κίνηση του εδάφους και γι' αυτό διατηρείται όσο περίπου και η κίνηση του εδάφους. Αυτή ονομάζεται λύση **σταθερής κατάστασης** (steady-state).

Ονομάζεται **παροδική** (transient) ή **συμπληρωματική συνάρτηση** και αντιπροσωπεύει την **ιδιοταλάντωση** του σεισμομέτρου η οποία σύντομα μειώνεται λόγω της απόσβεσης.

Η γρήγορη μείωση της ιδιοταλάντωσης του σεισμομέτρου, η οποία οφείλεται στον παράγοντα  $\exp(-\zeta \omega_0 t)$ , έχει ως συνέπεια την πιστότερη αναγραφή της εδαφικής κίνησης.

## Απόκριση του σεισμομέτρου στην εδαφική κίνηση (συνέχεια)

Από τη σχέση (4.8) προκύπτει ότι η γωνιακή συχνότητα του σεισμομέτρου με απόσβεση **δεν είναι ίση** με τη γωνιακή συχνότητα,  $\omega_o$ , του εκκρεμούς αλλά ίση με  $\omega_d$ ,

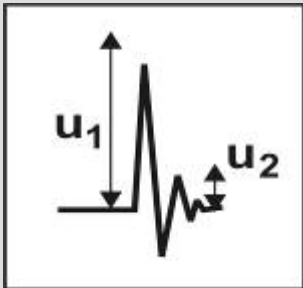
$$\omega_d = \omega_o \sqrt{1 - \zeta^2}$$

Συνεπώς, η περίοδος,  $T_d$ , του σεισμομέτρου με απόσβεση είναι:

$$T_d = \frac{T_o}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$$

Ο λόγος των πλατών  $u_1$  και  $u_2$  δύο διαδοχικών αιωρήσεων σε χρόνο  $t$  και  $t+T_d$ , όπως προκύπτει από τη σχέση (4.8), θα είναι:

$$\nu = \frac{u_1}{u_2} = \frac{C(t)}{C(t+T_d)} = \frac{Ce^{-\zeta\omega_o t}}{Ce^{-\zeta\omega_o(t+T_d)}} = e^{\zeta\omega_o T_d} \Rightarrow \ln \nu = \zeta\omega_o T_d \Rightarrow \ln \nu = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$$



Επομένως ο παράγοντας απόσβεσης,  $\zeta$ , υπολογίζεται από τη παραπάνω σχέση όταν γνωρίζουμε το **λόγο απόσβεσης**,  $\nu$ , δηλαδή, το λόγο των πλατών δύο διαδοχικών αιωρήσεων.

Δυναμική μεγέθυνση,  $U$ , σεισμομέτρου είναι ο λόγος της σχετικής μετάθεσης,  $u$ , του κέντρου βάρους του εκκρεμούς προς τη μετάθεση,  $x$ , του εδάφους:

$$U = \frac{u}{x}$$

Μια αρμονική εξωτερική (εδαφική) δύναμη  $\ddot{x}(t) = -\omega^2 A_{input} \cdot e^{i\omega t}$

όπου  $A_{input}$  είναι το πλάτος της εδαφικής μετάθεσης, προκαλεί τις παρακάτω κινήσεις στο σεισμόμετρο:

$$u(t) = A_{output} \cdot e^{i\omega t}$$

$$\dot{u}(t) = i\omega A_{output} \cdot e^{i\omega t}$$

$$\ddot{u}(t) = -\omega^2 A_{output} \cdot e^{i\omega t}$$

όπου  $A_{output}$  είναι η μετάθεση του εκκρεμούς του σεισμομέτρου.

## Απόκριση του σεισμομέτρου στην εδαφική κίνηση (συνέχεια)

Με αντικατάσταση στην εξίσωση της κίνησης του σεισμομέτρου προκύπτει ότι

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + 2\zeta\omega_o \frac{du}{dt} + \omega_o^2 u = -\frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$-\omega^2 A_{output} + 2\zeta i \omega \omega_o A_{output} + \omega_o^2 A_{output} = \omega^2 A_{input}$$

Επομένως, η απόκριση  $T(i\omega)$  του σεισμομέτρου (στο πεδίο των συχνοτήτων) είναι:

$$T(i\omega) = \frac{Output}{Input} = \frac{A_{output}}{A_{input}} = \frac{\omega^2}{\omega_o^2 - \omega^2 + i2\zeta\omega\omega_o} \quad (4.9)$$

Ενας μιγαδικός αριθμός  $z = \alpha + \beta i$  μπορεί να γραφεί ως  $z = |z| e^{i\varphi}$ , όπου  $|z|$  είναι το μέτρο και  $\varphi$  η φάση, τα οποία δίνονται από τις σχέσεις  $|z| = (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}$  και  $\varepsilon\varphi\varphi = (\beta/\alpha)$ .

Επομένως, υπολογίζοντας το μέτρο και τη φάση του  $T(i\omega)$  προκύπτει ότι:

$$U = |T(i\omega)| = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta^2 \omega_o^2 \omega^2}} \quad (4.10)$$

$$\varepsilon\varphi\varphi = -\frac{2\zeta\omega\omega_o}{\omega_o^2 - \omega^2} \quad (4.11)$$

Αν αντικαταστήσουμε στις σχέσεις (4.10) και (4.11) τις γωνιακές συχνότητες με τις αντίστοιχες περιόδους τότε προκύπτουν οι σχέσεις:

$$U = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{T^2}{T_o^2}\right)^2 + \frac{4\zeta^2 T^2}{T_o^2}}} \quad (4.12)$$

$$\varepsilon\phi\phi = \frac{2\zeta T_o T}{T_o^2 - T^2} \quad (4.13)$$

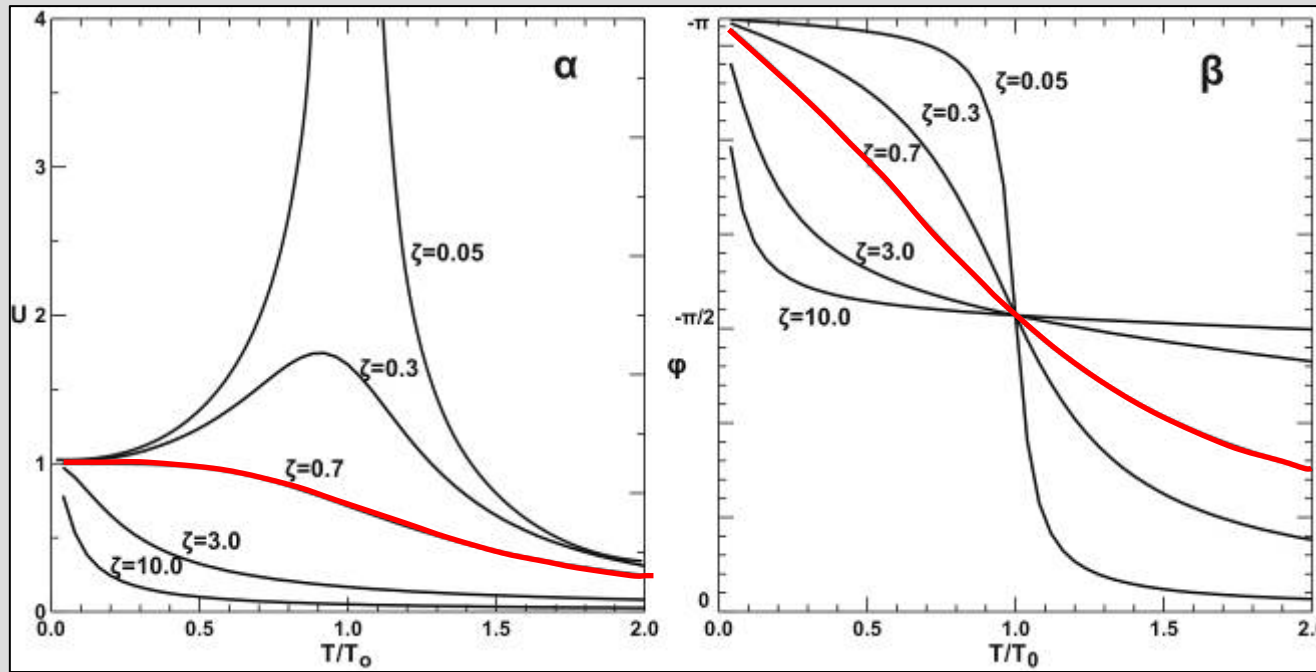
$T$  ( $=2\pi/\omega$ ) είναι η περίοδος ταλάντωσης του εδάφους  
 $T_o$  ( $=2\pi/\omega_o$ ) είναι η ιδιοπερίοδος του σεισμομέτρου.

Από τη σχέση (4.12) προκύπτει ότι στην περίπτωση συντονισμού ( $T=T_o$ ) η δυναμική μεγέθυνση (και η κίνηση του σεισμομέτρου) αποκτάει πεπερασμένη τιμή ( $1/2\zeta$ ) ενώ αν δεν υπήρχε απόσβεση ( $\zeta=0$ ), η δυναμική μεγέθυνση θα αποκτούσε πολύ μεγάλη τιμή (θεωρητικά άπειρη).

Η κίνηση του σεισμομέτρου δεν είναι ακριβώς σύγχρονη με την κίνηση του εδάφους, γιατί υπάρχει μια διαφορά φάσης,  $\phi$ , μεταξύ των δύο κινήσεων (σχέση 4.8). Αυτή η διαφορά φάσης δίνεται από τη σχέση (4.13)

Η συνηθέστερη τιμή του παράγοντα απόσβεσης είναι  $\zeta = 1/\sqrt{2} = 0.707$ . Η τιμή αυτή στην πράξη δεν έχει μεγάλη διαφορά από 0.6 ή 0.8, όμως αν θέσουμε στη σχέση (4.12)  $\zeta = 0.707$  τότε προκύπτει ότι  $U=0.707$  για  $T=T_o$ . Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην τιμή του πλάτους που ορίζουμε τη γωνιακή συχνότητα ενός φίλτρου ή διαφορετικά το σημείο  $-3dB$ . Επομένως η χρησιμοποίηση της τιμής  $\zeta = 0.707$  μας επιτρέπει να περιγράψουμε την καμπύλη απόκρισης σαν ένα υψηλοπερατό φίλτρο (high pass) δεύτερης τάξης (ίδιο με ένα φίλτρο Butterworth) με γωνιακή συχνότητα  $\omega_o$ .





Σχ. 4.6. Καμπύλες απόκρισης σεισμομέτρου για διάφορες τιμές του παράγοντα απόσβεσης,  $\zeta$  (Richter, 1958).

Από το σχήμα (4.6) προκύπτει ότι για τιμή του παράγοντα απόσβεσης περίπου 0.7

η δυναμική μεγέθυνση,  $U$ ,

και η διαφορά φάσης,  $\varphi$ ,

είναι σχεδόν γραμμικές συναρτήσεις της περιόδου,  $T$ , της σεισμικής κίνησης. Επομένως μ' αυτή την τιμή του παράγοντα απόσβεσης (συνήθως επιλέγουμε  $\zeta=0.707$ ) έχουμε την μικρότερη παραμόρφωση της αναγραφόμενης κίνησης σε σχέση με την εδαφική κίνηση, αφού τόσο οι μεγεθύνσεις των πλατών αναγραφής όσο και οι διαφορές των χρόνων αναγραφής τους από τους χρόνους πραγματοποίησης των αντίστοιχων εδαφικών κινήσεων είναι σχεδόν ανάλογες των περιόδων των εδαφικών κινήσεων.

Πολλές φορές, και ιδιαίτερα στην **Τεχνική Σεισμολογία**, ενδιαφερόμαστε όχι μόνο για τη μετάθεση  $x$  της εδαφικής κίνησης αλλά και για την **ταχύτητα**,  $v=dx/dt$ , και την **επιτάχυνση**,  $\gamma=d^2x/dt^2$ , αυτής.

Γι' αυτό πρέπει να γνωρίζουμε τις αντίστοιχες μεγεθύνσεις, οι οποίες ονομάζονται **ευαισθησία ταχύτητας**,  $Y$ , και **ευαισθησία επιτάχυνσης**,  $\Gamma$ .

Αν η εδαφική μετάθεση δίνεται από τη σχέση  $x = A\eta\mu\omega t$ , δηλαδή η κίνηση του εδάφους  $x$ , είναι αρμονική ταλάντωση πλάτους  $A$  και κυκλικής συχνότητας  $\omega$ ,

τότε η ταχύτητα,  $v$ , της εδαφικής ταλάντωσης θα είναι  $v=dx/dt$ , δηλαδή:

$$v=A\omega\eta\mu(\omega t+90^\circ)$$

και η επιτάχυνση,  $\gamma$ , της εδαφικής ταλάντωσης θα είναι  $\gamma=dv/dt$ , δηλαδή:

$$\gamma=A\omega^2\eta\mu(\omega t+180^\circ)$$

Συνεπώς, η ευαισθησία ταχύτητας θα δίνεται από τη σχέση:

$$Y = \frac{U}{\omega} \quad (4.14)$$

και η ευαισθησία επιτάχυνσης από τη σχέση:

$$\Gamma = \frac{U}{\omega^2} \quad (4.15)$$

Από την εξίσωση  $\frac{d^2u}{dt^2} + 2\zeta\omega_0 \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = -\frac{d^2x}{dt^2}$  (σχέση 4.6) προκύπτει ότι:

**A.** Όταν αν η κίνηση είναι γρήγορη, δηλαδή η περίοδος,  $T$ , της εδαφικής κίνησης είναι μικρή σε σχέση προς την ιδιοπερίοδο του σειсмоγράφου,  $T_0$  ( $T \ll T_0$  ή  $\omega \gg \omega_0$ ),

επικρατεί ο πρώτος από τους τρεις όρους του πρώτου μέλους της εξίσωσης,

δηλαδή  $d^2u/dt^2 \approx -d^2x/dt^2 \Rightarrow u \approx -x$

Επομένως η σχετική μετάθεση,  $u$ , του σεισμομέτρου ισούται με τη μετάθεση,  $-x$ , του εδάφους και συνεπώς **το σεισμόμετρο λειτουργεί ως μεταθεσιόμετρο.**

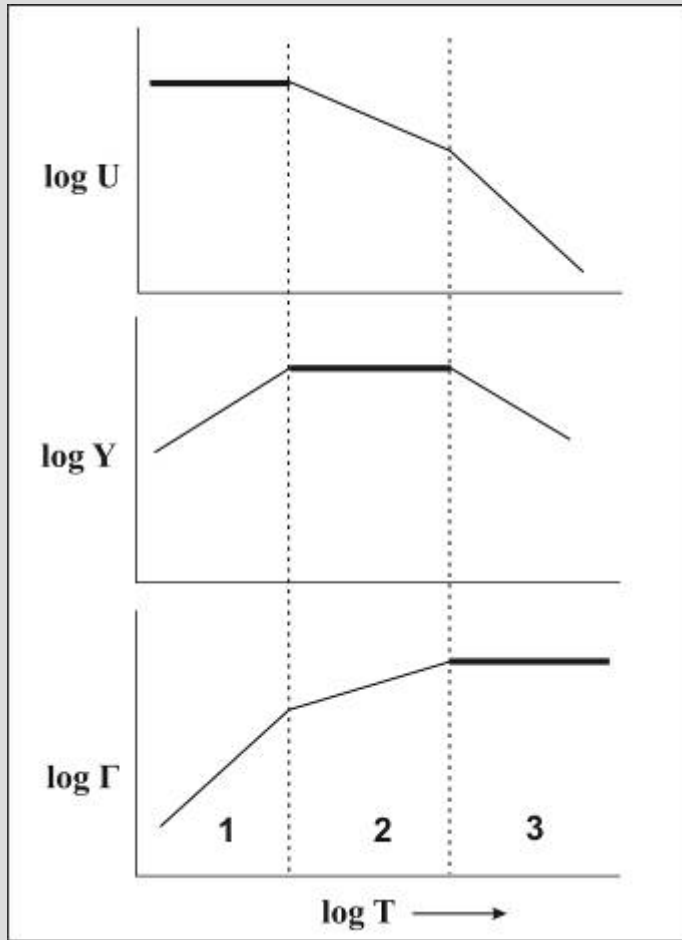
**B.** Όταν η κίνηση είναι πολύ βραδεία δηλαδή η περίοδος,  $T$ , της εδαφικής κίνησης είναι μεγάλη σε σχέση προς την ιδιοπερίοδο του σειсмоγράφου,  $T_0$  ( $T \gg T_0$  ή  $\omega \ll \omega_0$ ),

τότε επικρατεί ο τρίτος όρος  $\omega_0^2 u$  και  $u \approx -\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2x}{dt^2}$

δηλαδή η σχετική μετάθεση,  $u$ , είναι ανάλογη της επιτάχυνσης του εδάφους και συνεπώς **το σεισμόμετρο λειτουργεί ως επιταχυνσιόμετρο.**

Όταν η κίνηση είναι ενδιάμεση, η σχετική μετάθεση,  $u$ , είναι ανάλογη της ταχύτητας,  $dx/dt$ , του εδάφους και συνεπώς το σεισμόμετρο λειτουργεί ως **ταχυτητόμετρο.**

[Στα ίδια συμπεράσματα καταλήγουμε αν χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (4.12) αντί της σχέσης (4.6).]



Σχ. 4.7. Τυπικές καμπύλες απόκρισης για τη μεγέθυνση  $U$  (πάνω), για την ευαισθησία ταχύτητας  $Y$  (μέσο) και την ευαισθησία επιτάχυνσης  $\Gamma$  (κάτω).

Ένας σειсмоγράφος για να είναι γενικής χρήσης πρέπει να έχει δύο δυνατότητες:

1. Να μπορεί να καταγράφει αξιόπιστα εδαφικές κινήσεις διαφόρων πλατών (π.χ. από 1  $\mu\text{m}$  μέχρι 1 m)
2. Να μπορεί να καταγράφει αξιόπιστα εδαφικές κινήσεις διαφόρων περιόδων (π.χ. από 0.1 sec μέχρι 10000 sec).

Για το λόγο αυτό, για κάθε σειсмоγράφο πρέπει να γνωρίζουμε το ελάχιστο πλάτος,  $x_o$ , και το μέγιστο πλάτος,  $x_m$ , καθώς και την ελάχιστη και μέγιστη περίοδο της εδαφικής κίνησης που μπορεί να αναγράψει με ακρίβεια.

Ονομάζουμε δυναμικό εύρος (dynamic range), DR, ενός σειсмоγράφου το εικοσαπλάσιο του λογάριθμου του λόγου του μεγίστου,  $x_m$ , προς το ελάχιστο πλάτος,  $x_o$ , και μετριέται σε decibel (=dB).

$$DR = 20 \log \frac{x_m}{x_o} \quad (4.16)$$

Έτσι, οι κλασσικοί σειсмоγράφοι αναλογικής αναγραφής μπορούν να αναγράφουν εδαφικές κινήσεις με λόγο  $x_m/x_o=1000$ , δηλαδή έχουν δυναμικό εύρος μέχρι 60 dB ενώ οι σύγχρονοι ψηφιακοί σειсмоγράφοι μπορούν να αναγράφουν κινήσεις με λόγο 107, δηλαδή έχουν δυναμικό εύρος 140 dB.

Όσον αφορά το φάσμα περιόδων (band width) της εδαφικής κίνησης που μπορεί να αναγράψει ένας σειсмоγράφος επιδιώκεται η μεγέθυνσή του στο διάστημα αυτό να είναι σταθερή, δηλαδή, η καμπύλη απόκρισής του να είναι παράλληλη προς τον άξονα των περιόδων, όπως περίπου η καμπύλη για  $\zeta=0.7$  στο σχήμα (4.6α).

Βαθμολόγηση σεισμομέτρου είναι ο καθορισμός της μεγέθυσής του (συνήθως της πραγματικής) σε συνάρτηση με την περίοδο της εδαφικής ταλάντωσης, δηλαδή, ο καθορισμός της καμπύλης απόκρισης.

**Δυναμική μεγέθυνση,  $U$ :** Ο λόγος της μετάθεσης,  $u$ , του κέντρου βάρους του εκκρεμούς σεισμομέτρου ως προς τη μετάθεση,  $x$ , του εδάφους.

$$U = \frac{u}{x}$$

Όπως αναλύσαμε προηγουμένως η δυναμική μεγέθυνση δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται με την περίοδο,  $T$ , της σεισμικής κίνησης.

**Στατική μεγέθυνση  $V_0$ :** Ο σταθερός λόγος της αναγραφόμενης μετάθεσης  $X$  προς τη μετάθεση  $u$  του κέντρου βάρους του εκκρεμούς.

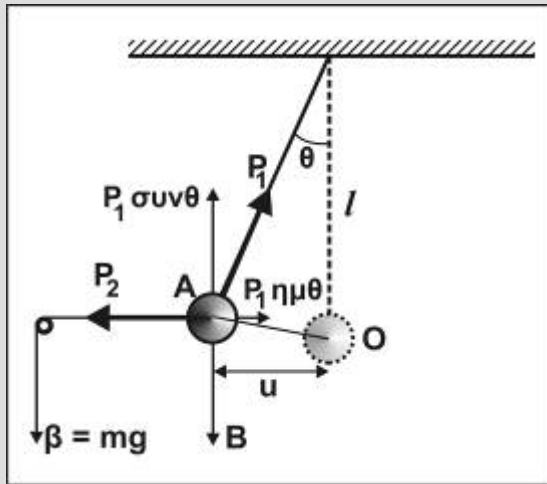
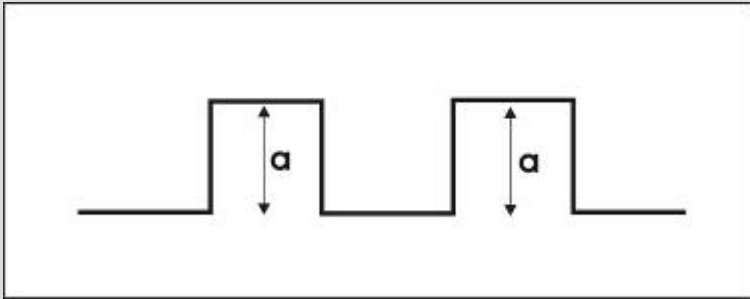
$$V_0 = \frac{X}{u}$$

Η μετάθεση,  $u$ , του κέντρου βάρους του εκκρεμούς σεισμομέτρου μεγεθύνεται με κατάλληλα συστήματα, όπως με σύστημα μοχλών (στα ηλεκτρομαγνητικά σεισμόμετρα η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στην έξοδο του σεισμομέτρου και είναι ανάλογη της ταλάντωσης του εκκρεμούς μεγεθύνεται με ηλεκτρονικά κυκλώματα). Η στατική μεγέθυνση είναι ένας σταθερός αριθμός που συνήθως δίνεται από τον κατασκευαστή του σεισμομέτρου.

**Πραγματική μεγέθυνση,  $V$ :** Ο λόγος του πλάτους,  $X$ , της αναγραφόμενης κίνησης προς το αντίστοιχο πλάτος,  $x$ , της σεισμικής κίνησης.

$$V = UV_0 = \frac{X}{x}$$

Η κατασκευή μηχανικών σεισμογράφων άρχισε από τον J.A. Ewing και τους συνεργάτες του στο πανεπιστήμιο του Tokyo και οι σεισμογράφοι αυτοί κατέγραψαν τον πρώτο σεισμό το 1880. Τέτοιοι σεισμογράφοι λειτούργησαν σε όλη τη διάρκεια του 20ου αιώνα σε διάφορα μέρη της Γης και ορισμένοι απ' αυτούς βρίσκονται ακόμα σε λειτουργία.



Σχ. 4.8. Εκτροπή,  $\alpha$ , που προκαλείται από μικρό βάρος,  $\beta$ , για τον υπολογισμό της στατικής μεγέθυνσης σεισμομέτρου μηχανικής αναγραφής.

Για τον υπολογισμό της στατικής μεγέθυνσης ασκούμε στο εκκρεμές του σεισμομέτρου γνωστή δύναμη  $\beta = mg$  (π.χ. με μικρό βάρος), οπότε το άκρο της γραφίδας μετατοπίζεται, κατά  $\alpha$  (το οποίο μετράμε) και το εκκρεμές ισορροπεί στη νέα θέση.

Εκφράζουμε:

α) τη ροπή,  $P_1$ , του βάρους του εκκρεμούς ως προς τον άξονα αιώρησης σε συνάρτηση με τη μάζα,  $M$ , του εκκρεμούς, με τη στατική μεγέθυνση,  $V_o$ , με την εκτροπή,  $\alpha$ , και με την επιτάχυνση της βαρύτητας,  $g$ ,

β) τη ροπή,  $P_2$ , του μικρού βάρους  $\beta$  ως προς τον ίδιο άξονα, σε συνάρτηση με τα  $m$ ,  $g$  και την ιδιοπερίοδο,  $T_o$ , του εκκρεμούς.

Υπό την επίδραση του βάρους  $\beta = mg$  το άκρο της γραφίδας εκτρέπεται κατά  $u = OA$ . Οι δυνάμεις που ασκούνται στο σημείο A είναι  $P_1 \eta\mu\theta = P_2 \beta$  και  $P_1 \sigma\upsilon\nu\theta = B$ . Επειδή η γωνία  $\theta$  είναι μικρή ισχύει  $\epsilon\phi\theta (= \beta/B) \approx \eta\mu\theta = u/l$ . Η στατική μεγέθυνση δίνεται από τη σχέση  $V_o = \alpha/u$  ενώ  $T_o = 2\pi \sqrt{l/g}$ . Από τα παραπάνω, εύκολα προκύπτει ότι:

$$V_o = \frac{4\pi^2 M}{gm} \cdot \frac{\alpha}{T_o^2}$$

## Σημαντικότεροι τύποι μηχανικών σειсмоγράφων

Ένας από τους παλιού τύπου σειсмоγράφους μηχανικής αναγραφής είναι ο οριζόντιος σειсмоγράφος **Mainka**. Αυτός γράφει τις δύο οριζόντιες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης. Αποτελείται από δύο εκκρεμής κεκλιμένου άξονα αιώρησης (σχ. 4.2α) των οποίων τα επίπεδα είναι κάθετα μεταξύ τους. Η απόσβεση των αιωρήσεων των εκκρεμών του σειсмоγράφου Mainka γίνεται με αέρα.

Άλλος παλιός τύπος σειсмоγράφου μηχανικής αναγραφής είναι ο σειсмоγράφος **Wiechert**. Ο οριζόντιος σειсмоγράφος Wiechert αναγράφει τις δύο οριζόντιες συνιστώσες της σεισμικής κίνησης. Αυτός περιλαμβάνει ανάστροφο εκκρεμές (σχ. 4.2β), το οποίο έχει σχήμα κυλίνδρου. Η απόσβεση και στο σειсмоγράφο Wiechert γίνεται με σύνδεση των μοχλών με συσκευή απόσβεσης με αέρα. Η μάζα των εκκρεμών των σειсмоγράφων Wiechert είναι συνήθως της τάξης των **1000 kg** και η στατική μεγέθυνση της τάξης των **200**. Υπάρχουν, όμως, σειсмоγράφοι αυτού του τύπου που τα εκκρεμή τους έχουν μάζα της τάξης των **20 τόνων** και στατική μεγέθυνση της τάξης των **1500**. Για το λόγο αυτό, οι σειсмоγράφοι αυτοί έχουν μεγάλο όγκο. Η ιδιοπερίοδος του εκκρεμούς του κατακορύφου σειсмоγράφου είναι περίπου **1 sec** και του οριζοντίου **3-12 sec**.

Ένας από τους πρώτους σειсмоγράφους που συνέβαλαν σημαντικά στην ανάπτυξη της Σεισμολογίας είναι ο οπτικής αναγραφής σειсмоγράφος **Milne-Show**, τον οποίον επινόησε ο Άγγλος Milne και βελτίωσε ο συμπατριώτης του Show το 1915. Αυτός ο σειсмоγράφος αποτελείται από εκκρεμές κεκλιμένου άξονα (σχ. 4.2α). Στη μάζα του σεισμομέτρου είναι στερεωμένος καθρέφτης, στον οποίον ανακλάται φωτεινή δέσμη που δίνει αναγραφή πάνω σε φωτογραφική ταινία. Η μάζα του εκκρεμούς είναι **454 gr**, η ιδιοπερίοδος του **10 sec** και η μεγέθυνση του οργάνου κυμαίνεται μεταξύ **150 και 350**.

Άλλος τύπος σειсмоγράφου οπτικής αναγραφής είναι ο οριζόντιος σειсмоγράφος **Wood-Anderson**, που κατασκευάστηκε το 1925 στις Η.Π.Α. Αυτός αποτελείται από εκκρεμές στρέψης (σχ. 4.2γ), στη μάζα του οποίου βρίσκεται ο καθρέπτης. Έχουν κατασκευαστεί δύο τύποι σειсмоγράφων Wood-Anderson. **Ο ένας απ' αυτούς, που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του τοπικού μεγέθους, έχει ιδιοπερίοδο 0.80 sec και μέγιστη τυπική μεγέθυνση 2800.**



## Ηλεκτρομαγνητικοί σειсмоγράφοι

Τον πρώτο ηλεκτρομαγνητικό σειсмоγράφο επινόησε και κατασκεύασε ο Galitzin το 1904 και παρέμεινε για πάνω από μισόν αιώνα ο πιο αξιόπιστος μακράς περιόδου σειсмоγράφος. Οι σειсмоγράφοι αυτού του τύπου αποτέλεσαν μέχρι πρόσφατα και σε πολλούς σταθμούς αποτελούν ακόμα τα βασικά όργανα αναγραφής των σεισμών.

Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά σεισμόμετρα χρησιμοποιούν έναν μετατροπέα ταχύτητας (velocity transducer) για να «μετράνε» την κίνηση της μάζας του εκκρεμούς. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι η μετακίνηση ενός πηνίου μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Αυτό επιτυγχάνεται θέτοντας το μαγνήτη να κινείται μαζί με τη μάζα του εκκρεμούς ενώ το πηνίο είναι ακίνητο ή το αντίθετο, δηλαδή ο μαγνήτης να είναι ακίνητος ενώ το πηνίο να κινείται μαζί με το εκκρεμές.

Η «έξοδος» του πηνίου είναι και στις δύο περιπτώσεις ανάλογη της ταχύτητας κίνησης της μάζας σε σχέση με το ακίνητο πλαίσιο. Για τον λόγο αυτό τα ηλεκτρομαγνητικά σεισμόμετρα αυτού του τύπου συνήθως ονομάζονται «μετατροπείς ταχύτητας» (velocity transducers).

Λόγω αυτής της λειτουργίας του σεισμομέτρου υπεισέρχονται δύο ακόμα σταθερές οι οποίες χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του:

1. Σταθερά Πηνίου Σήματος (Generator [or signal] coil Constant)  $G_c$ .

Συνδέει την ταχύτητα της εδαφικής κίνησης με την έξοδο (σε Volts) του πηνίου και έχει μονάδες  $V/m.s^{-1}$ . Τυπικές τιμές είναι μεταξύ 30 και 500  $V/m.s^{-1}$ .

2. Αντίσταση Πηνίου Σήματος (Generator [or signal] Coil Resistance)  $R_c$ .

Είναι η αντίσταση του πηνίου σήματος γεννήτριας σε ohms.

Στα ηλεκτρομαγνητικά σεισμόμετρα η καμπύλη απόκρισης είναι διαφορετική από αυτή που δίνεται από τις σχέσεις (4.10) και (4.12). Η έξοδος του σεισμομέτρου ( $A_{output}$  στη σχέση (4.9) είναι ανάλογη της ταχύτητας ( $i\omega A_{output}$ ) και επομένως η σχέση (4.9) γίνεται:

$$T(i\omega) = \frac{Output}{Input} = \frac{i\omega A_{output}}{A_{input}} = \frac{i\omega\omega^2}{\omega_o^2 - \omega^2 + i2\zeta\omega\omega_o} = \frac{i\omega^3}{\omega_o^2 - \omega^2 + i2\zeta\omega\omega_o}$$

Η μόνη επομένως διαφορά με τα μηχανικά σεισμόμετρα είναι ο παράγοντας  $i\omega$ . Στη σχέση αυτή οι μονάδες είναι  $m/m.s^{-1}$ . Αν θέλουμε να αντιστοιχίσουμε την εδαφική κίνηση με την έξοδο του σεισμομέτρου (σε *Volts*) τότε πρέπει να πολλαπλασιάσουμε με  $G_c$  ( $V/m.s^{-1}$ ) και οι μονάδες της συνάρτησης απόκρισης του σεισμομέτρου στην εδαφική κίνηση είναι  $V/m$ , και η αντίστοιχη σχέση (4.9) γίνεται

$$T(i\omega) = \frac{i\omega^3 G_c}{\omega_o^2 - \omega^2 + i2\zeta\omega\omega_o}$$

Κατά σύμβαση θέλουμε όταν η εδαφική κίνηση είναι προς τα επάνω ή προς το Βορρά ή προς την Ανατολή να είναι επίσης θετική η έξοδος του σεισμομέτρου. Όμως επειδή η αρχική κίνηση του εκκρεμούς είναι αντίθετης φοράς με την κίνηση του εδάφους η παραπάνω σχέση πολλαπλασιάζεται με  $-1$  και γίνεται

$$T(i\omega) = \frac{-i\omega^3 G_c}{\omega_o^2 - \omega^2 + i2\zeta\omega\omega_o}$$

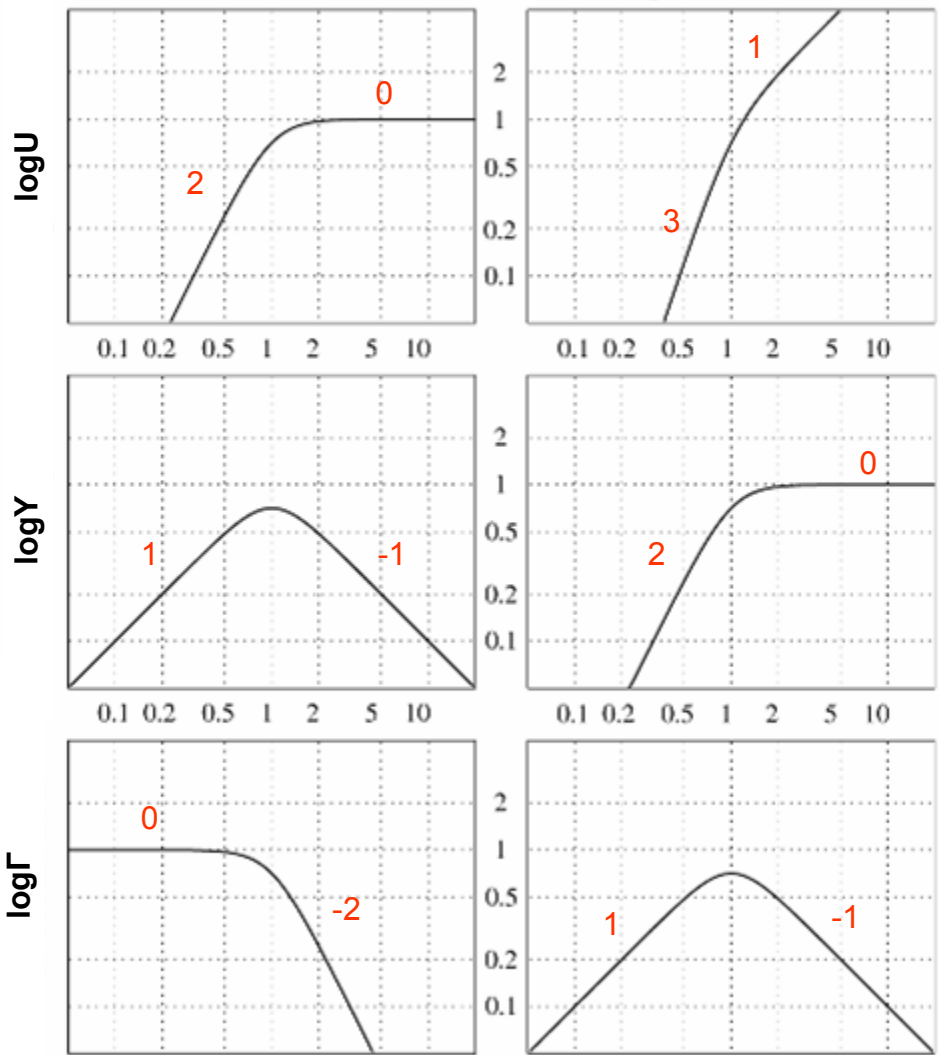
Επειδή πάντα το σεισμόμετρο συνδέεται με εξωτερική αντίσταση  $R_e$  (για τον καθορισμό του παράγοντα απόσβεσης και επίσης επειδή οι ενισχυτές του σήματος έχουν την δική τους εσωτερική αντίσταση) η τελική σταθερά  $G_e$  του πηνίου σήματος είναι

$$G_e = G_c \frac{R_e}{R_e + R_c}$$

Η τιμή αυτή πρέπει να χρησιμοποιείται αντί της  $G_c$ .

Μηχανικό σεισμόμετρο

Ηλεκτρομαγνητικό σεισμόμετρο



Κανονικοποιημένη συχνότητα (  $\log (\omega/\omega_0)$  )

Τυπικές καμπύλες απόκρισης για τη μεγέθυνση  $U$  (πάνω), για την ευαισθησία ταχύτητας  $Y$  (μέσο) και την ευαισθησία επιτάχυνσης  $\Gamma$  (κάτω) σε συνάρτηση με το λογάριθμο της κανονικοποιημένης συχνότητας  $\omega/\omega_0$ , για τα μηχανικά σεισμόμετρα (αριστερά) και τα ηλεκτρομαγνητικά σεισμόμετρα (δεξιά). Ο αριθμός δίπλα σε κάθε καμπύλη είναι η κλίση της καμπύλης.

Manual of Observatory Practice, (P. Bormann & E. Bergmann, 2002)

## Βαθμολόγηση ηλεκτρομαγνητικού σειсмоγράφου

Η αναλυτική σχέση,  $V=V(T)$ , μεταξύ της μεγέθυνσης και της περιόδου για τα ηλεκτρομαγνητικά σεισμόμετρα, μπορεί να καθορισθεί **θεωρητικά** και να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της μεγέθυνσης, όταν γνωρίζουμε τις σταθερές του σεισομέτρου, γιατί οι σταθερές αυτές μπαίνουν ως παράμετροι στη σχέση αυτή.

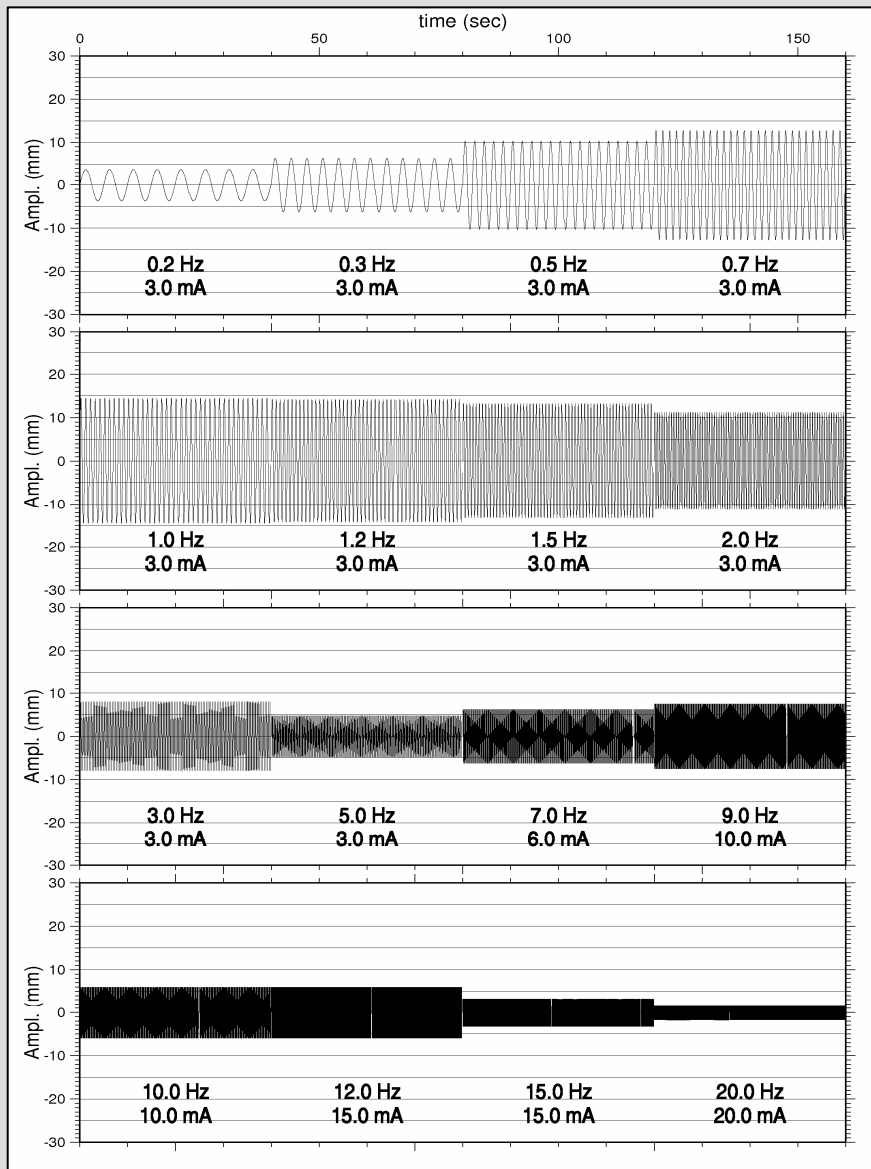
Απαιτείται, για το σκοπό αυτό, ακριβής γνώση των σταθερών αυτών για τον ακριβή καθορισμό της μεγέθυνσης με βάση την αναλυτική (αλγεβρική) αυτή σχέση. Όμως, ο ακριβής προσδιορισμός των σταθερών των ηλεκτρομαγνητικών σεισομέτρων δεν είναι εύκολος. Για το λόγο αυτό εφαρμόζονται **πειραματικές μέθοδοι** για τη βαθμολόγηση των ηλεκτρομαγνητικών σεισομέτρων.

Με γεννήτρια εναλλασσομένου ημιτονοειδούς ρεύματος (ταλαντώτρια) διαβιβάζεται στο σεισμόμετρο ηλεκτρικό ρεύμα γνωστής έντασης,  $i$ , και περιόδου,  $T$ , που βάζει το εκκρεμές του σεισομέτρου σε ταλάντωση και μετρίεται το πλάτος αναγραφής,  $X$ . Υπολογίζεται, κατόπιν, θεωρητικά το αντίστοιχο πλάτος,  $x$ , της εδαφικής μετάθεσης που θα προκαλούσε το ίδιο πλάτος αναγραφής και με διαίρεση των δύο ποσοτήτων βρίσκεται η μεγέθυνση  $V (=X/x)$  που αντιστοιχεί στην περίοδο  $T$ . Μεταβάλλοντας την περίοδο του εναλλασσομένου ρεύματος και επαναλαμβάνοντας τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς βρίσκουμε τις αντίστοιχες τιμές της μεγέθυνσης, δηλαδή, βαθμολογούμε το σεισμόμετρο.

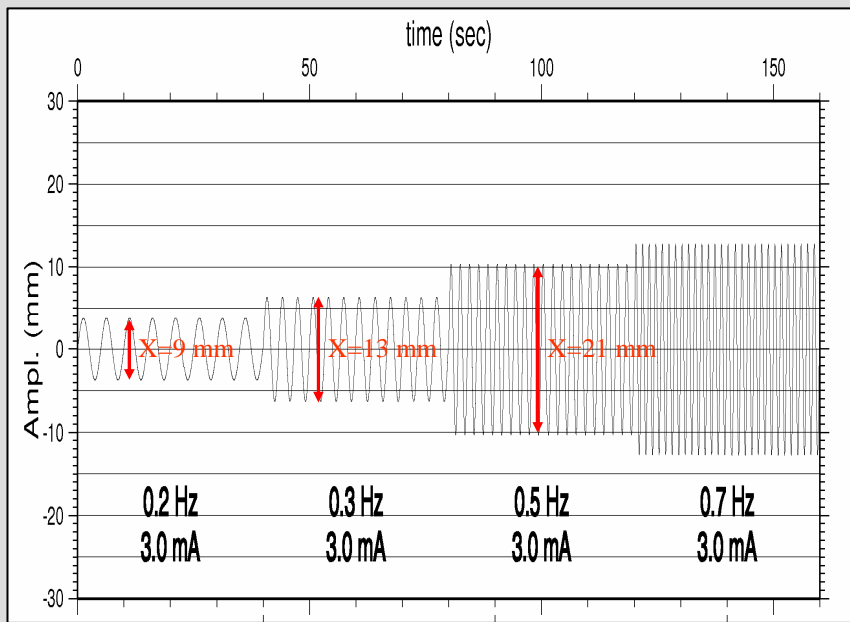
Τα σύγχρονα σεισμόμετρα φέρουν πρόσθετο πηνίο (πηνίο βαθμολόγησης) στο οποίο διαβιβάζεται από τη γεννήτρια εναλλασσόμενο ρεύμα έντασης  $i$  (σε *Amperes*) και περιόδου  $T$  (σε *sec*) για τη βαθμολόγηση του σεισομέτρου. Αν είναι  $G$  (σε *Nt/Ampere*) η σταθερά του πηνίου βαθμολόγησης, το πλάτος,  $x$ , της μετάθεσης της αντίστοιχης εδαφικής κίνησης (σε  $m$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$x = \frac{G \cdot i}{4\pi^2 m} T^2 \quad (4.17)$$

όπου  $m$  είναι η μάζα του σεισομέτρου σε *kgr*.



Σχ. 4.9. Αναγραφές ηλεκτρομαγνητικού σεισμομέτρου στο οποίο με γεννήτρια εναλλασσομένου ημιτονοειδούς ρεύματος (ταλαντώτρια) διαβιβάζουμε ηλεκτρικό ρεύμα γνωστής έντασης,  $i$ , και συχνότητας,  $f$ . Οι τιμές τους αναγράφονται κάτω από τις αντίστοιχες καταγραφές.



Παράδειγμα βαθμολόγησης (από το σχήμα 4.9)

Το σεισμόμετρο διαθέτει ένα πηνίο βαθμολόγησης σταθεράς  $G$ , στο οποίο διαβιβάζεται ηλεκτρικό ρεύμα έντασης,  $i$ , και συχνότητας,  $f$ .

$$G = 0.1975 \text{ Nt/Ampere} \quad (1 \text{ Nt} = \text{Kgr.m/sec}^2)$$

$$m = 5 \text{ Kg}$$

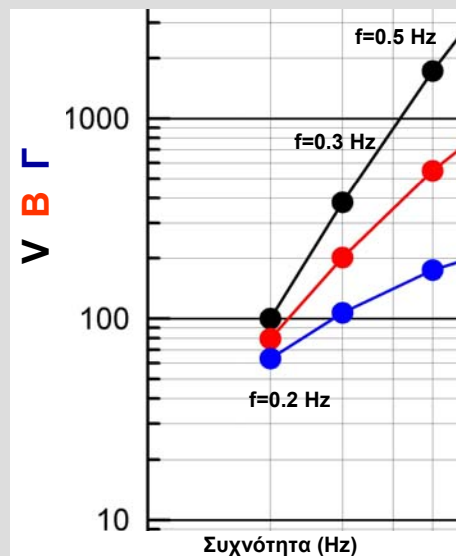
Μετράμε στο σεισμόγραμμα τα πλάτη  $X$ .

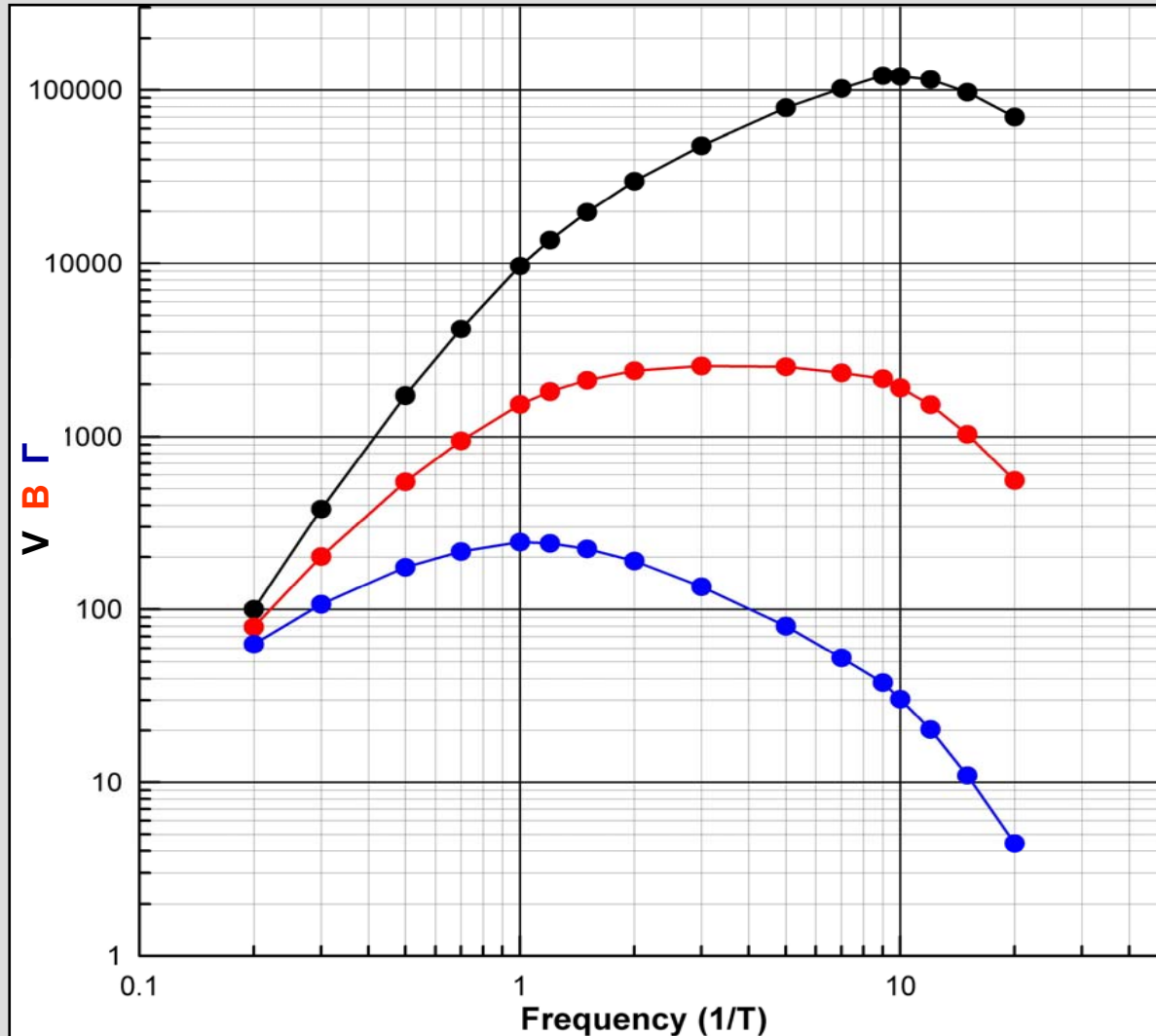
Υπολογίζουμε από τη σχέση (4.16):  $x = Gi/4\pi^2 f^2$  τα αντίστοιχα εδαφικά πλάτη  $x$ .

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τις ποσότητες  $V = x/X$ ,  $Y = V/\omega$  και  $\Gamma = B/\omega$ .

Χαρτογραφούμε τις τιμές  $V, Y, \Gamma$  σε συνάρτηση με τη συχνότητα  $f$  (καμπύλη απόκρισης).

$f$ (Hz)	$i$ (mA)	$X$ (mm)	$x$ (mm)	$V$	$Y$	$\Gamma$
0.2	3	9	0.0750	120	95	76
0.3	3	13	0.0333	390	207	110
0.5	3	21	0.012	1750	557	177



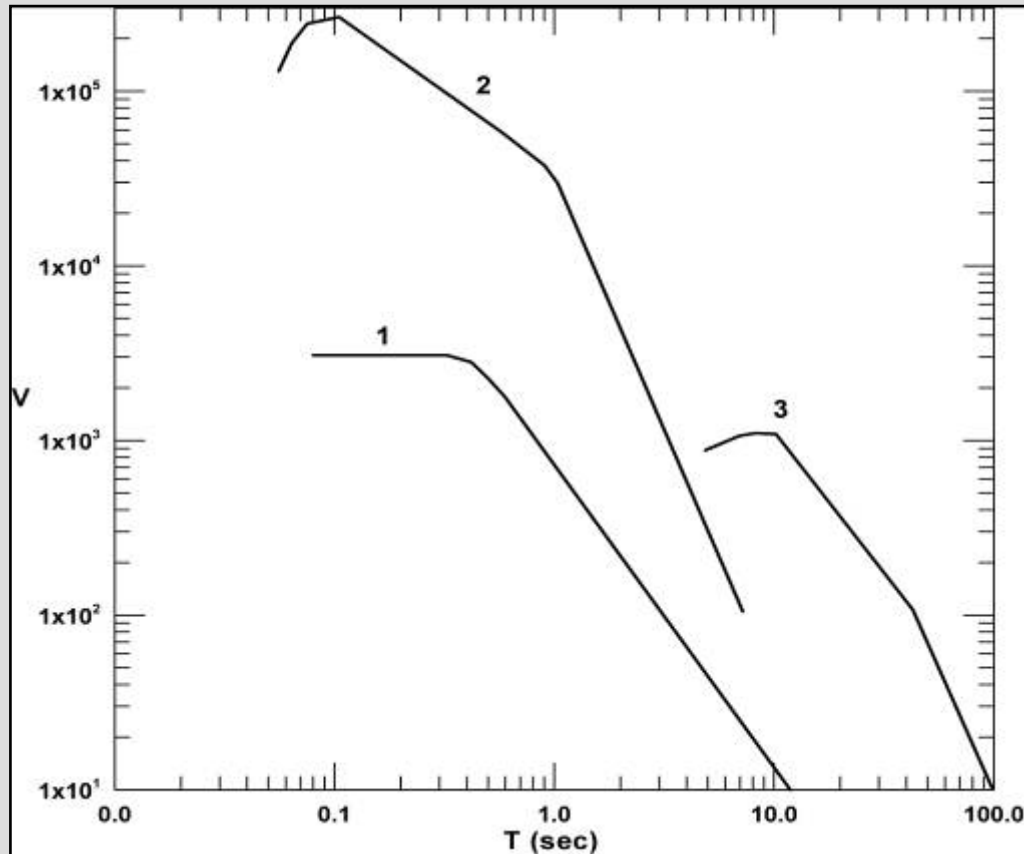


Σχ. 4.10. Καμπύλες απόκρισης του σεισμομέτρου με τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην προηγούμενη διαφάνεια και υπολογίστηκαν με βάση τα δεδομένα του σχήματος 4.9.

Το σεισμόμετρο είναι τύπου S-13 Teledyne - Geotech, με ιδιοπερίοδο  $T_0=1$  sec.

Τα σεισμόμετρα αυτά χρησιμοποιούνται στο δίκτυο σεισμολογικών σταθμών του Εργαστηρίου Γεωφυσικής του Α.Π.Θ.



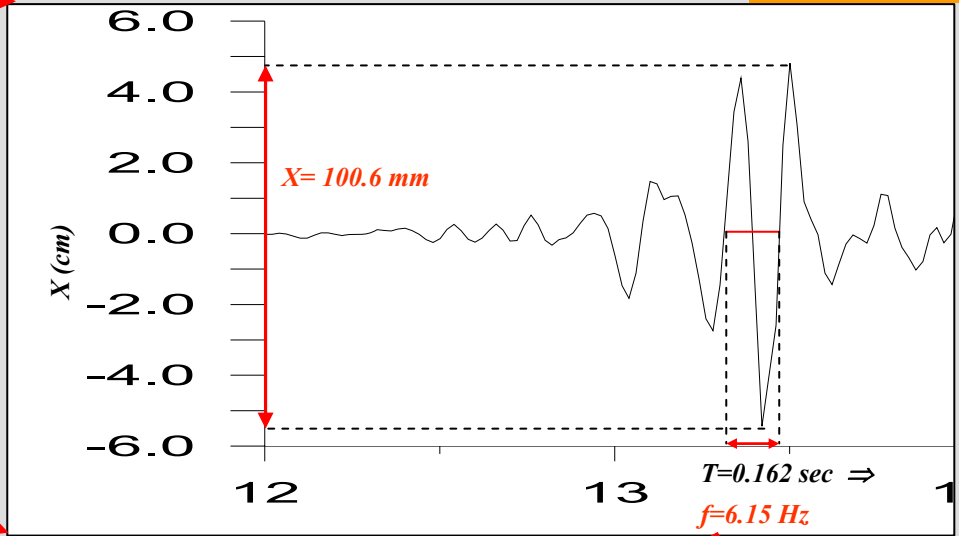
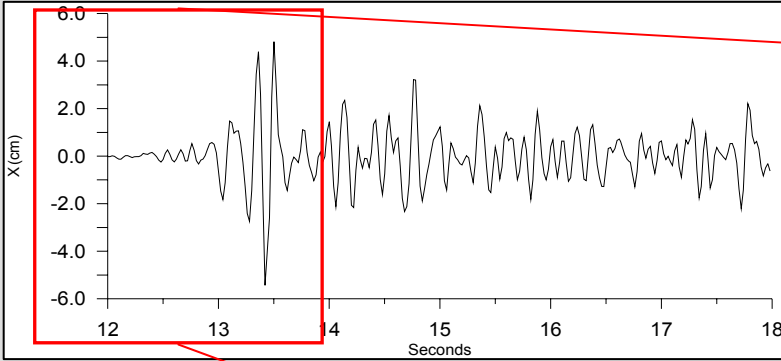


Σχ. 4.11. Καμπύλες απόκρισης (μεγέθυνση της εδαφικής μετάθεσης) για το σεισμόμετρο Wood-Anderson (1), για το βραχείας περιόδου σεισμόμετρο (2) και το μακράς περιόδου σεισμόμετρο (3) του Εργαστηρίου Γεωφυσικής του Α.Π.Θ.

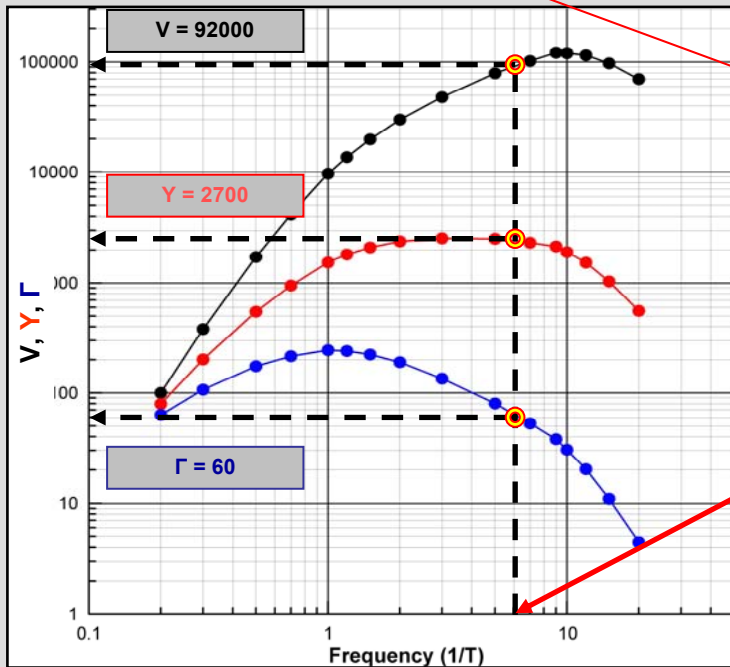
## Βαθμολόγηση ηλεκτρομαγνητικού σεισμογράφου (συνέχεια)

Παράδειγμα χρησιμοποίησης της καμπύλης απόκρισης για την εύρεση της πραγματικής εδαφικής κίνησης. Δίνεται το σεισμόγραμμα του σχήματος και έστω ότι θέλουμε να υπολογίσουμε την πραγματική εδαφική κίνηση που αντιστοιχεί στο μέγιστο πλάτος του σεισμογράμματος.

1. Μετράμε στο σεισμόγραμμα: το μέγιστο πλάτος και την αντίστοιχη περίοδο.



2. Υπολογίζουμε από την καμπύλη απόκρισης τις μεγεθύνσεις  $V$ ,  $Y$ ,  $\Gamma$  που αντιστοιχούν στη συχνότητα που μετρήσαμε στο σεισμόγραμμα.



3. Κάνουμε τις πράξεις:

A. Εδαφική μετάθεση:

$$V = X/x \Rightarrow x = 100.6/92000 = 0.00109 \text{ mm} = 1.09 \mu\text{m}$$

B. Εδαφική ταχύτητα

$$v = 100.6/2700 = 0.0373 \text{ mm/sec}$$

Γ. Εδαφική επιτάχυνση

$$\gamma = 100.6/60 = 1.677 \text{ mm/sec}^2$$

Υπάρχουν δύο είδη ηλεκτρομαγνητικών σειсмоγράφων.

### Σειсмоγράφοι κινουμένου πηνίου

#### Σειсмоγράφοι μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης.

Ο πρώτος σειсмоγράφος κινουμένου πηνίου είναι ο σειсмоγράφος **Galitzin**, από το όνομα του Ρώσου επιστήμονα που το κατασκεύασε. Η αρχή λειτουργίας του σειсмоγράφου αυτού δείχνεται στο σχήμα (4.4 κάτω). Υπάρχει κατακόρυφο αλλά και οριζόντιο σεισμόμετρο Galitzin στο οποίο χρησιμοποιείται εκκρεμές κεκλιμένου επιπέδου (σχ. 4.2α). Το όργανο που κατασκεύασε αρχικά ο Galitzin είχε ιδιοπερίοδο περίπου **10 sec** και μέγιστη μεγέθυνση **4400**. Το 1920 ο Gutenberg διασκεύασε το σειсмоγράφο αυτόν σε άλλον του οποίου η ιδιοπερίοδος είναι **3 sec**.

Διάφοροι τύποι σειсмоγράφων κινουμένου πηνίου βρίσκονται σήμερα σε λειτουργία, όπως είναι οι σειсмоγράφοι **Kirnos-Kharin**, **Hiller**, **Willmore**, και ο **σειсмоγράφος Press-Ewing** του οποίου το σεισμόμετρο έχει ιδιοπερίοδο, συνήθως, **15 sec** και το γαλβανόμετρο **90 sec**.

Ο πιο γνωστός σειсмоγράφος μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης είναι ο σειсмоγράφος **Benioff**. Ο κατακόρυφος **σειсмоγράφος Benioff** περιλαμβάνει σεισμόμετρο μάζας **100 kg** που κρέμεται σε κατακόρυφο ελατήριο και το κάτω άκρο της συνδέεται με τους δύο σπλισμούς ηλεκτρομαγνήτη γύρω από τους οποίους είναι τυλιγμένα πηνία. Κατά την κίνηση της μάζας του εκκρεμούς κινούνται οι δύο σπλισμοί ως προς το μαγνήτη που βρίσκεται μεταξύ τους, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης και τη δημιουργία τάσης στα άκρα των πηνίων. Τα άκρα των πηνίων συνδέονται με τους ακροδέκτες γαλβανομέτρου και γίνεται καταγραφή της σεισμικής κίνησης κατά το συνηθισμένο τρόπο (σχ. 4.4 κάτω). Η ιδιοπερίοδος του είναι **1 sec** και συνδέεται συνήθως με γαλβανόμετρο μικρής περιόδου, αλλά μπορεί να συνδεθεί και με μεγάλης περιόδου γαλβανόμετρο (**80-100 sec**) για την αναγραφή σεισμικών κινήσεων μεγάλης περιόδου. Η μεγέθυνση μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές (**~1000000**). Η μέγιστη τιμή ρυθμίζεται με βάση τη στάθμη του εδαφικού θορύβου στο σεισμολογικό σταθμό. Η κατασκευή και λειτουργία του οριζοντίου σειсмоγράφου Benioff είναι παρόμοια με την κατασκευή και λειτουργία του κατακόρυφου σειсмоγράφου. Σ' αυτό υπάρχουν ελάσματα που εμποδίζουν τις κατακόρυφες κινήσεις.

Κατά την περίοδο μετάβασης από τους ηλεκτρομαγνητικούς στους ηλεκτρονικούς σειсмоγράφους (1960-1975) κατασκευάστηκαν τόσο **βραχείας περιόδου** ηλεκτρομαγνητικοί σειсмоγράφοι (π.χ. σειсмоγράφος Benioff), όσο και **μακράς περιόδου** ηλεκτρομαγνητικοί σειсмоγράφοι (π.χ. σειсмоγράφος Press-Ewing).

Ένας σοβαρός λόγος για την κατασκευή και λειτουργία των δύο αυτών ειδών σειсмоγράφων υπήρξε η αποφυγή αναγραφής εδαφικού θορύβου που προκαλείται από θαλάσσια κύματα και έχει περίοδο **6 sec** περίπου.

Έτσι, κατά το μέσο της δεκαετίας του 1960 τέτοιοι σειсмоγράφοι αποτέλεσαν το **Διεθνές Δίκτυο Τυποποιημένων Σειсмоγράφων WWSSN (World Wide Standardized Seismic Network)**. Κάθε ένας από αυτούς τους 130 περίπου σεισμολογικούς σταθμούς περιλαμβάνει ένα κατακόρυφο (Z) και δύο οριζόντιους (NS, EW) μακράς περιόδου σειсмоγράφους (τύπου Press-Ewing) και αντίστοιχους βραχείας περιόδου σειсмоγράφους (τύπου Benioff). Οι σειсмоγράφοι αυτοί είναι σχετικώς *μικρού φάσματος περιόδων* (narrow band). Παρ' ότι ορισμένοι απ' αυτούς έχουν μεγάλη μέγιστη μεγέθυνση (high gain), το δυναμικό τους εύρος είναι επίσης σχετικώς μικρό (μέχρι 60 db), επειδή η αναγραφή είναι αναλογική και η αναγραφή του ελάχιστου πλάτους περιορίζεται από το πάχος του ίχνους της φωτεινής κηλίδας (~0.2 mm) και του μέγιστου πλάτους από τη διάσταση του φωτογραφικού χαρτιού αναγραφής (~20 cm).

Οι μηχανικοί και οι ηλεκτρομαγνητικοί σειсмоγράφοι δεν μπορούν:

α) να έχουν μεγάλο δυναμικό εύρος, ώστε να καταγράφουν αξιόπιστα τόσο τις ασθενείς όσο και τις ισχυρές εδαφικές δονήσεις

β) να έχουν καμπύλη απόκρισης παράλληλη προς τον άξονα των περιόδων ώστε ένας σειсмоγράφος να αναγράφει με την ίδια μεγέθυνση κύματα τόσο βραχείας όσο και μακράς περιόδου.

Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίστηκαν με την κατασκευή **ηλεκτρονικών σειсмоγράφων** κατά την τελευταία εικοσαετία.

Το πρόβλημα της αύξησης του δυναμικού εύρους λύθηκε με την κατασκευή **ψηφιακών σειсмоγράφων (καταγραφών)**

Το πρόβλημα της αύξησης του φάσματος περιόδων με την κατασκευή **σεισομέτρων ευρέος φάσματος**.

Οι πρώτοι ψηφιακοί σειсмоγράφοι κατασκευάστηκαν γύρω στο 1965 και μέσα σε μια δεκαετία βελτιώθηκαν ώστε να αποκτήσουν τις σημερινές τους μεγάλες δυνατότητες.

Για την καταγραφή ενός σεισμού σε ψηφιακή (digital) μορφή, το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από το σεισμό σε ένα ηλεκτρομαγνητικό σεισμόμετρο πρέπει να ενισχυθεί και να μετατραπεί σε ψηφιακή μορφή με έναν **αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (ADC=Analog-to-Digital Converter)**.

Ο **ψηφιοποιητής (digitizer)** λαμβάνει, από το συνεχές σήμα, δείγματα ανά σταθερά χρονικά διαστήματα τα οποία είναι συνήθως της τάξης των 0.005-10 sec (συχνότητα δειγματοληψίας 0.1-200 Hz) και η σειρά των ψηφιακών δεδομένων καταγράφεται σε συσκευή με ψηφιακή μνήμη.

Σύγχρονοι ψηφιοποιητές έχουν ανάλυση **24 bits** ως **32 bits** (το πρώτο ψηφίο χρησιμοποιείται για το πρόσημο) και μπορούν να καταγράψουν χωρίς κορεσμό μέγιστα **πλάτη 107** έως **109** τα οποία αντιστοιχούν σε δυναμικά εύρη **140 db** έως **185 db**.

Ένας ψηφιακός σειсмоγράφος με δυναμικό εύρος **140 db** μπορεί να καταγράψει χωρίς κορεσμό τόσο σεισμούς με μεγέθη **M>5** σε επικεντρικές αποστάσεις μικρότερες των **10 km**, όσο και σεισμούς με μεγέθη **M>9** σε επικεντρικές αποστάσεις μικρότερες από **30°**, δηλαδή, ο ίδιος σειсмоγράφος καταγράφει τόσο κοντινούς όσο και μακρινούς σεισμούς.

Ο βασικότερος λόγος για τον οποίο οι κλασσικοί σεισμογράφοι μηχανικού και ηλεκτρομαγνητικού τύπου δεν αναγράφουν πιστά την εδαφική ταλάντωση είναι το ότι η μάζα του εκκρεμούς δεν παραμένει σε σταθερή θέση σε σχέση με το πλαίσιο κατά την κίνηση του εδάφους, με συνέπεια η αναγραφόμενη κίνηση να επηρεάζεται και από τη σχετική κίνηση εκκρεμούς-πλαισίου, ιδιαίτερα όταν η εδαφική κίνηση είναι ισχυρή. Έτσι, οι σεισμογράφοι αυτοί δεν αναγράφουν τις εδαφικές κινήσεις διαφόρων περιόδων με την ίδια μεγέθυνση.

Αποτελεσματική λύση στο πρόβλημα αυτό έδωσε η πρόσφατη εφεύρεση του **συστήματος εξάσκησης δύναμης επαναφοράς σε ισορροπία (force-balanced) της μάζας του εκκρεμούς.**

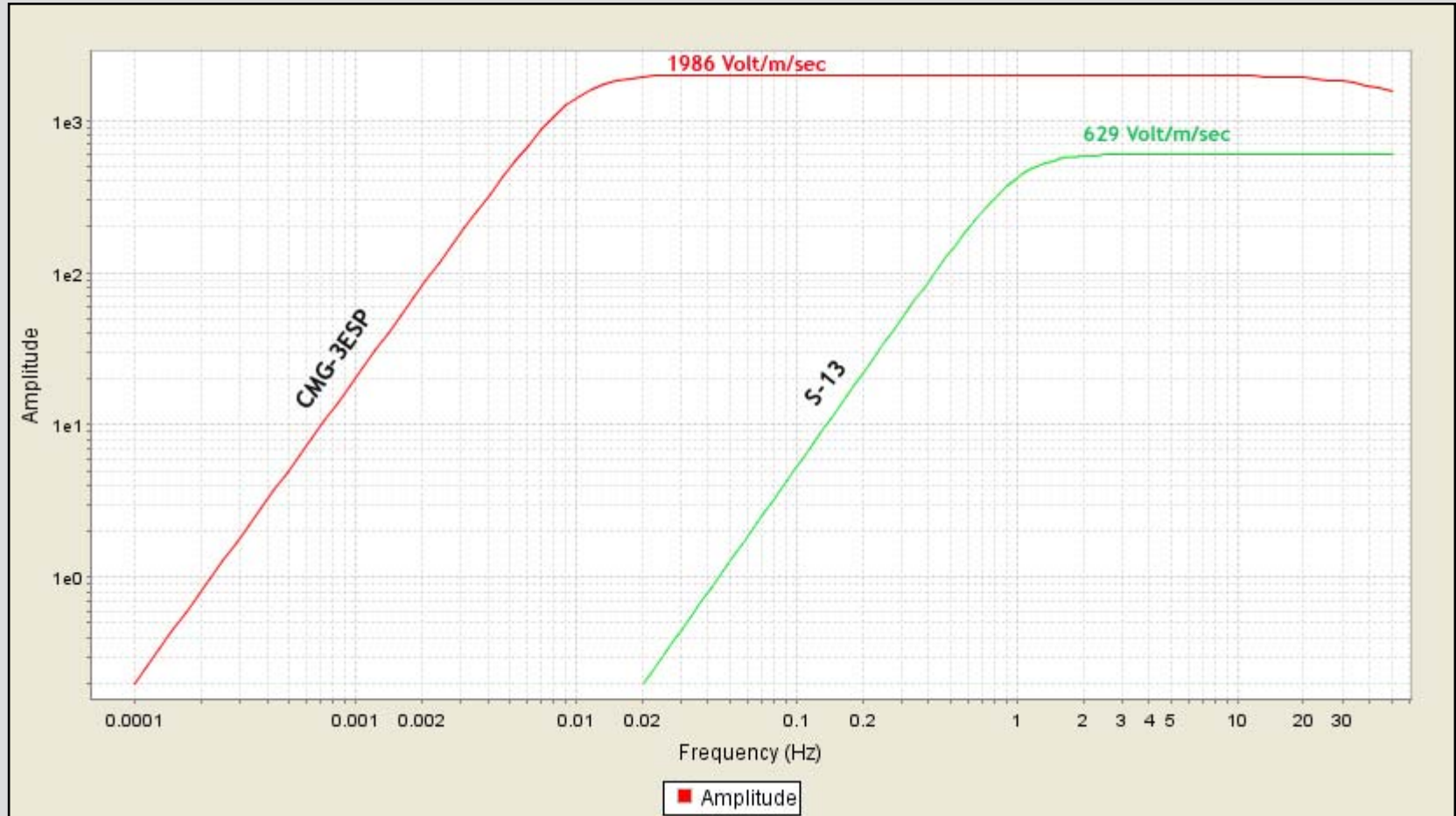
**Τα σεισμόμετρα με σύστημα εξάσκησης δύναμης επαναφοράς σε ισορροπία, έχουν κύκλωμα επανατροφοδότησης (feed-back circuit).**

**Το κύκλωμα αυτό παράγει ηλεκτρικό ρεύμα ίσο και αντίθετο με το ρεύμα που αναπτύσσεται στα άκρα του πηνίου του σεισμομέτρου το οποίο θα δημιουργούσε η κίνηση της μάζας. Το ρεύμα που παράγει το ηλεκτρικό αυτό κύκλωμα είναι ανάλογο της στιγμιαίας επιτάχυνσης της μάζας. Με τον τρόπο αυτό έχουμε ακριβή μέτρηση του ρεύματος εξόδου του σεισμομέτρου ενώ η μάζα του παραμένει ακίνητη, επιτρέποντας την κατασκευή μικρών διαστάσεων σεισμομέτρων.**

Τα σεισμόμετρα με σύστημα δύναμης επαναφοράς σε ισορροπία έχουν βρεί ευρεία εφαρμογή σε σεισμογράφους διαφόρων τύπων (επιταχυνσιογράφοι, κλπ) και ιδιαίτερα στα σεισμόμετρα ευρέως φάσματος (*broad band*). Στα σεισμόμετρα αυτά, κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα καθιστά την τάση εξόδου, που γεννιέται από τη δύναμη επαναφοράς, ανάλογη προς την ταχύτητα του εδάφους (όπως συμβαίνει στους ηλεκτρομαγνητικούς σεισμογράφους) και σχεδόν ανεξάρτητη της περιόδου της εδαφικής κίνησης.

Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται εξαιρετικά μεγάλη μεγέθυνση. Τα σεισμόμετρα ευρέως φάσματος έχουν μεγεθύνσεις της τάξης  $10^7$  για φάσμα περιόδων μεταξύ 0.01 sec και 1000 sec. Πέραν αυτού, τα σεισμόμετρα αυτά δεν απαιτούν μεγάλη μάζα, αφού η μάζα ουσιαστικώς δεν κινείται, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα κατασκευής τους σε μικρές διαστάσεις.

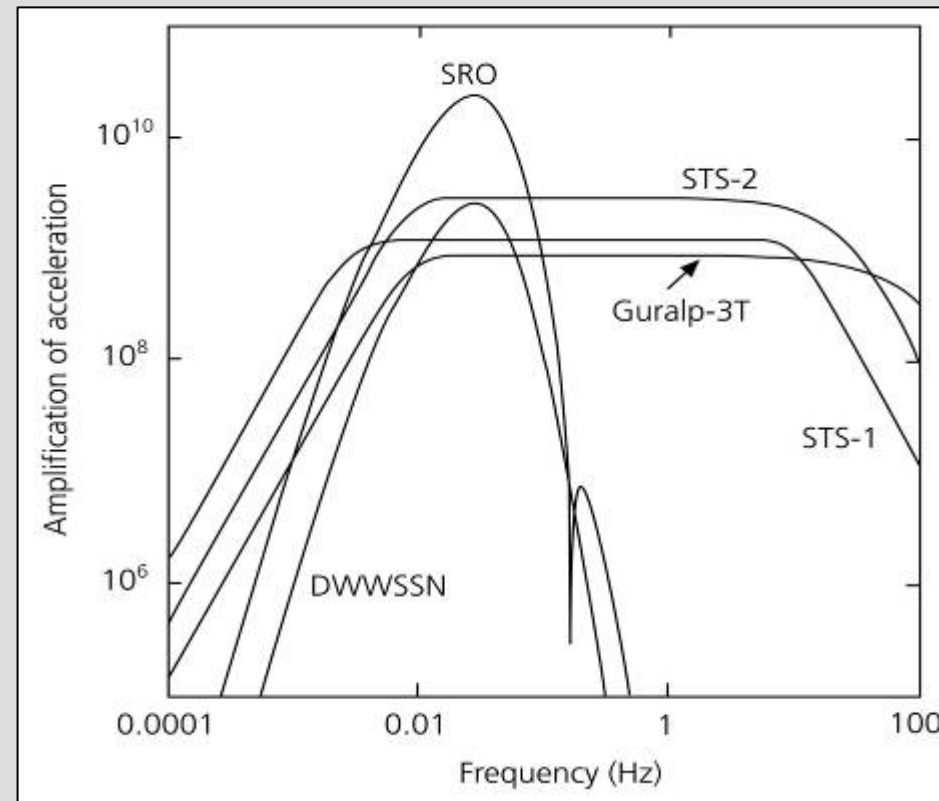
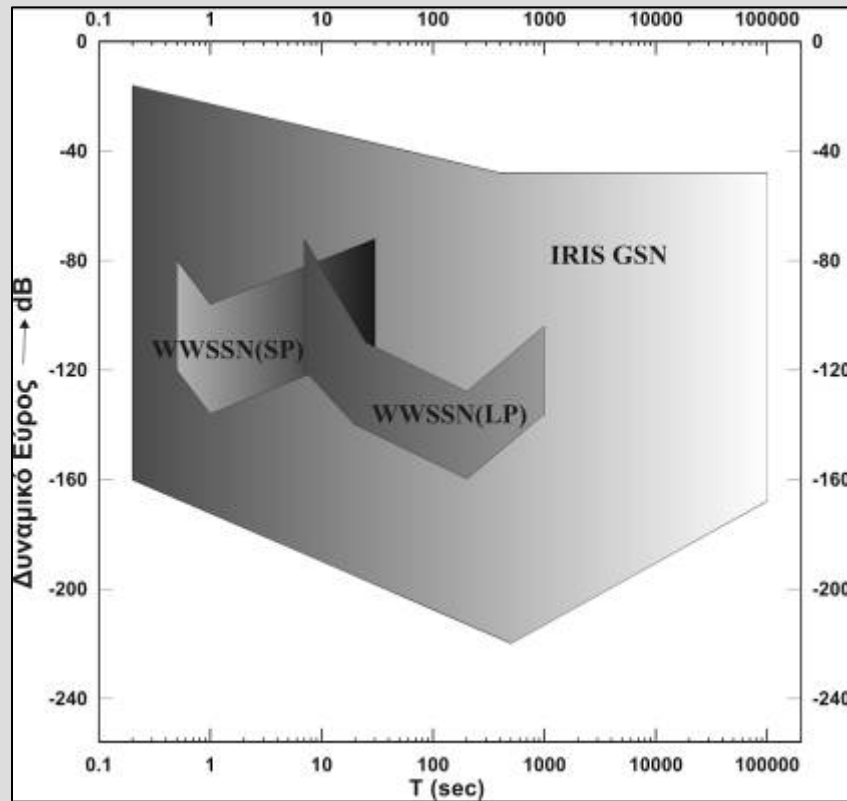




Καμπύλες απόκρισης (μεγέθυνση της **εδαφικής ταχύτητας**) για το βραχείας περιόδου σεισμόμετρο Teledyne S-13 (πράσινη καμπύλη) και το ευρέως φάσματος σεισμόμετρο Guralp CMG-3ESP (κόκκινη καμπύλη) του Εργαστηρίου Γεωφυσικής του Α.Π.Θ.



## Σεισμόμετρα ευρέως φάσματος (Broad band seismometers) (συνέχεια)

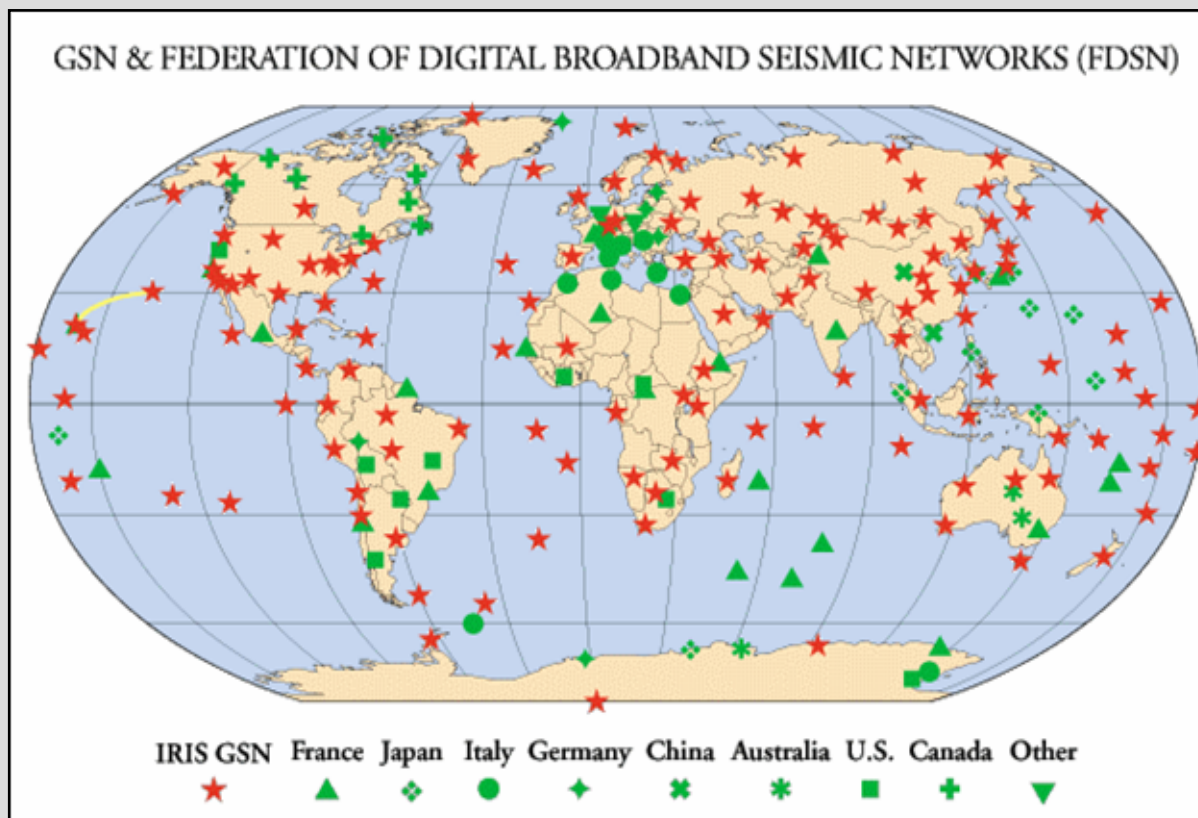


Δυναμικό εύρος ( $20 \log m/sec^2$ ) σε συνάρτηση με την περίοδο,  $T$  της εδαφικής κίνησης για τους ηλεκτρομαγνητικούς σειсмоγράφους βραχείας περιόδου (SP) και μακράς περιόδου (LP) του Διεθνούς Δικτύου Τυποποιημένων Σεισμογράφων WWSSN του οποίου η λειτουργία άρχισε στις αρχές της δεκαετίας του 1960, καθώς και για τους ψηφιακούς ευρέως φάσματος σεισμογράφους του Παγκόσμιου Σεισμικού Δικτύου GSN του οποίου η λειτουργία άρχισε στο τέλος της δεκαετίας του 1980.

Παρατηρούμε ότι τόσο το δυναμικό εύρος όσο και το εύρος των περιόδων είναι πολύ μεγαλύτερα στους σύγχρονους ηλεκτρονικούς σεισμογράφους του δικτύου GSN από ότι στους ηλεκτρομαγνητικούς σεισμογράφους του δικτύου WWSSN. (IRIS, 1991-1995, τροποποιημένο)

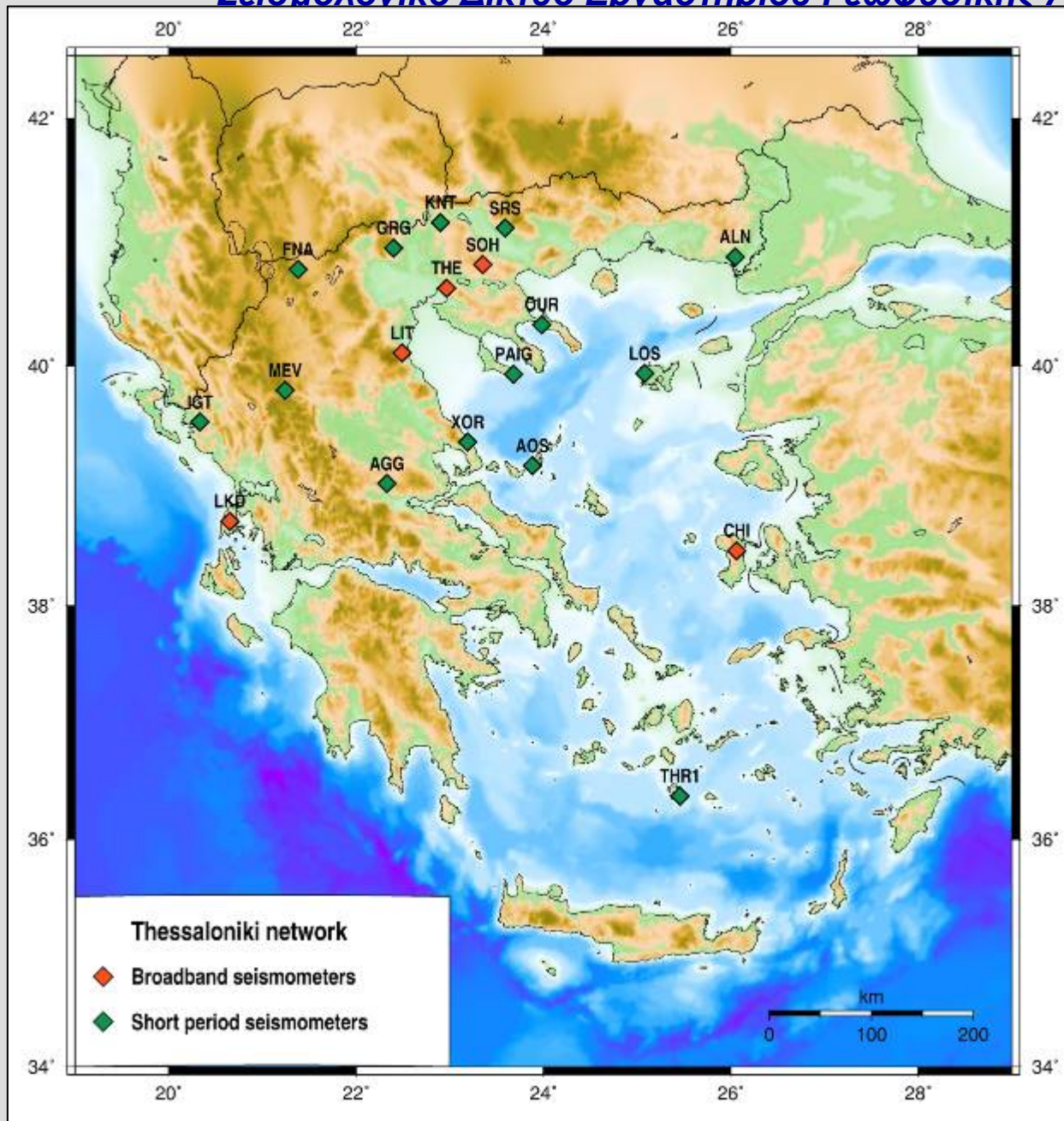
Καμπύλες απόκρισης για την εδαφική επιτάχυνση διαφόρων σεισμομέτρων ευρέως φάσματος.

(Stein and Wysession, 2003)



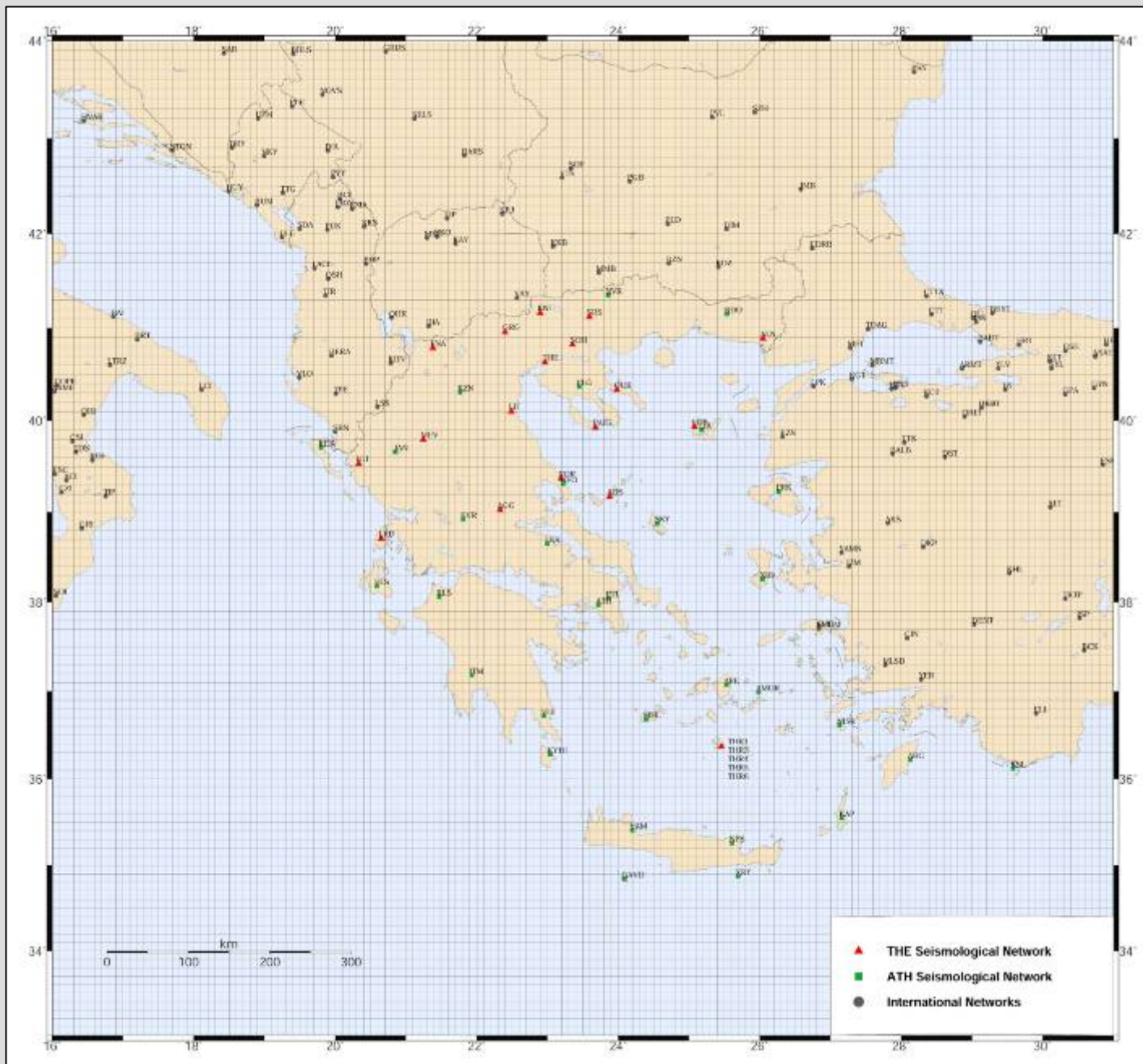
Χάρτης σταθμών (με κόκκινα αστέρια) του Παγκόσμιου Σεισμικού Δικτύου GSN, του οποίου η εγκατάσταση άρχισε το 1986 από το ίδρυμα IRIS και τη Γεωλογική Υπηρεσία των Η.Π.Α. (USGS). Περιλαμβάνει σειсмоγράφους πολύ ευρέως φάσματος με ψηφιακή αναγραφή. Αυτοί αναγράφουν αξιόπιστα εδαφικές κινήσεις των οποίων οι μεν περίοδοι κυμαίνονται μεταξύ των περιόδων των παλιρροιών της Γης (~50000 sec) και των βραχείας περιόδου σεισμικών κυμάτων χώρου (~0.1 sec), τα δε πλάτη από τα πλάτη του ελάχιστου εδαφικού θορύβου μέχρι τα πλάτη που αναμένονται από σεισμό μεγέθους 9.5 του οποίου η επικεντρική απόσταση είναι 3300 km.

Στο χάρτη αυτό φαίνονται και οι σταθμοί ευρέως φάσματος που λειτουργούν σε διάφορες χώρες και ανήκουν στην Ένωση Ψηφιακών Σεισμολογικών Δικτύων FDSN (Federation of Digital Seismic Networks (FDSN)). (Σχήμα από την ιστοσελίδα του IRIS).



Χάρτης σεισμολογικών σταθμών του Εργαστηρίου Γεωφυσικής του Α.Π.Θ.





Χάρτης σεισμολογικών σταθμών στην Ελλάδα και τις γύρω περιοχές.