

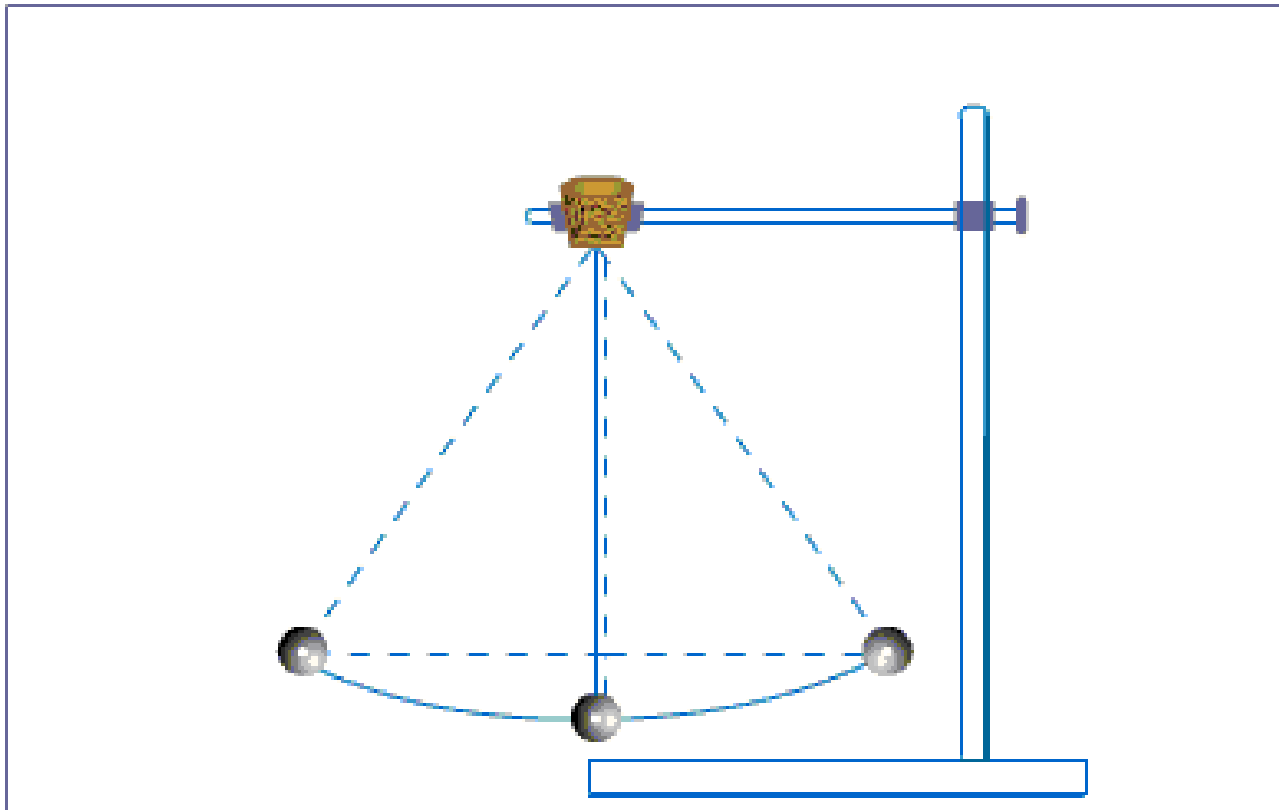


# Μηχανολογικές Μετρήσεις - Εργασία

## Σεισμόμετρο

Δημήτρης Κατσαρέας

# αισθητήρας οριζόντιας μετατόπισης



**αδρανειακός αισθητήρας (απλό εκκρεμές)**

# αισθητήρας

**αδρανειακός (επιτάχυνση βαρύτητας  $g$ )**

**εκκρεμές του Foucault (μήκος  $L$ )**

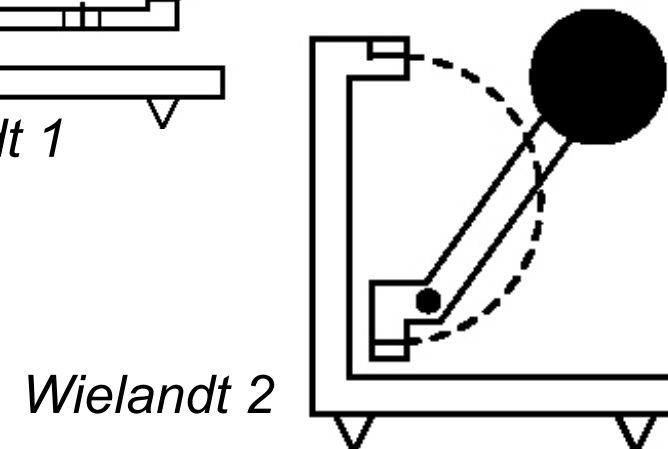
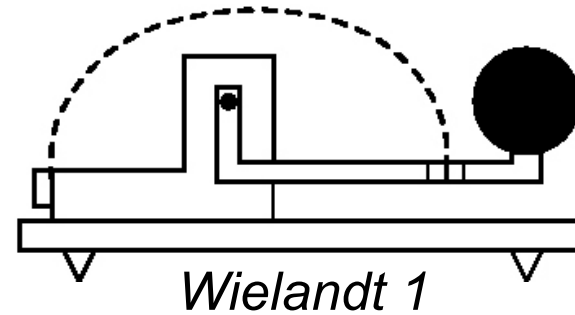
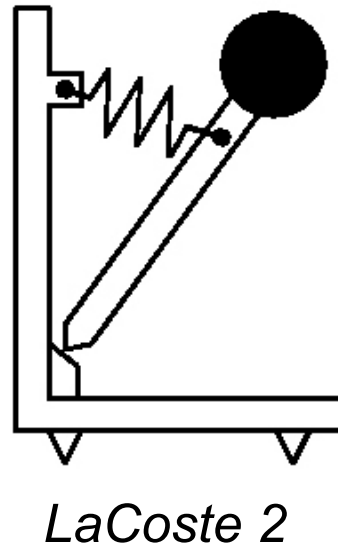
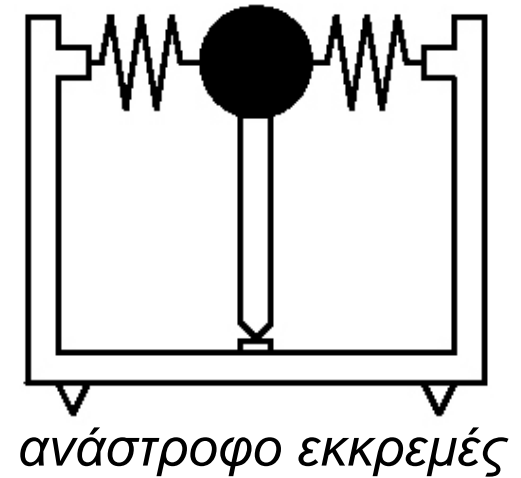
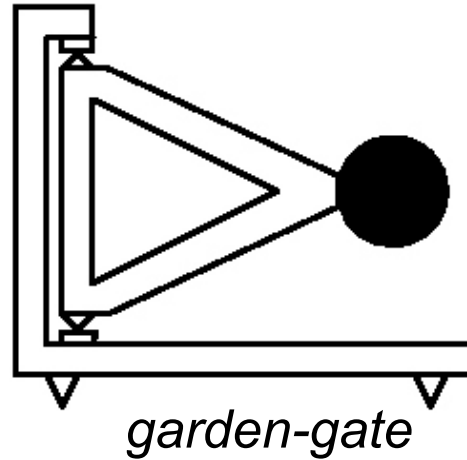
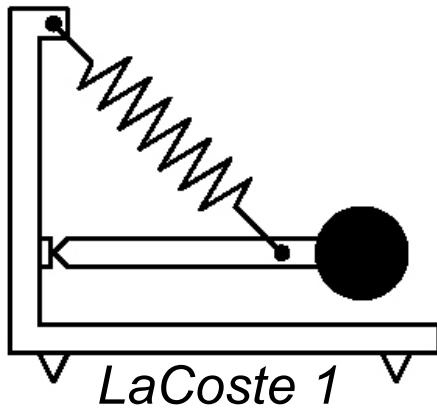
**φυσική συχνότητα  $(\omega_0 2\pi)^2 = g / L$**

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικές συχνότητες που παράγονται από τις διαφορετικές σεισμικές πηγές

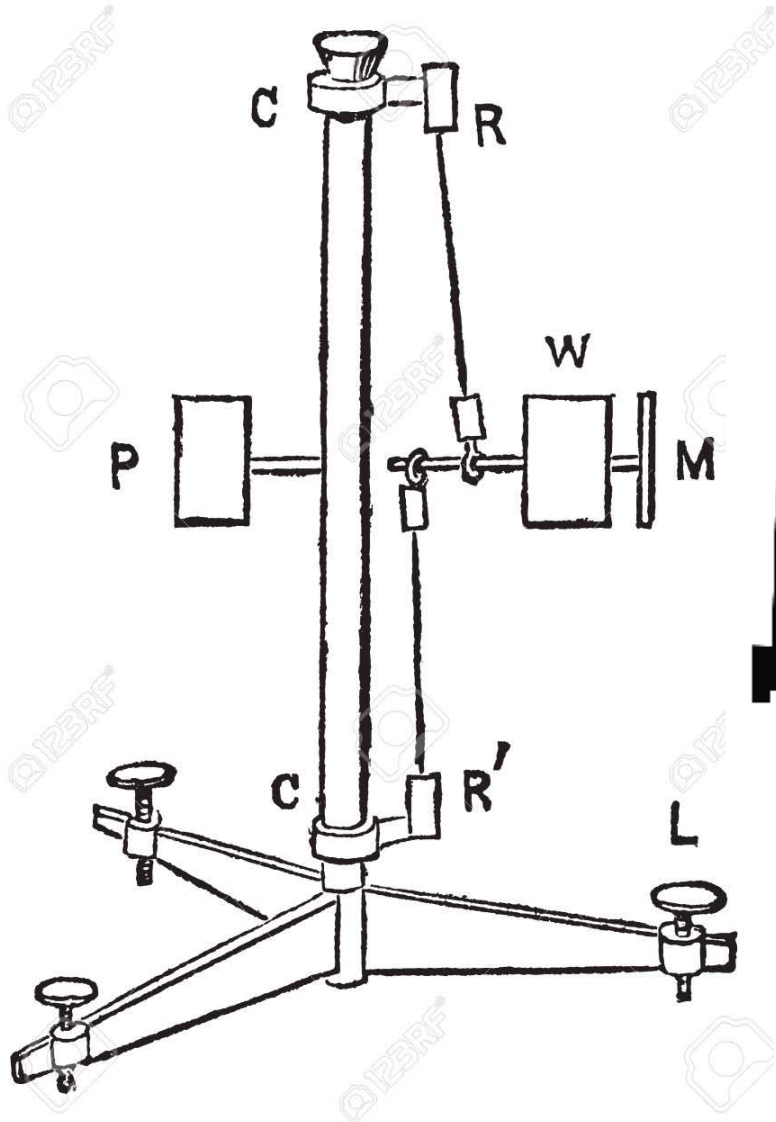
<i>Συχνότητα(Hz)</i>	<i>Τύποι μετρήσεων</i>
0.00001-0.0001	Γήινες παλίρροιες
0.0001-0.001	Γήινες ελεύθερες ταλαντώσεις, σεισμοί
0.001-0.01	Κύματα επιφάνειας, σεισμοί
0.01-0.1	Κύματα επιφάνειας, κύματα P και του S, σεισμοί με $M > 6$
0.1-10	Κύματα P και του S, σεισμοί με $M > 2$
10-1000	Κύματα P και του S, σεισμοί, $M < 2$

## πρακτικές λύσεις

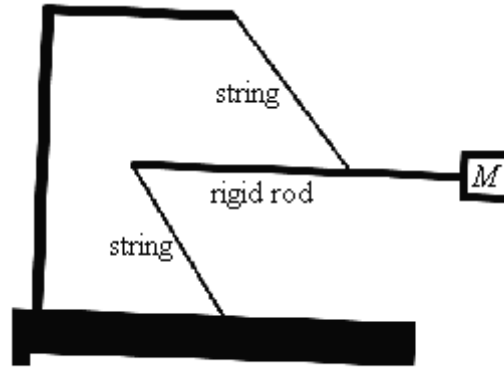
οριζόντιο εκκρεμές



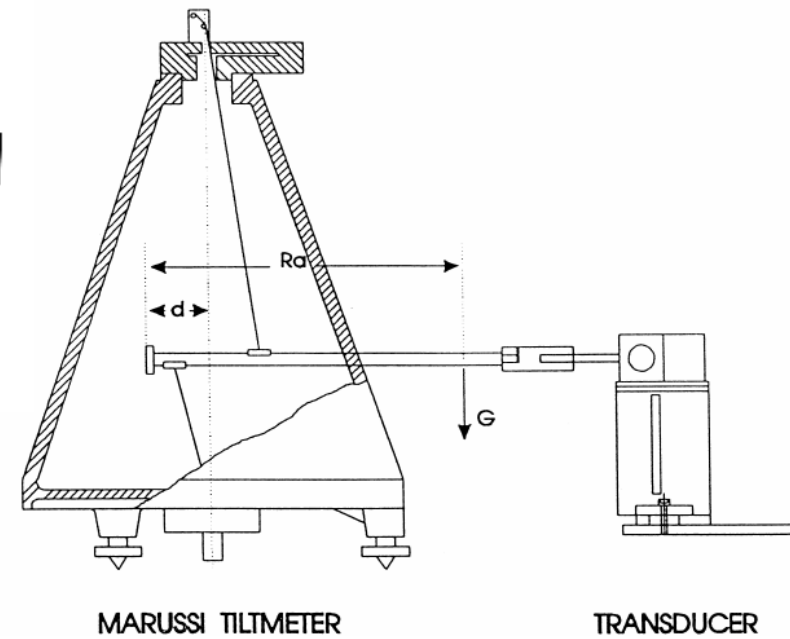
# άλλες ιδέες



Zollner



$R_a$  = Distance Centre of gravity from rear suspension.  
 $d$  = Distance actual axis of rotation from rear suspension.



κλισιόμετρο Marussi

## ελεύθερη ταλάντωση εκκρεμούς

$$m\ddot{x} + mg \frac{x}{L} = 0$$

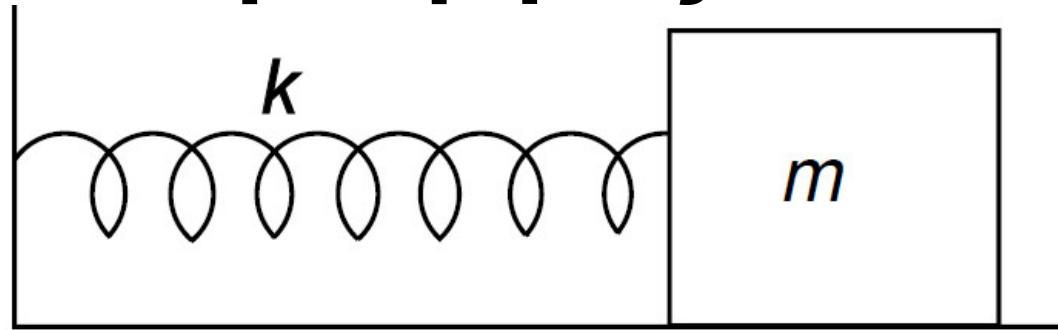
$$mL\ddot{\theta} + mg\theta = 0$$

για πολύ μικρή γωνία  $\theta$ ,

$$\theta \approx \sin \theta = \frac{x}{L}$$

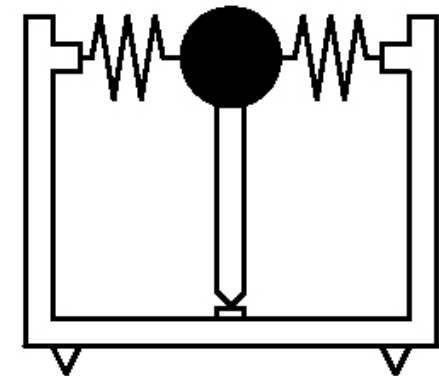
φυσική συχνότητα (σε Hz)  $\omega_0$

$$(2\pi\omega_0)^2 = \frac{g}{L}$$

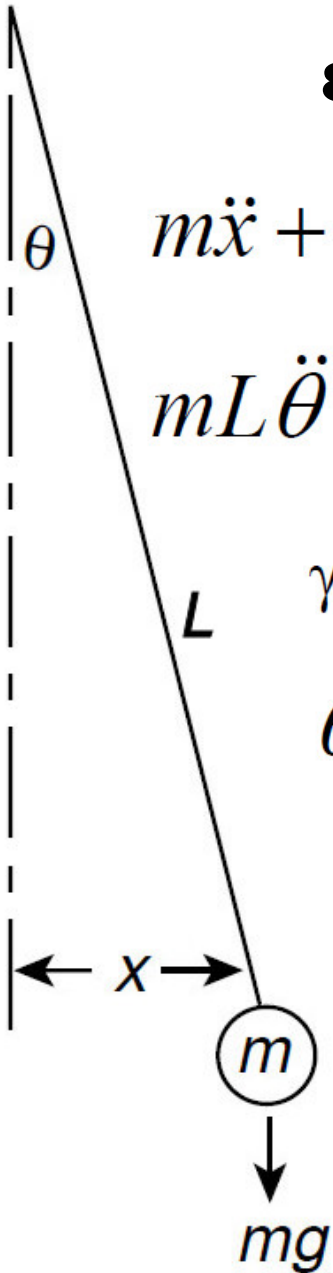


$\longleftrightarrow x$

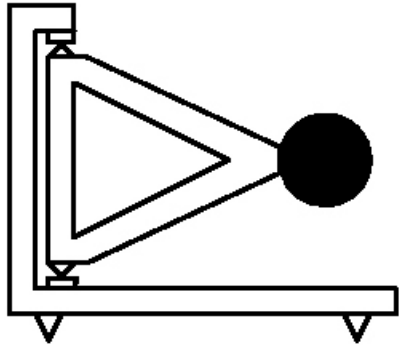
$$(2\pi\omega_0)^2 = \frac{k}{m}$$



ανάστροφο εκκρεμές



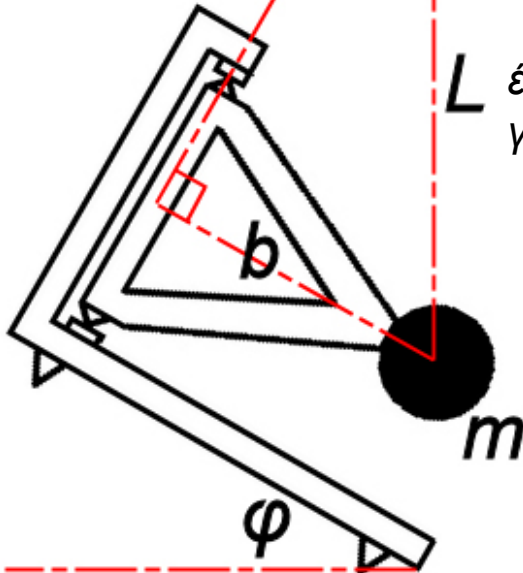
## εκκρεμές τύπου garden-gate



για να λειτουργήσει ο μηχανισμός του αριστερού σχήματος, σαν εκκρεμές garden-gate (πόρτα κήπου), θα πρέπει οι αρθρώσεις να έχουν μια ελαφρά κλίση  $\varphi$ , σε σχέση με την κατακόρυφο

ένα εκκρεμές garden-gate με κλίση  $\varphi$ , έχει την ίδια φυσική συχνότητα με ένα εκκρεμές Foucault μήκους  $L$ , με το σημαντικό πλεονέκτημα ότι το μήκος του ( $b$ ) είναι σημαντικά μικρότερο

$$b = L \sin \varphi$$



έτσι, εκεί που ένα εκκρεμές Foucault θα έπρεπε να έχει μήκος  $L=99.4 \mu.$ , για να έχει φυσική συχνότητα  $0.05 \text{ Hz}$ ,

$$L = \frac{g}{(2\pi\omega_0)^2}$$

ένα εκκρεμές garden-gate, με κλίση  $\varphi=0.1^\circ$ , έχει μήκος μόλις  $b=17.3 \text{ εκ.}$

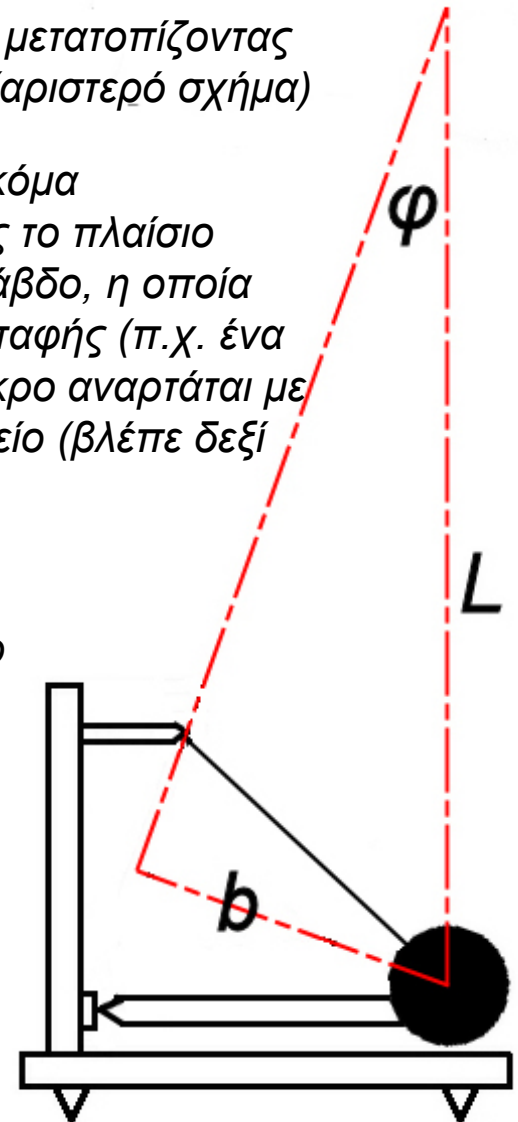
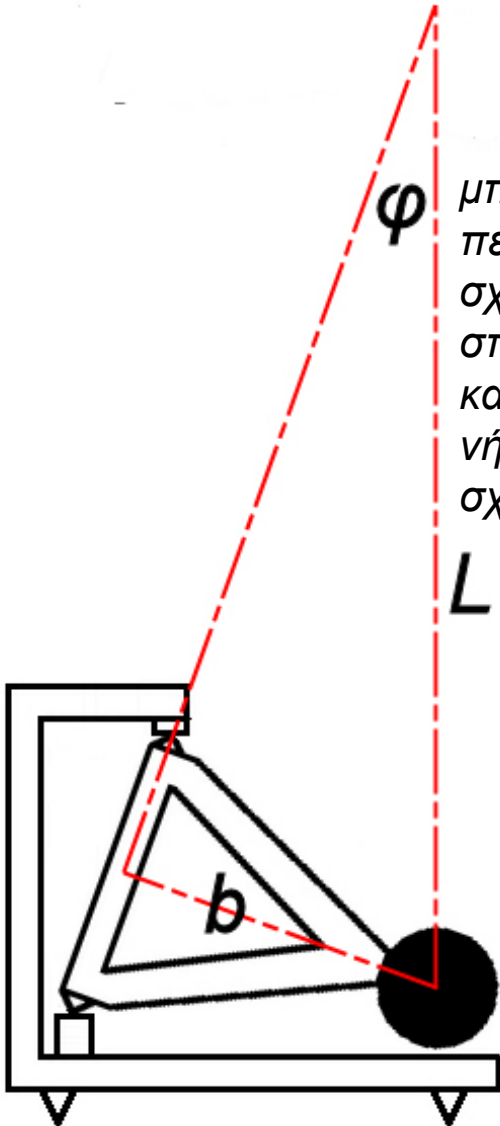
## ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

η κλίση  $\varphi$  του άξονα περιστροφής μπορεί να δοθεί μετατοπίζοντας ανάλογα την άνω άρθρωση από την κατακόρυφο (αριστερό σχήμα)

μπορούμε να απλοποιήσουμε και να ελαφρύνουμε ακόμα περισσότερο την κατασκευή, αντικαθιστώντας τελείως το πλαίσιο σχήματος  $\Delta$  και τις αρθρώσεις του με μια οριζόντια ράβδο, η οποία στο ένα της άκρο στηρίζεται μέσω «βελονοειδούς» επαφής (π.χ. ένα καρφί) στην κατακόρυφη ράβδο, ενώ στο άλλο της άκρο αναρτάται με νήμα (π.χ. πετονιά) από εκτός της κατακορύφου σημείο (βλέπε δεξί σχήμα)

$L$  υλικά κατασκευής μπορεί να είναι ξύλο για την βάση και την κατακόρυφη ράβδο, ξύλο ή μέταλλο (π.χ. ντίζα) για την οριζόντια ράβδο, ελαστικά βιδωτά πόδια για την βάση, περικόχλια για μάζα, πετονιά για νήμα

στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της τριβής στις στηρίξεις της οριζόντιας ράβδου, από την οποία εξαρτάται και η ευαισθησία του αισθητήρα





## διαστάσεις

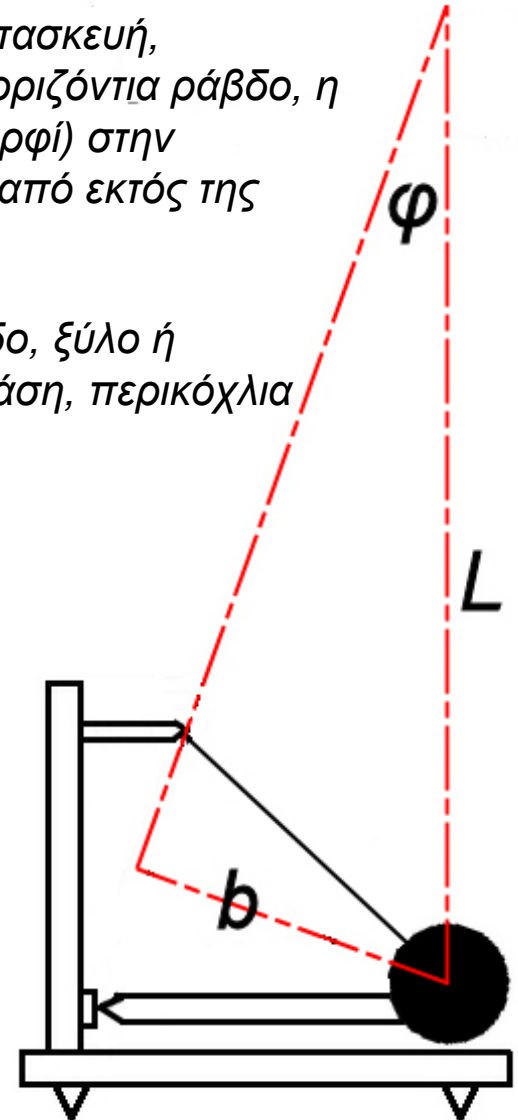
μπορούμε να απλοποιήσουμε και να ελαφρύνουμε ακόμα περισσότερο την κατασκευή, αντικαθιστώντας τελείως το πλαίσιο σχήματος  $\Delta$  και τις αρθρώσεις του με μια οριζόντια ράβδο, η οποία στο ένα της άκρο στηρίζεται μέσω «βελονοειδούς» επαφής (π.χ. ένα καρφί) στην κατακόρυφη ράβδο, ενώ στο άλλο της άκρο αναρτάται με νήμα (π.χ. πετονιά) από εκτός της κατακορύφου σημείο (βλέπε δεξί σχήμα)

υλικά κατασκευής μπορεί να είναι ξύλο για την βάση και την κατακόρυφη ράβδο, ξύλο ή μέταλλο (π.χ. ντίζα) για την οριζόντια ράβδο, ελαστικά βιδωτά πόδια για την βάση, περικόχλια για μάζα, πετονιά για νήμα

$$L = \frac{g}{(2\pi\omega_0)^2}$$

$$b = L \sin \varphi$$

ένα εκκρεμές garden-gate με μήκος  $b=17.3 \text{ cm}$  και κλίση  $\varphi=0.1^\circ$  έχει φυσική συχνότητα  $\omega_0=0.05 \text{ Hz}$ , ίση με την φυσική συχνότητα ενός εκκρεμούς Foucault μήκους  $L=99.4 \text{ m}$



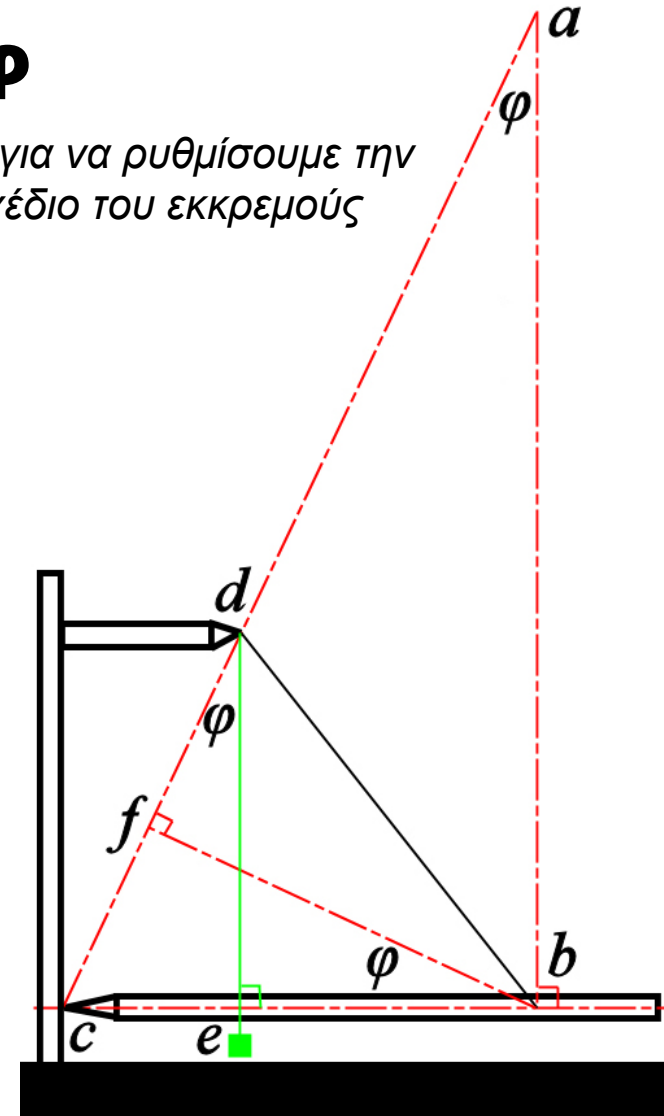
## ρύθμιση κλίσης $\varphi$

μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε απλή τριγωνομετρία (όμοια τρίγωνα) για να ρυθμίσουμε την κλίση, όσο μικρή και να είναι, θα χρειαστούμε όμως ένα πιο ακριβές σχέδιο του εκκρεμούς

- πρώτα εξασφαλίζουμε την οριζοντιότητα της ράβδου  $cb$
- κρεμάμε νήμα στάθμης  $de$  (πράσινο) από το σημείο  $d$
- τα τρίγωνα  $abc$  και  $dec$  είναι ορθογώνια και όμοια
- δεδομένης της απόστασης  $cd$  και κλίσης  $\varphi$ , μετρούμε το μήκος  $ce$
- θα πρέπει να ισούται με  $ce = dc \sin^{-1}(\varphi)$

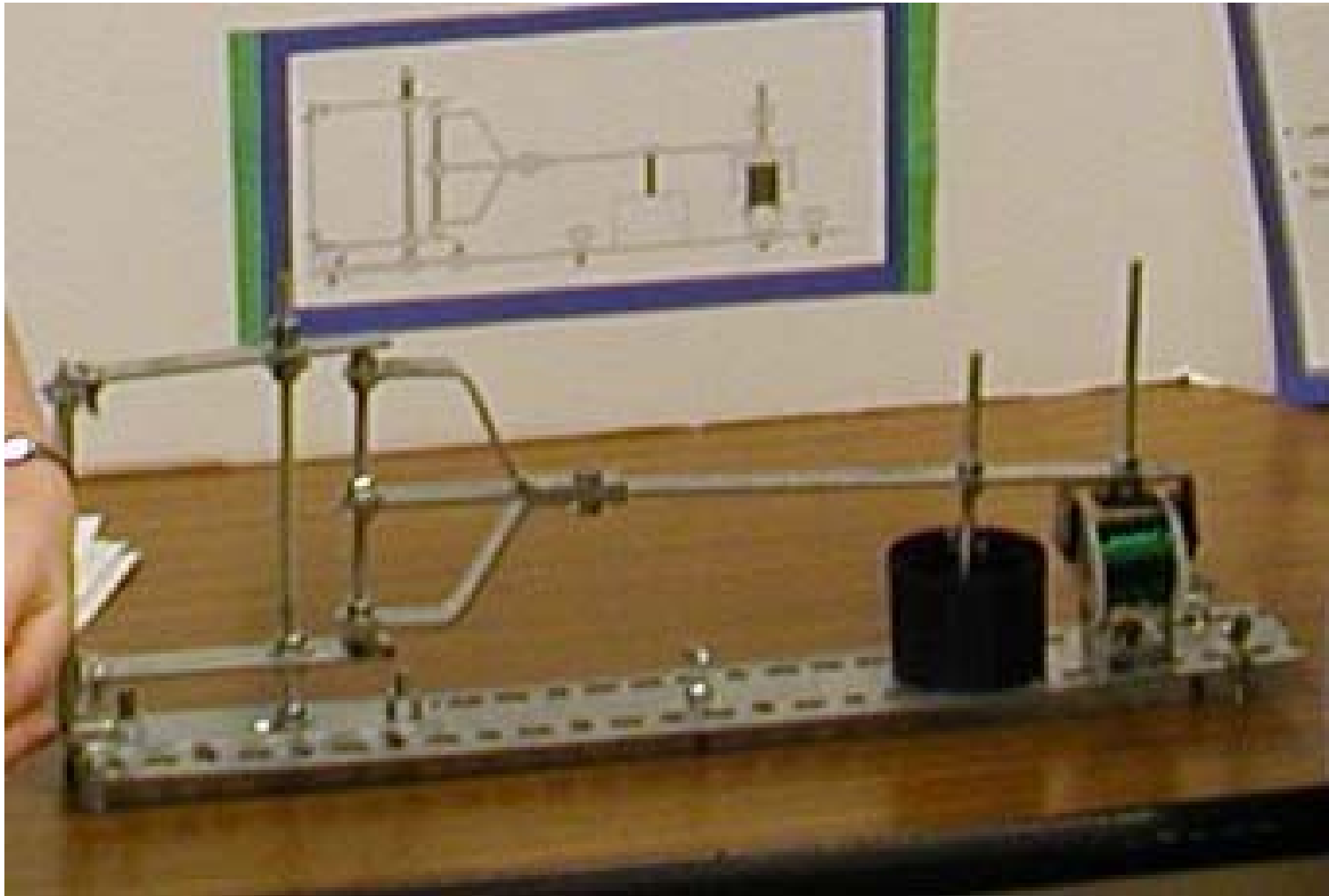
έτσι, για ένα εκκρεμές *garden-gate* φυσικής συχνότητας  $\omega_0 = 0.05$  Hz και κλίσης  $\varphi = 0.1^\circ$ , θα έχουμε  $ab = 99.396$  m,  $fb = 17.35$  cm,  $cb = 17.35$  cm και αν ρυθμίσουμε την απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης  $d$  και  $c$  να είναι  $dc = 40$  cm, τότε η απόσταση που μετράμε μεταξύ της άρθρωσης  $c$  και της στάθμης  $e$  θα πρέπει να είναι  $ce = 0.7$  mm

για ένα εκκρεμές φυσικής συχνότητας  $\omega_0 = 0.1$  Hz και ίδιων διαστάσεων, η απαραίτητη κλίση γίνεται  $\varphi = 0.4^\circ$  και η απόσταση  $ce$  θα πρέπει να είναι  $ce = 2.8$  mm



$$ab/cb = de/ce$$

## σεισμόμετρο τύπου garden-gate

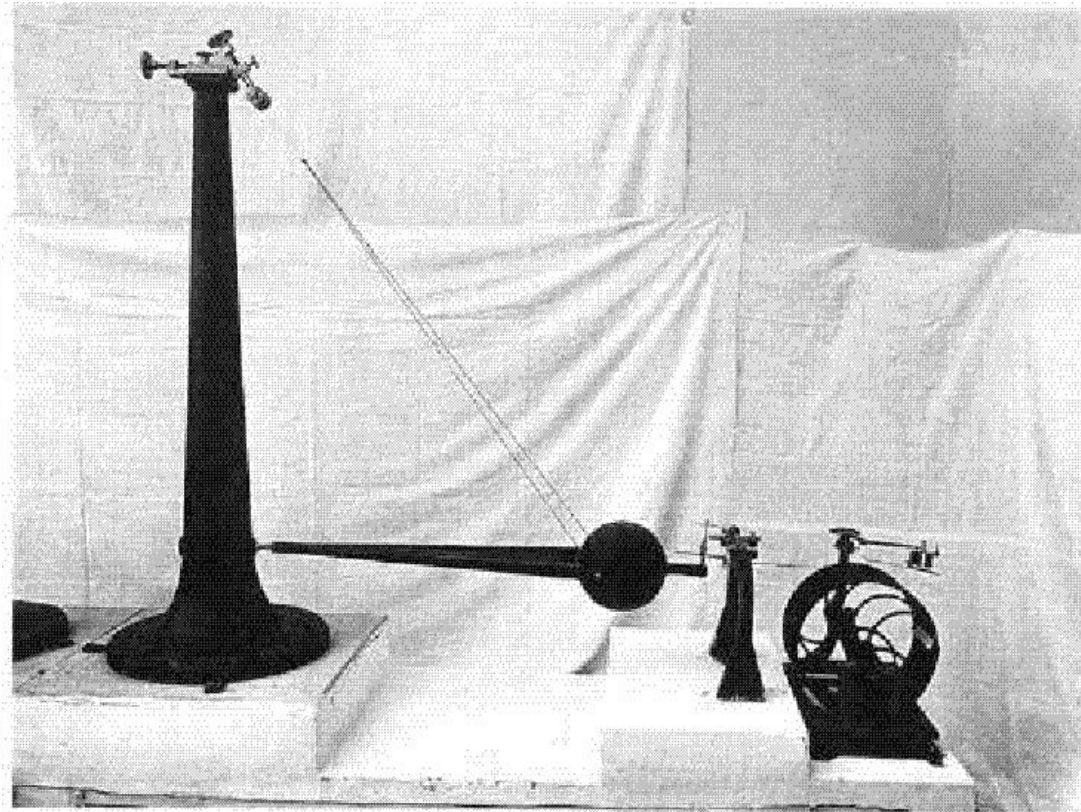


# σεισμόμετρο Bosch-Omori

## 1906

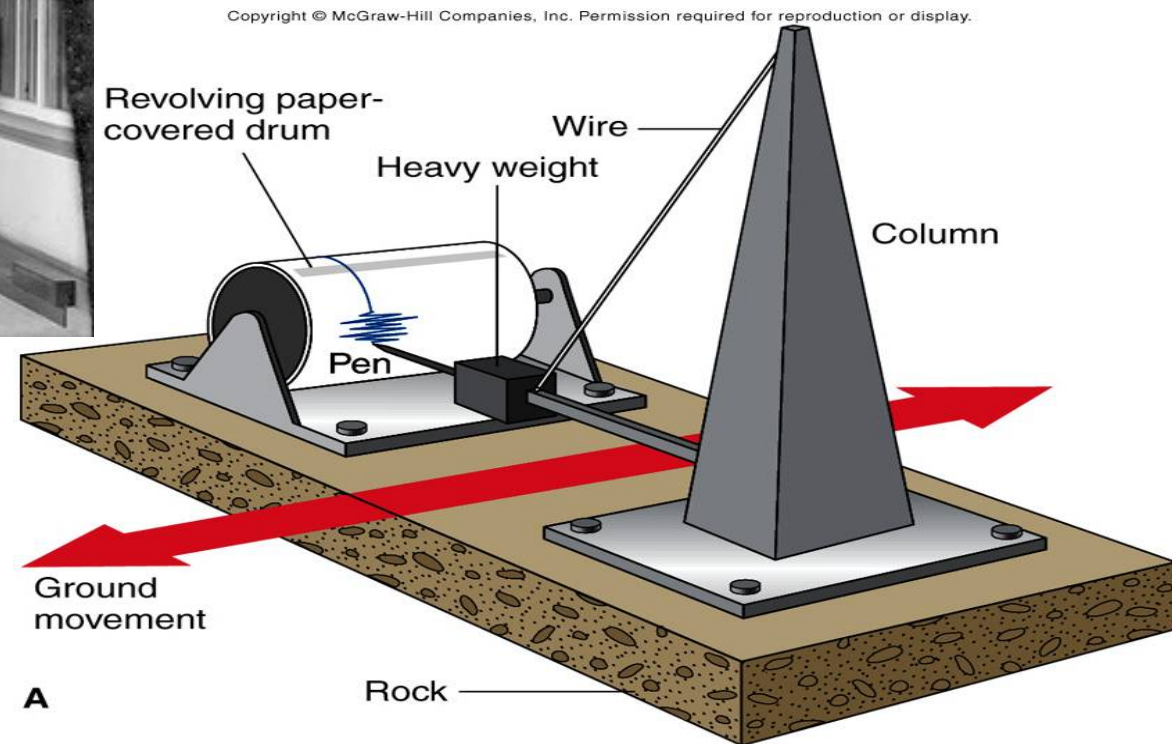
### BOSCH-OMORI SEISMOMETER

Is a horizontal pendulum with a pen that makes a mark directly on a paper roll. With it, Omori, a Japanese scientist, registered the 1906 earthquake in San Francisco.

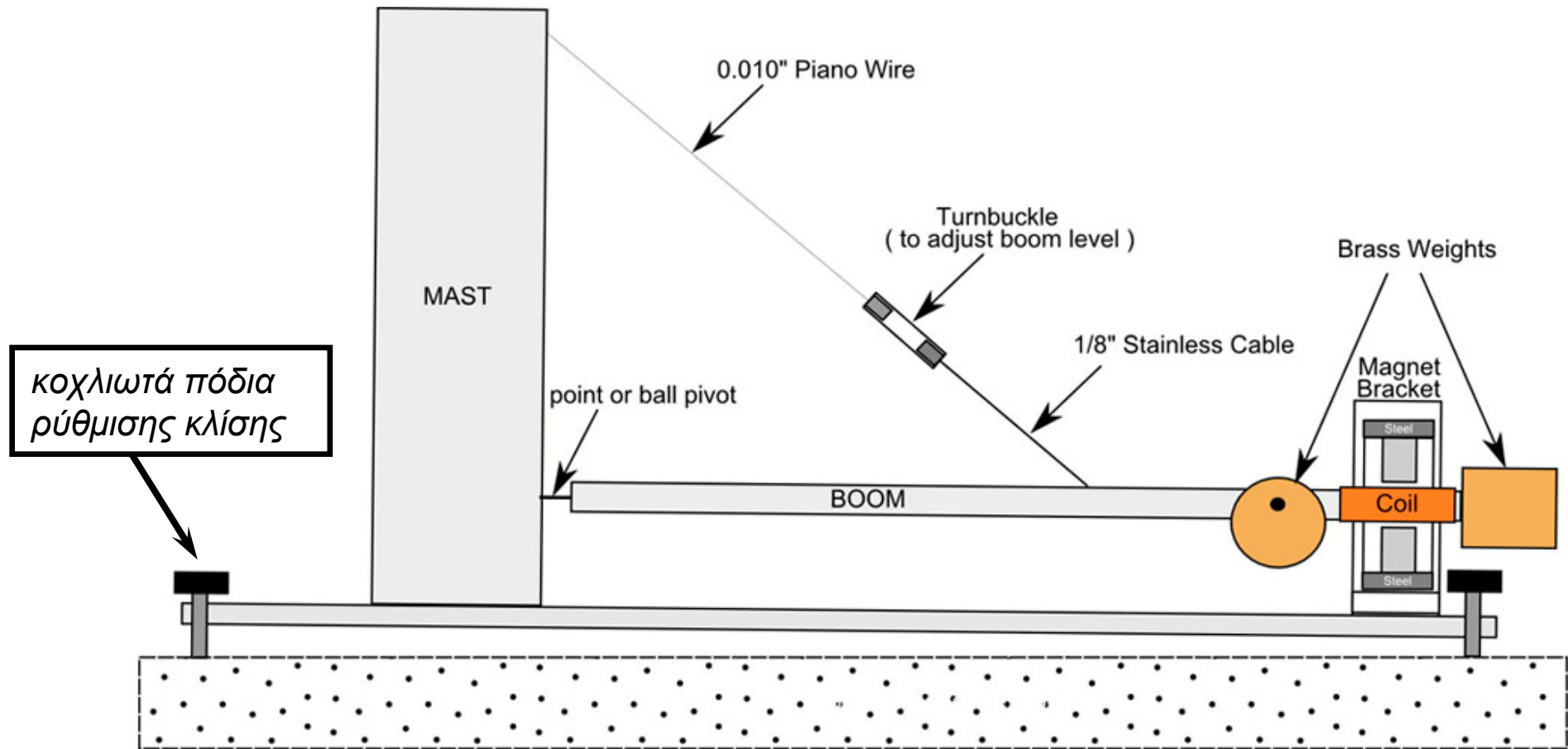




# σεισμόμετρο Bosch-Omori (2)



## παράδειγμα 1



## παράδειγμα 2

σημείο επαφής με ελάχιστες τριβές (σφαιροάρθρωση)



1906

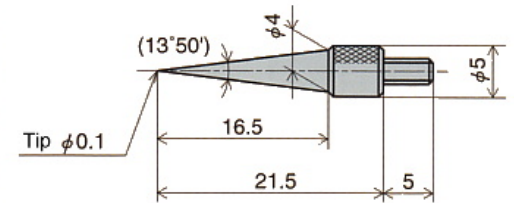
### BOSCH-OMORI SEISMOMETER

Is a horizontal pendulum with a pen that makes a mark directly on a paper roll. With it, Omori, a Japanese scientist, registered the 1906 earthquake in San Francisco.



# εδράσεις - τριβή

στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της τριβής στις στηρίξεις της οριζόντιας ράβδου, από την οποία εξαρτάται και η ευαισθησία του αισθητήρα



**STYLUS TIP**

	Point contact stylus			Line contact stylus	
	Conical stylus 7 mil	Conical stylus 5 mil	Elliptical stylus 3x7 mil	Line contact stylus	S.A.S. stylus
Front view					
Cross-sectional view					
Contact with records					
Contact surface	30.5 μm <sup>2</sup>	23.4 μm <sup>2</sup>	20.6 μm <sup>2</sup>	46.7 μm <sup>2</sup>	62.1 μm <sup>2</sup>
I <sub>1</sub> / L <sub>2</sub>	1	1	1.8	6	9

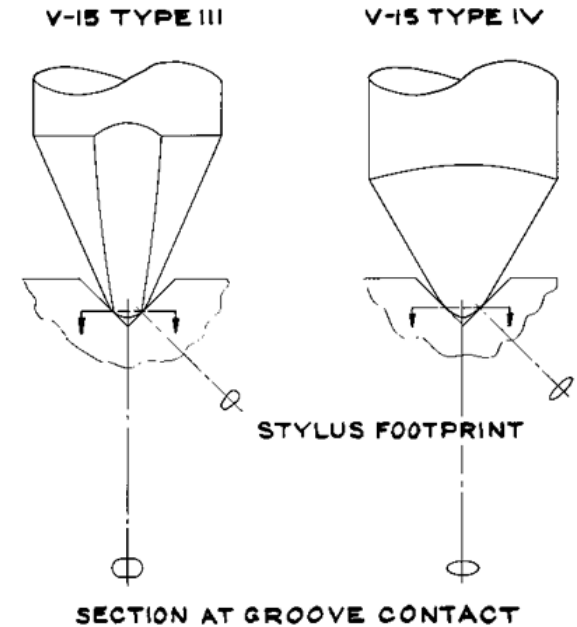


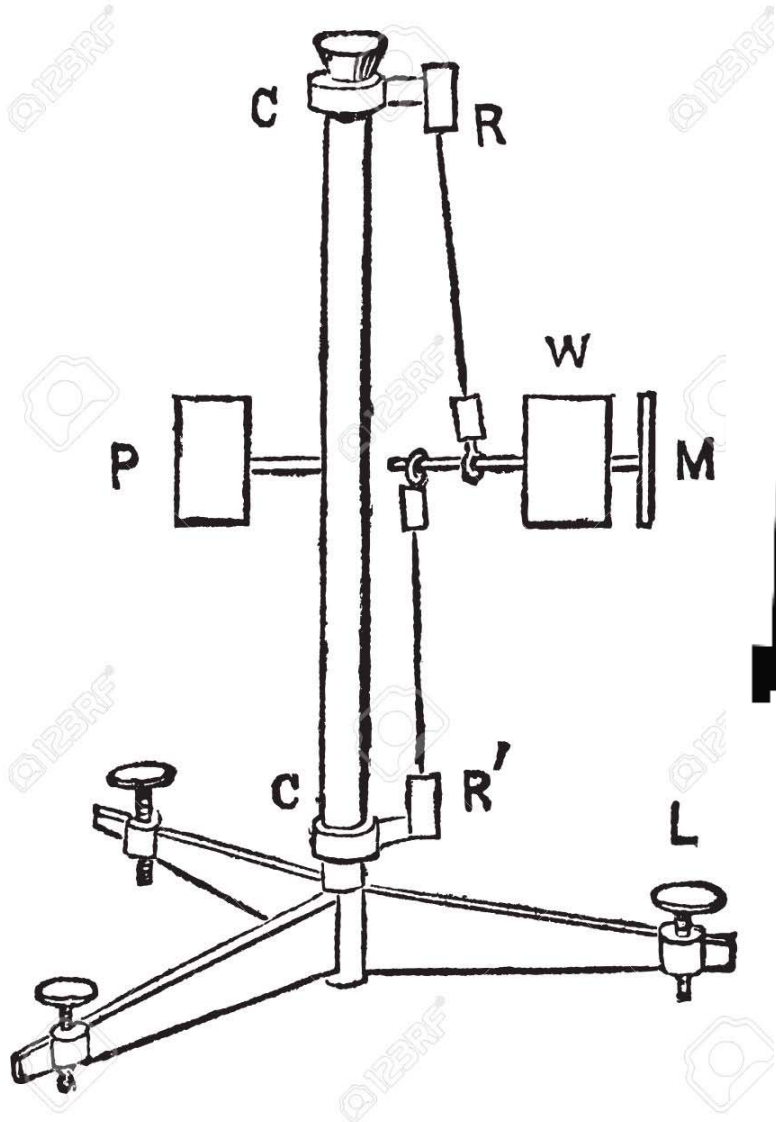
FIGURE 4



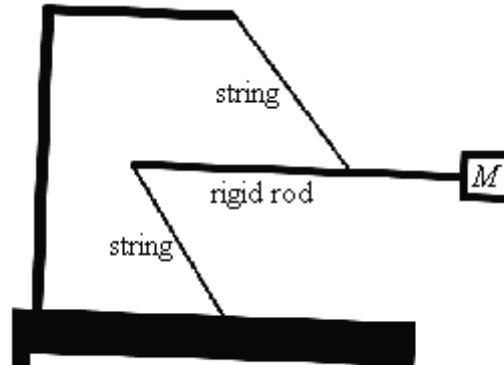
## προηγούμενες προσπάθειες



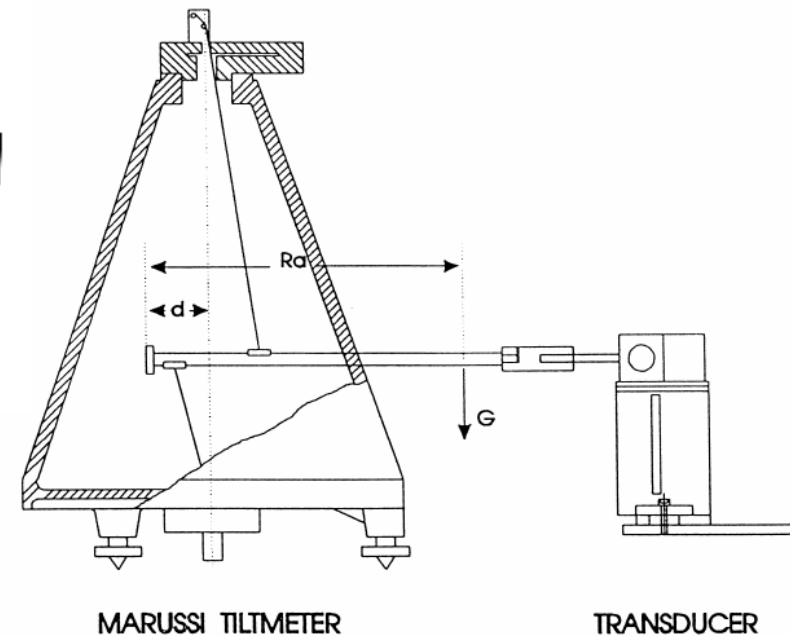
# άλλες ιδέες



Zollner



$R_a$  = Distance Centre of gravity from rear suspension.  
 $d$  = Distance actual axis of rotation from rear suspension.



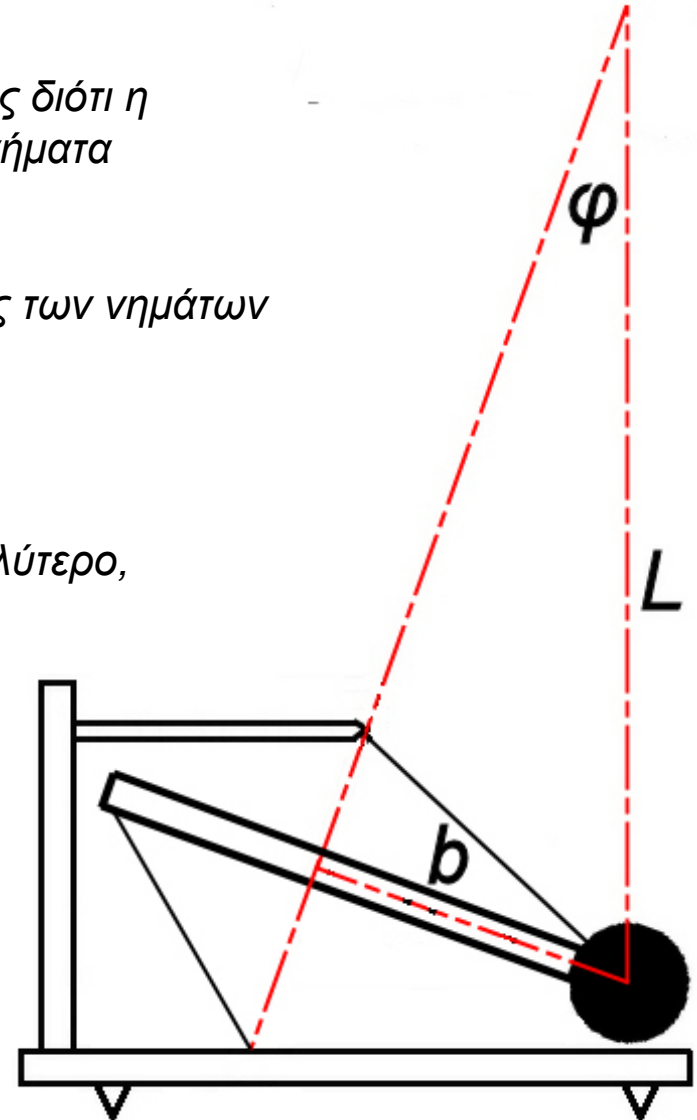
κλισιόμετρο Marussi

## ακόμα λιγότερες τριβές

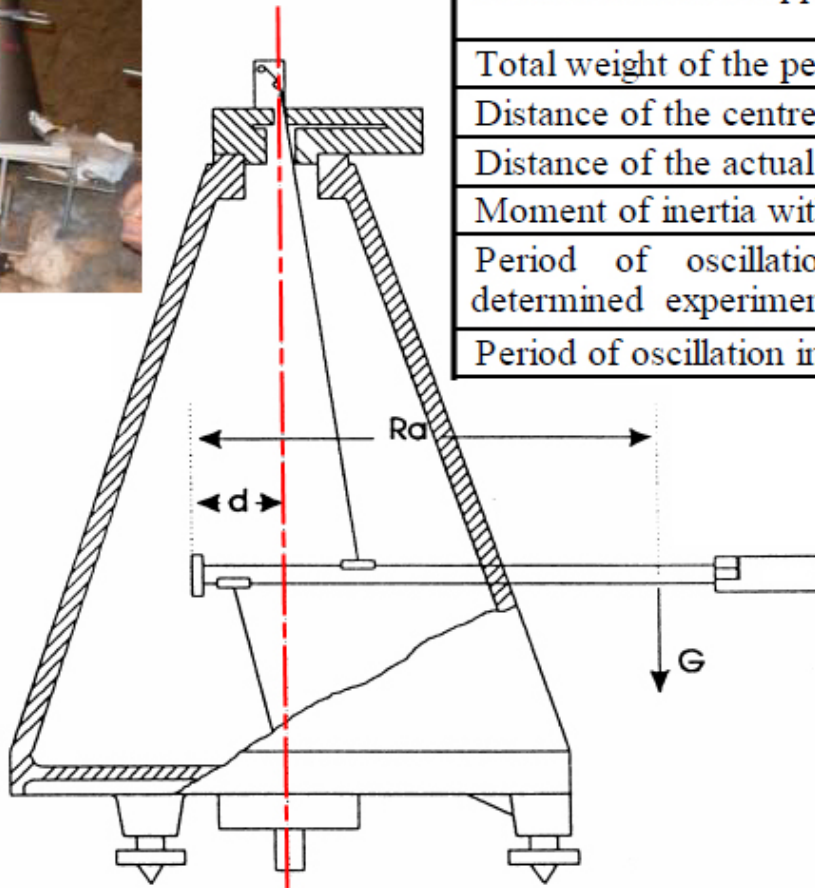
η ανάρτηση Zollner έχει ακόμα λιγότερες τριβές διότι η οριζόντια ράβδος αναρτάται αποκλειστικά με νήματα

ο άξονας περιστροφής διέρχεται από τα σημεία ανάρτησης των νημάτων

το μειονέκτημα είναι ότι το μήκος του αισθητήρα θα είναι μεγαλύτερο, εφόσον η οριζόντια ράβδος είναι μακρύτερη



## παράδειγμα 3



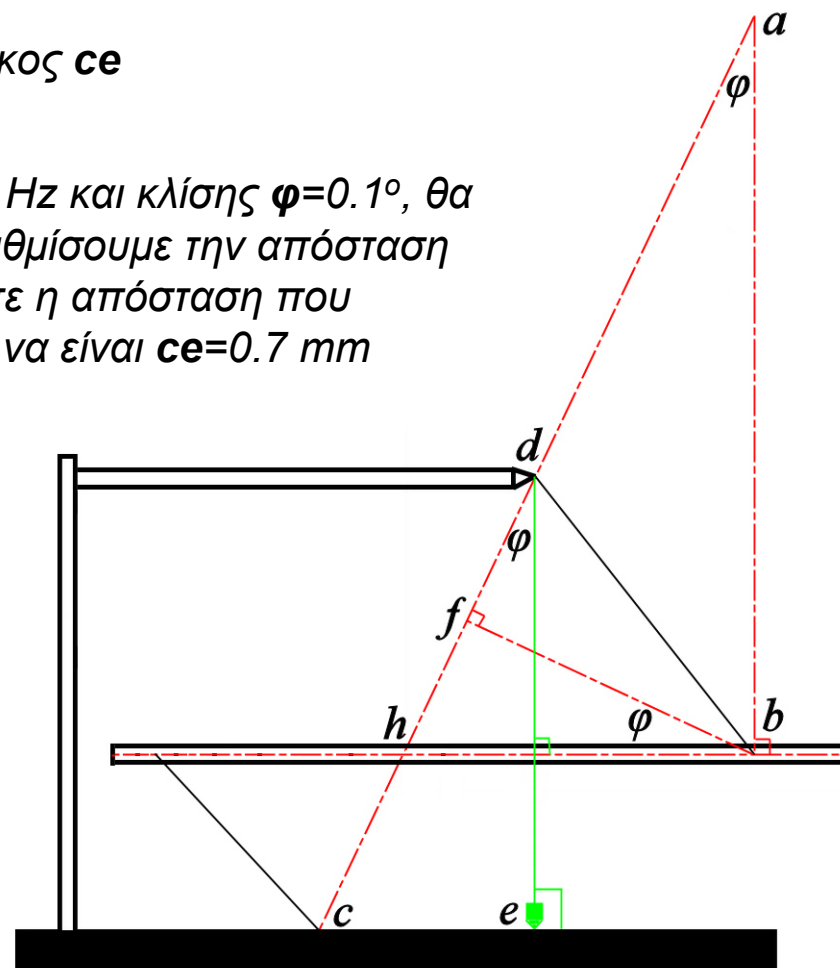
Quantity	Symbol	Value
Distance between upper and lower mountings		50 cm
Total weight of the pendulum, including the wires	m	679 gr.
Distance of the centre of gravity from the rear suspension	Ra	32.0 cm
Distance of the actual axis of rotation from the rear suspension	d	3.9 cm
Moment of inertia with respect to the actual axis of rotation	Jo	5,500 gr cm <sup>2</sup>
Period of oscillation in the vertical plane, determined experimentally	Ta	1.3 sec
Period of oscillation in the horizontal plane	To	90 sec

# ρύθμιση κλίσης $\varphi$ εκκρεμούς τύπου Zollner

- πρώτα εξασφαλίζουμε την οριζοντιότητα της ράβδου  $hb$  και της βάσης  $ce$
- κρεμάμε νήμα στάθμης  $de$  (πράσινο) από το σημείο  $d$
- τα τρίγωνα  $abh$  και  $dec$  είναι ορθογώνια και όμοια
- δεδομένης της απόστασης  $cd$  και κλίσης  $\varphi$ , μετρούμε το μήκος  $ce$
- θα πρέπει να ισούται με  $ce = dc \sin^{-1}(\varphi)$

έτσι, για ένα εκκρεμές Zollner φυσικής συχνότητας  $\omega_0 = 0.05$  Hz και κλίσης  $\varphi = 0.1^\circ$ , θα έχουμε  $ab = 99.396$  m,  $fb = 17.35$  cm,  $hb = 17.35$  cm και αν ρυθμίσουμε την απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης  $d$  και  $c$  να είναι  $dc = 40$  cm, τότε η απόσταση που μετράμε μεταξύ της στήριξης  $c$  και της στάθμης  $e$  θα πρέπει να είναι  $ce = 0.7$  mm

για ένα εκκρεμές φυσικής συχνότητας  $\omega_0 = 0.1$  Hz και ίδιων διαστάσεων, η απαραίτητη κλίση γίνεται  $\varphi = 0.4^\circ$  και η απόσταση  $ce$  θα πρέπει να είναι  $ce = 2.8$  mm





# απόσβεση

Το πρόβλημα με ένα αδρανειακό σεισμόμετρο που βασίζεται στο εκκρεμές είναι ότι για κάθε διέγερση που δέχεται από το έδαφος, εκτελεί και μια ελεύθερη ταλάντωση (αρμονική), έτσι μετά από λίγα δευτερόλεπτα μέσα στον σεισμό, θα εκτελεί κίνηση η οποία θα συντίθεται από πολλές αρμονικές (μια για κάθε ξεχωριστή κίνηση που έχει κάνει το έδαφος).

Για να το αποφύγουμε αυτό και να έχουμε ένα εκκρεμές που να ακολουθεί όσο πιο πιστά γίνεται την κίνηση του εδάφους, εισάγουμε έναν αποσβεστήρα στον αισθητήρα, έτσι ώστε το εκκρεμές να εκτελεί αποσβενημένη και όχι ελεύθερη ταλάντωση. Η εξίσωση κίνησης του εκκρεμούς γίνεται,

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + \frac{mg}{L}x = 0$$

όπου  $c$  είναι μια σταθερά που ονομάζεται **συντελεστής ιξώδους απόσβεσης**

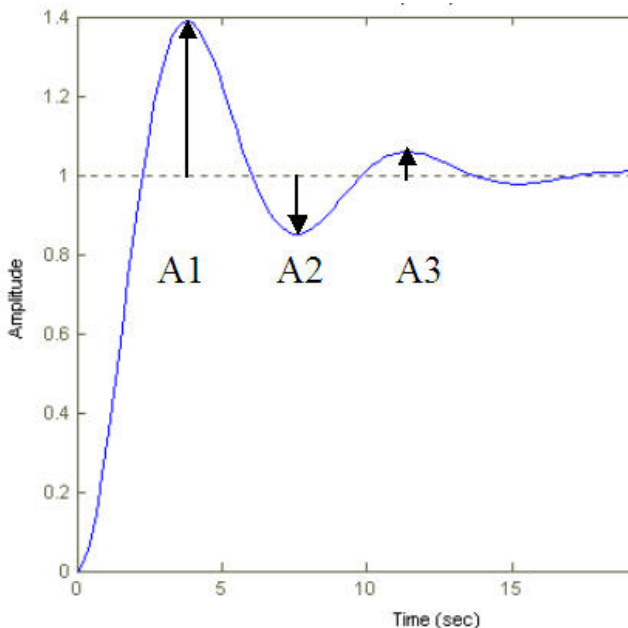
## πρακτικά

στον σειсмоγράφο κατακόρυφης συνιστώσας AS1, οι δοκιμές έδειξαν ότι ο λόγος του εύρους κάθε παλινδρόμησης προς το εύρος της προηγούμενης θα πρέπει να είναι το πολύ 1/20 ( $A1/A2=A2/A3=20$ ),

<http://jclahr.com/science/psn/as1/damping/adjustment.html>

δηλαδή η **λογαριθμική μείωση του αποσβεστήρα** θα είναι,

$$\delta = \ln \frac{A_1}{A_2} \approx 3$$



## έλεγχος απόσβεσης

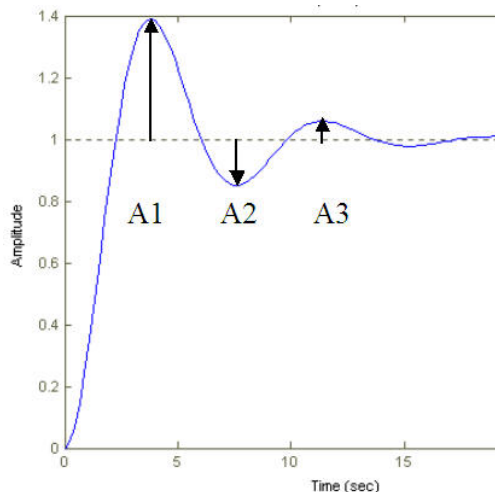
στον σειсмоγράφο κατακόρυφης συνιστώσας AS1, οι δοκιμές έδειξαν ότι ο λόγος του εύρους κάθε παλινδρόμησης προς το εύρος της προηγούμενης θα πρέπει να είναι το πολύ 1/20 ( $A_1/A_2=A_2/A_3=20$ ),

δηλαδή η **λογαριθμική μείωση του αποσβεστήρα** θα είναι,

$$\delta = \ln \frac{A_1}{A_2} \approx 3$$

ή αλλιώς, ο **λόγος απόσβεσης (damping ratio)** θα είναι 0.7

- τοποθετήστε οριζόντιο κανόνα, κάθετα στην οριζόντια ράβδο
- σημειώστε το σημείο ισορροπίας της ράβδου στον κανόνα
- μετακινήστε το άκρο της ράβδου κατά 10 mm και αφήστε την
- σημειώστε πόσο πέρα από το σημείο ισορροπίας πήγε
- ρυθμίστε την απόσβεση ώστε αυτή η απόσταση να είναι 0.5 mm



η εικόνα δείχνει πως έγινε η ρύθμιση της απόσβεσης, για τον σειсмоγράφο κατακόρυφης συνιστώσας AS1



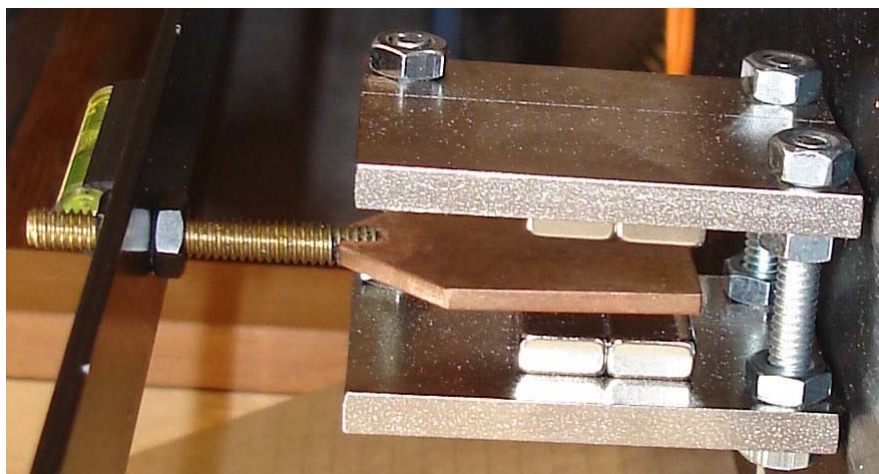
<http://jclahr.com/science/psn/as1/damping/adjustment.html>

## ΤΥΠΟΙ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΩΝ

**υδραυλικός αποσβεστήρας** - αποτελείται από δοχείο με λάδι ή γλυκερίνη, μέσα στο οποίο βυθίζεται «έμβολο», σταθερά συνδεδεμένο με την οριζόντια ράβδο (βλέπε εικόνα), δύσκολο να εφαρμοστεί σε οριζόντιο εκκρεμές



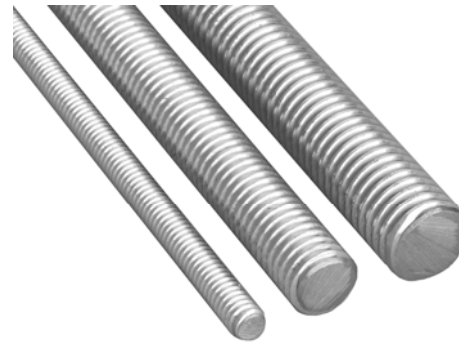
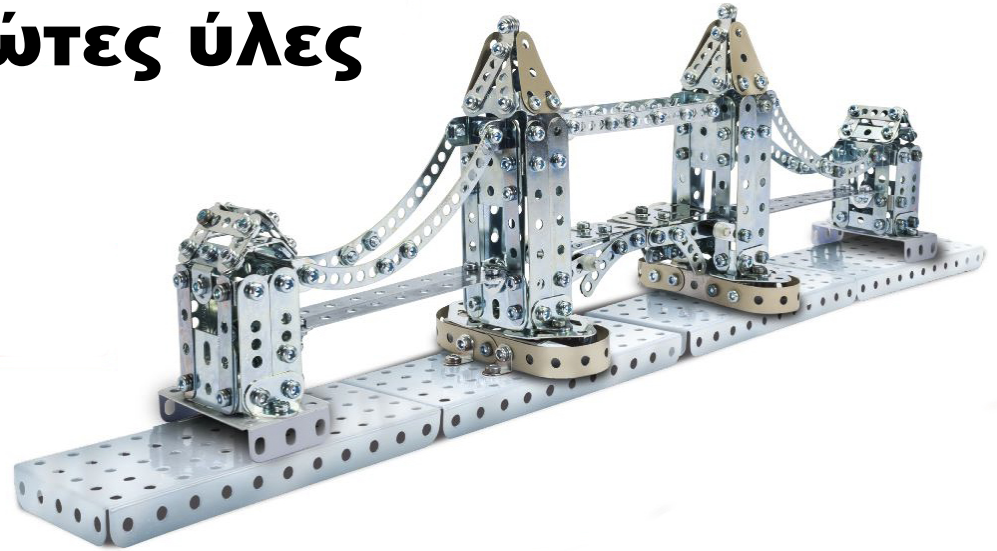
**πνευματικός αποσβεστήρας** - έμβολο κινείται μέσα σε κύλινδρο, που τα δύο άκρα του κλείνονται με καλύμματα και η εσωτερική του διάμετρος είναι λίγο μεγαλύτερη από τη διάμετρο του εμβόλου, το οποίο συνδέεται με την οριζόντια ράβδο, κατά την παλινδρόμηση του εμβόλου ο αέρας συμπιέζεται και αποσυμπιέζεται στους αεροθαλάμους εκατέρωθεν του εμβόλου, εφαρμόζοντας αντίσταση στην κίνηση του εμβόλου, δύσκολο να κατασκευαστεί



**μαγνητικός αποσβεστήρας** – χάλκινο έλασμα σταθερά συνδεδεμένο με την οριζόντια ράβδο παλινδρομεί μεταξύ πόλων πεταλοειδούς μαγνήτη (βλέπε εικόνα), δημιουργούνται ρεύματα Foucault, με συνέπεια δύναμη αντίδρασης στην κίνηση του ελάσματος, ανάλογη της ταχύτητάς του, «βύθιση» του ελάσματος περισσότερο ή λιγότερο στο μαγνητικό πεδίο, μεταβάλλει τον συντελεστή απόσβεσης



# πρώτες ύλες



## πηγές πρώτων υλών

- ΕΠΟΠΤΙΚΑ ΜΕΣΑ ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ, ΖΑΙΜΗ 60, 26223 ΠΑΤΡΑ, 2610220365  
<http://www.epoptiki.gr/eshop/products.aspx?rid=1&catid=16>
- ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ, ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΟΥ 10, 26222 ΠΑΤΡΑ  
<http://www.papelectronics.gr/category/msinstruments/>
- ΗΛΕΚΤΡΟΝ, ΚΑΝΑΚΑΡΗ 156Α, 26221 ΠΑΤΡΑ
- ΠΑΠΑΙΩΑΝΝΟΥ ΙΩΑΝΝΗΣ, ΠΑΛΑΙΩΝ ΠΑΤΡΩΝ ΓΕΡΜΑΝΟΥ 143, 26225 ΠΑΤΡΑ

## βιβλιογραφία

### Ιστοσελίδες

<http://www.madehow.com/Volume-1/Seismograph.html>

<http://jclahr.com/science/psn/wielandt/node13.html>

<http://www.jclahr.com/science/psn/epics/reports/index.html>

<http://jclahr.com/science/psn/youden/>

### Ιστοσελίδα MDL Μηχανολογικές Μετρήσεις

*KATASKEYH SEISMOGRAFOU 1.PPT*

*~PROJECT~.RAR*

### Βιβλία

*“Instrumentation in Earthquake Seismology”* by J.Havskov & G.Alguacil,  
ISBN-10 1-4020-2968-3, SPRINGER 2010