



Εκπαιδευτική Ημερίδα Κυματικής Ενέργειας

Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αμφιθέατρο Λεωνίδας Ζέρβας
Αθήνα, 21 Οκτωβρίου 2010

Σημειακοί απολήπτες και συστήματα ελέγχου κίνησης

Γεώργιος Κατσαούνης

Ναυπηγός Μηχ. Μηχ/κός

Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας

Υδροδυναμικής, ΕΜΠ



katsage@mail.ntua.gr

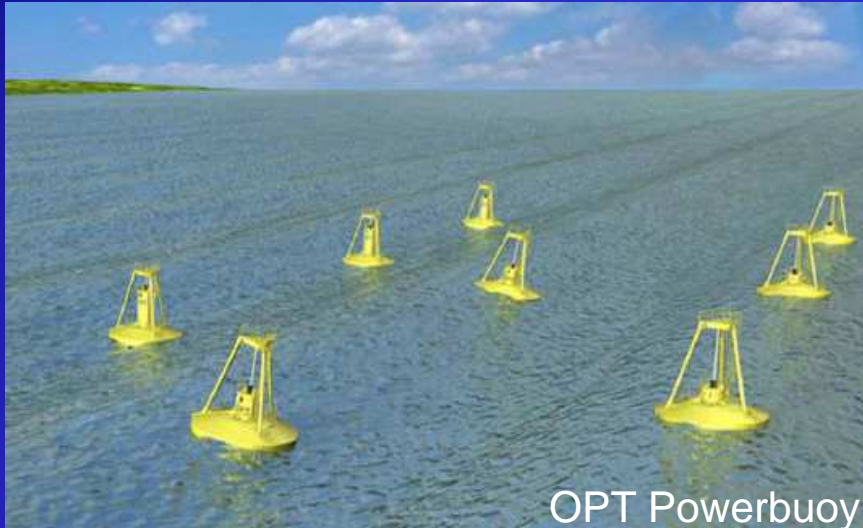
Intelligent Energy



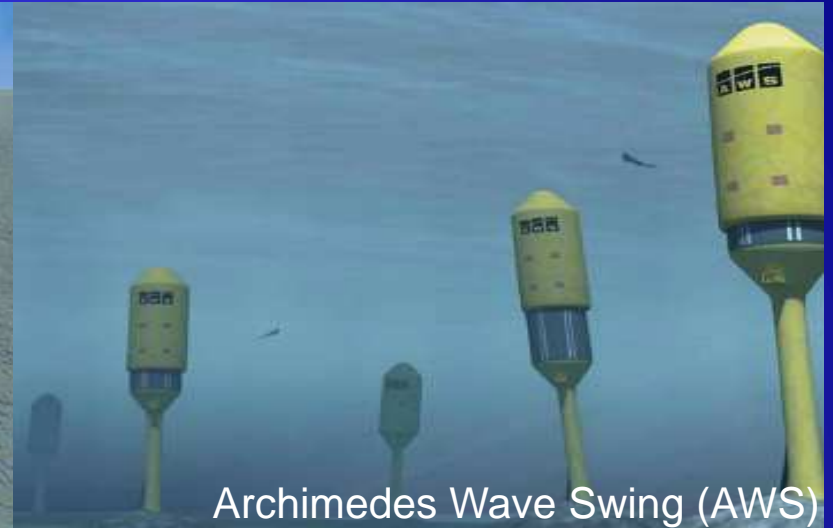
Europe



ΕΝΘΥ ΕΜΠ



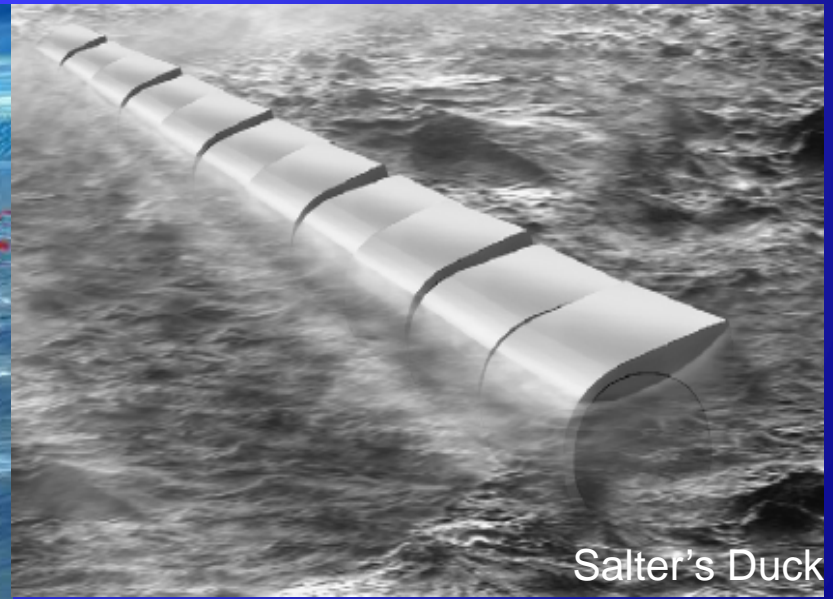
OPT Powerbuoy



Archimedes Wave Swing (AWS)



Pelamis wave farm



Salter's Duck

Intelligent Energy  Europe



Αθήνα, 21 Οκτ. 2010

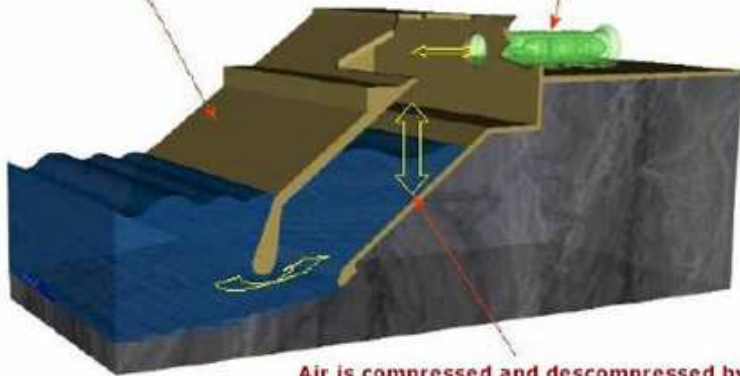
σελ. 2



ENOY E.I.

Reinforced concrete Capture Chamber set into the excavated rock face.

The Wells Turbines rotate in the same direction regardless of the direction of the air flow. Thus generating, irrespective of the upward or downward movement of the water column.

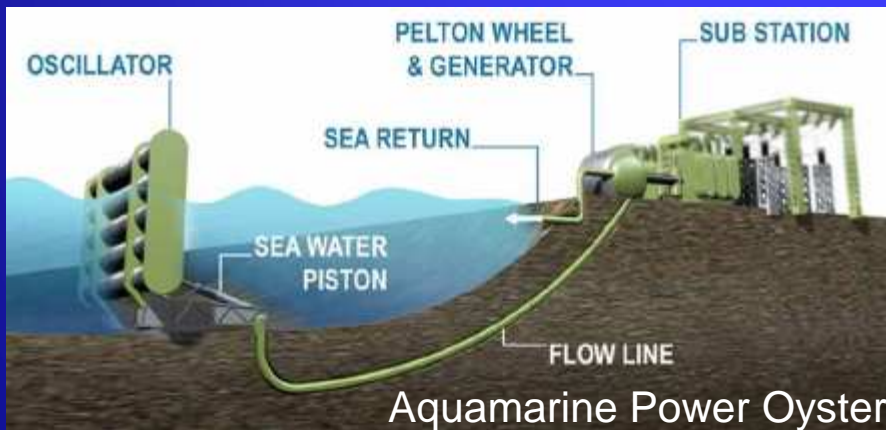


Air is compressed and decompressed by the Oscillating Water Column (OWC). This causes air to be forced through the Wells Turbine and is then drawn back through the Wells Turbine.

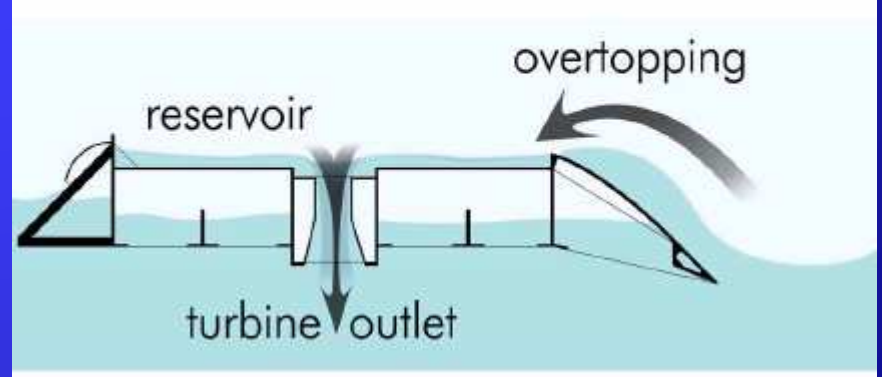
Limpet OWC



Wave Dragon



Aquamarine Power Oyster





ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας (ΜΚΕ) κατατάσσονται ανάλογα με το μέγεθός τους και τη διάταξή τους σε:

Σημειακούς απολήπτες (point absorbers):

- Μικρό μέγεθος σε σχέση με το μήκος του επικρατούντος κυματισμού,
- *Παρουσιάζουν φαινόμενα συντονισμού με σχετικά στενό εύρος συχνοτήτων απόκρισης,*
- Μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια περισσότερη από εκείνη που προσπίπτει στη διάστασή τους.



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Επιμήκεις μετατροπείς.

- Είναι πλωτά ή σταθερά σώματα,
- Διαστάσεις συγκρινόμενες με το μήκος του επικρατούντος κυματισμού.
- Αν είναι σε διάταξη παράλληλη με τη διάδοση του κυματισμού λέγονται **αποσβεστήρες (attenuators)**,
- αν είναι σε διαταξη παράλληλη με το μέτωπο του κύματος είναι **τερματικού τύπου (terminators)**.
- Το πλάτος συλλογής ενέργειας σπάνια ξεπερνά τις διαστάσεις τους,
- *αλλά έχουν ένα πλατύτερο εύρος συχνοτήτων απόκρισης.*



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Κατηγοριοποίηση Μετατροπών Κυματικής Ενέργειας

Ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης:

- Ανοικτή θάλασσα
- Κοντά στην ακτή
- Πάνω στην ακτή

Επιπλέον:

- Πλωτές κατασκευές
- Υποβρύχιες
- Εγκατεστημένες στον πυθμένα



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Κατηγοριοποίηση Μετατροπών Κυματικής Ενέργειας

Ανάλογα με τον τύπο του μηχανισμού μετατροπής ισχύος (ΡΤΟ)

- Μηχανικός
- Υδραυλικός
- Πεπιεσμένου αέρα
- Ηλεκτρικός

Ανάλογα με τον προορισμό της παραγόμενης ισχύος

- Ηλεκτρισμός
- Αφαλάτωση
- Θέρμανση-Ψύξη
- Άντληση



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Η απόληψη της ενέργειας των θαλάσσιων κυματισμών αντιμετωπίζει ιδιαίτερες δυσκολίες, λόγω κυρίως:

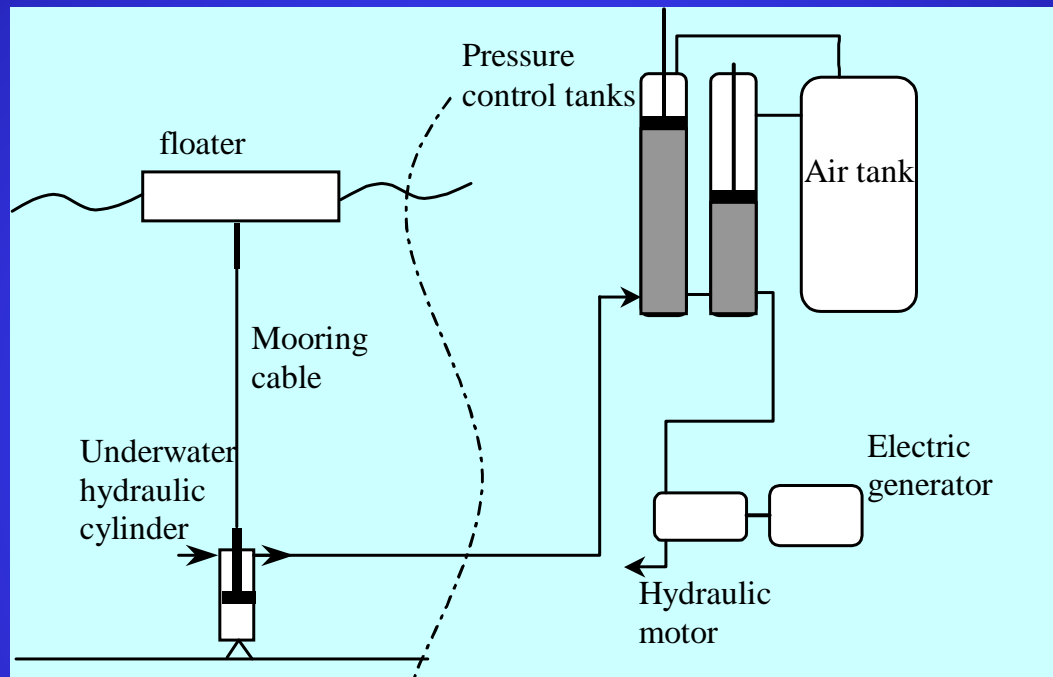
- ▶ Της μη μόνιμης κίνησης των μορίων του νερού (τυχαία φύση κυματισμών, προσπιπτόντων από πολλές διευθύνσεις)
- ▶ Της ιδιαίτερα υψηλής πυκνότητας της ενέργειας, η οποία συγκεντρώνεται σε ένα μικρό βάθος από την επιφάνεια και σε ένα ρευστό με πυκνότητα, ιδιαίτερα μεγαλύτερη από άλλα μέσα, όπως για παράδειγμα, ο ατμοσφαιρικός αέρας
- ▶ Της διαφορετικής συχνότητας της προσφερόμενης ενέργειας (συχνότητα κυματισμών) από εκείνη της κατανάλωσης
- ▶ Του ιδιαίτερα δύσκολου θαλάσσιου περιβάλλοντος, το οποίο μπορεί να επιβάλει στις κατασκευές ακραίες φορτίσεις, δεκάδες φορές υψηλότερες από τις αντιστοιχούσες στην κατάσταση λειτουργίας.

Μία από τις λύσεις που διερευνάται διεθνώς είναι η χρήση **σημειακών αποληπτών** με ταλαντευόμενα σώματα



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Σε μια πρώτη προσέγγιση, η μετατροπή ενέργειας επιτυγχάνεται με την αλληλεπίδραση με ένα (πλωτό ή συγκρατούμενο) ταλαντευόμενο σώμα:

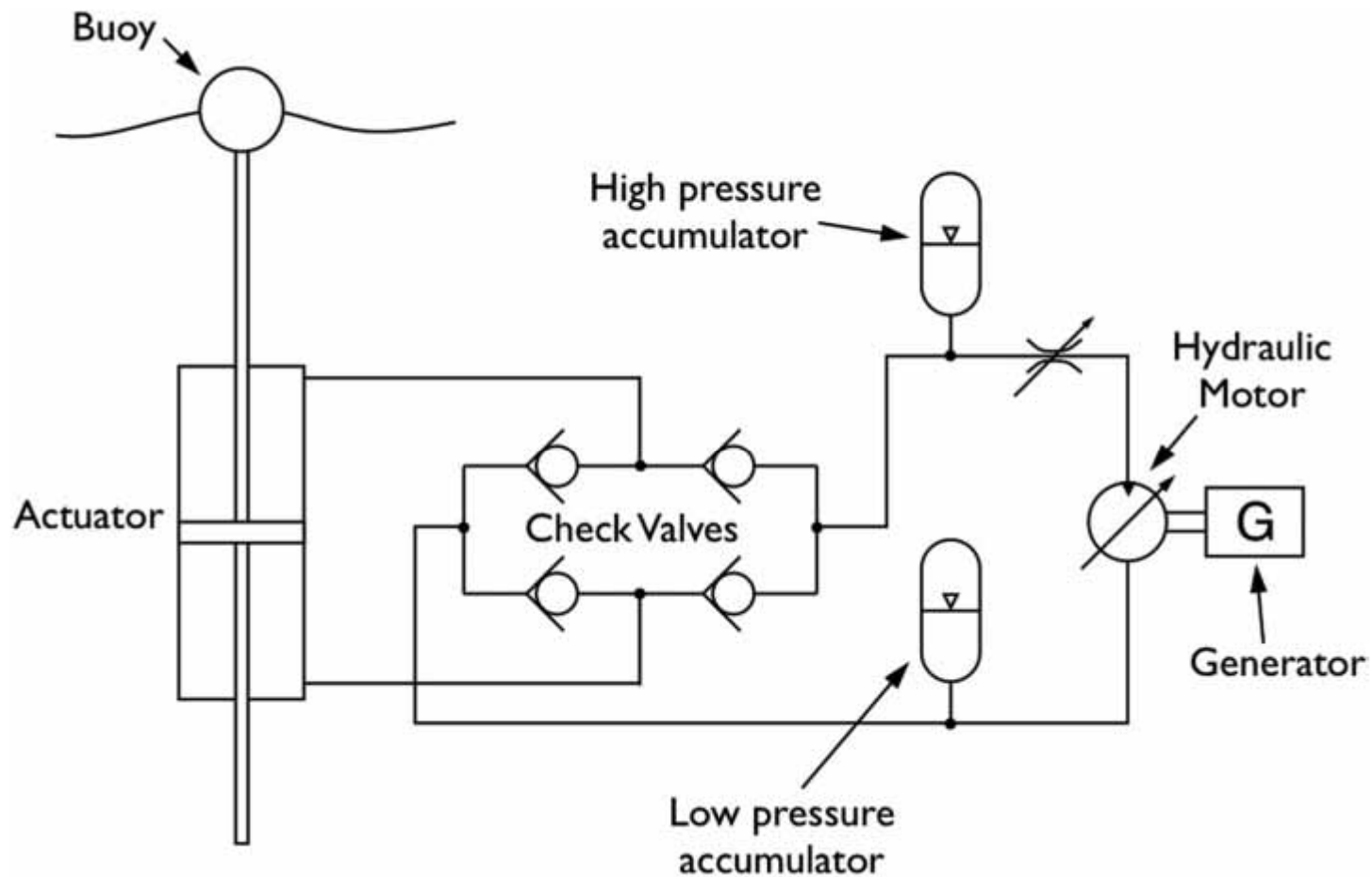


Η μεταβολή της θέσης του ταλαντευόμενου σώματος από ένα σταθερό σημείο αγκύρωσης (ή η μεταβολή της σχετικής απόστασης μεταξύ δύο ταλαντευόμενων σωμάτων) εκμεταλλεύεται από κατάλληλα πνευματικά ή ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα για την τελική μετατροπή ενέργειας.



ΕΝΘΥ ΕΜΡΓ

Γενική αρχή λειτουργίας σημειακού μετατροπέα ενέργειας



Πηγή: *Drew et al, 2009*

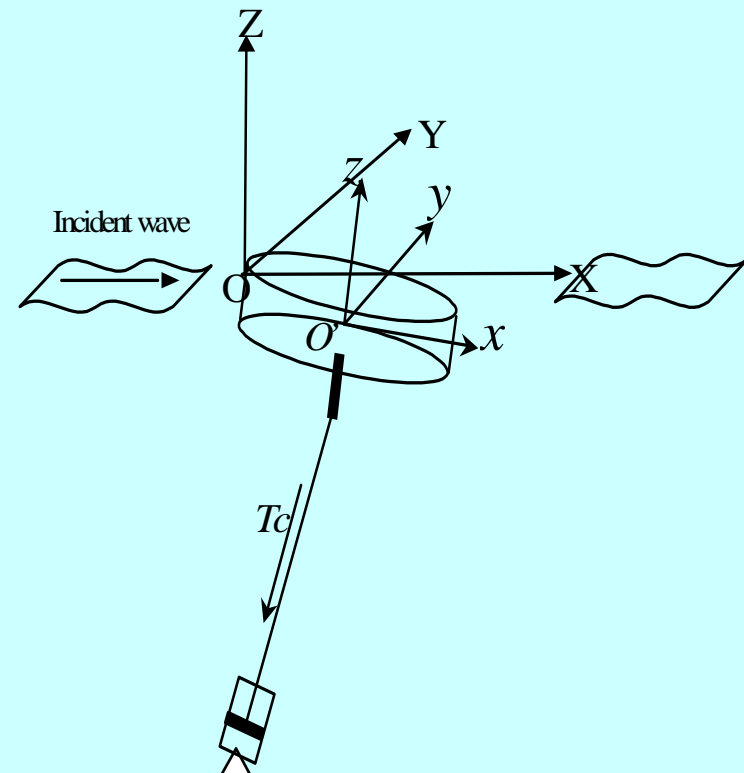
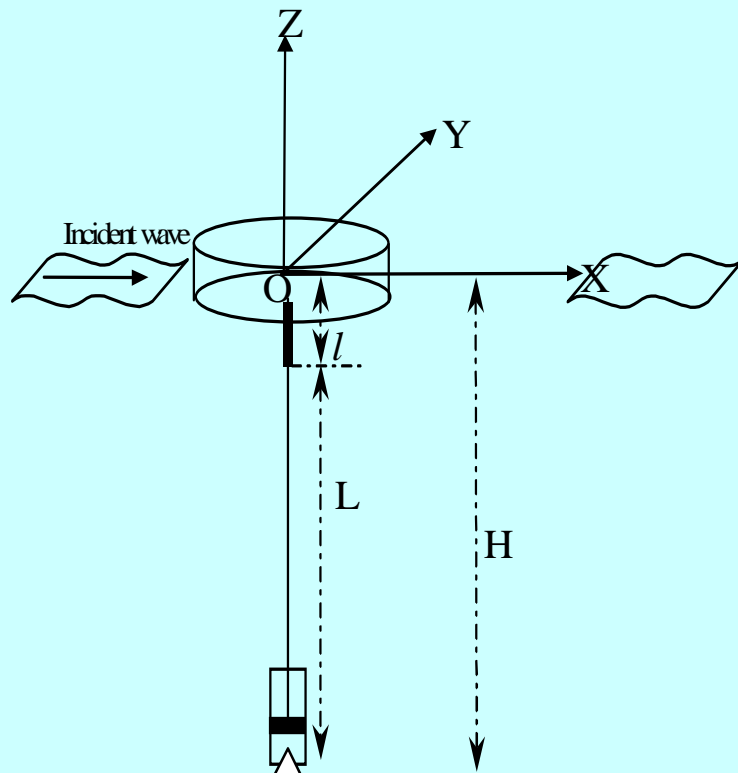


Η ανάλυση της συμπεριφοράς του ΜΚΕ γίνεται με προσομοίωση της κίνησής του και επίλυση του δυναμικού προβλήματος ισορροπίας

ΕΝΘΥ ΕΜΠ

$$[m_s] \ddot{\vec{\xi}}(t) + [K] \vec{\xi}(t) =$$

$$\vec{F}_H(t) + \vec{F}_c(t) + B_0 \vec{k} - m g \vec{k} + \vec{F}_{PTO}(t)$$





ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Οι παράμετροι της εξίσωσης ισορροπίας εξαρτώνται ισχυρά από την συχνότητα κίνησης

$$[m_s] \ddot{\vec{\xi}}(t) + [K] \vec{\xi}(t) = \vec{F}_H(t) + \vec{F}_c(t) + B_0 \vec{k} - m g \vec{k} + \vec{F}_{PTO}(t)$$

$$[m_s] = \text{diag}[m, m, m, I_{xx}, I_{yy}]$$

$$[K] = \text{diag}[0, 0, \rho g A_{WL1}, \Delta GM, \Delta GM]$$



ΕΝΟΗ ΕΜΠ

Οι παράμετροι της εξίσωσης ισορροπίας εξαρτώνται ισχυρά από την συχνότητα κίνησης/κυματισμού

$$F_{H,k}(t) = - \sum_{j=1}^n \left\{ \bar{a}_{kj} \cdot \ddot{\xi}_j(t) + \int_{-\infty}^t R_{kj}(t-\tau) \cdot \dot{\xi}_j(\tau) d\tau \right\} + F_{D,k}(t) + F_{w,k}(t)$$

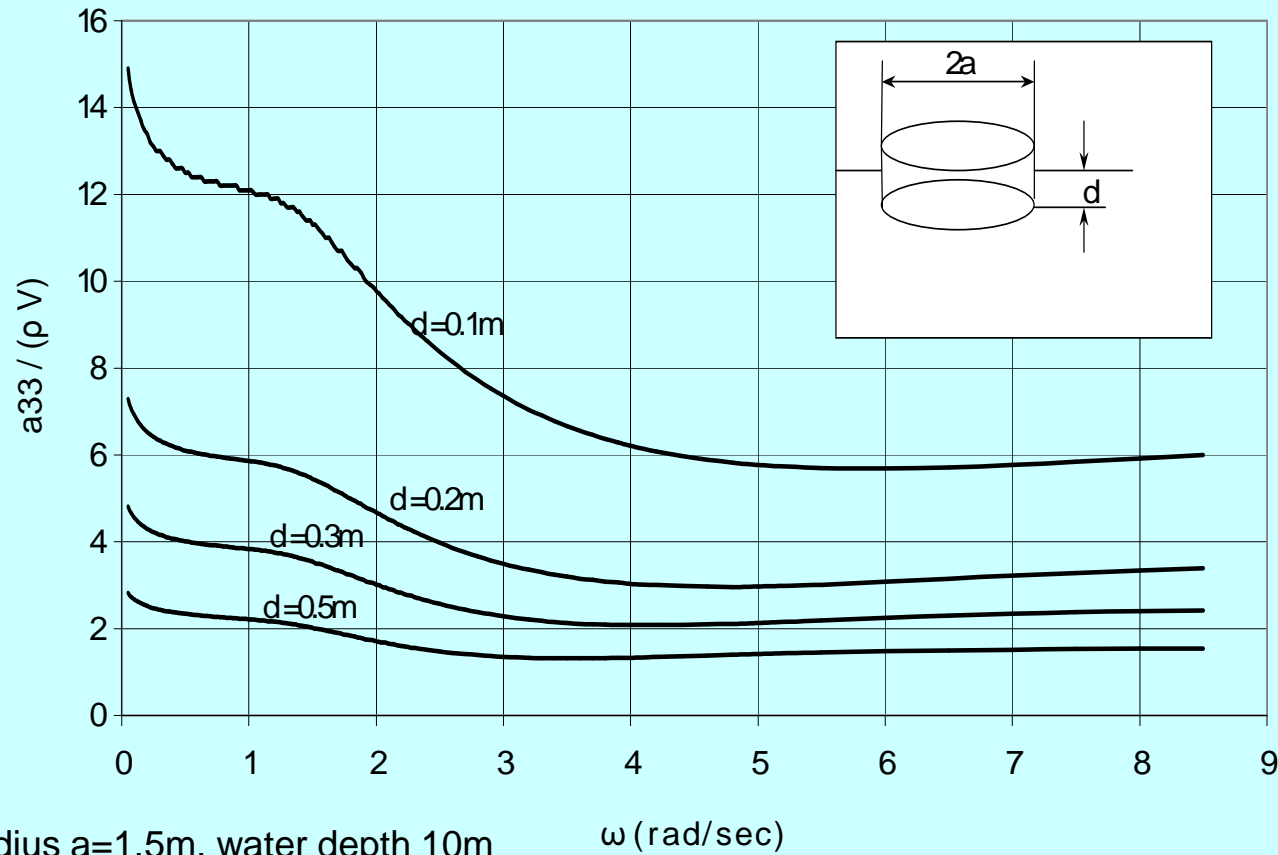
$$R_{kj}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{kj}(\omega) \cos(\omega t) d\omega$$

$$F_{w,k}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^M \left(\frac{F_{w,k}(\omega_i, \theta_l)}{A} \right) \sqrt{2S(\omega_i, \theta_l) \Delta\omega \Delta\theta} x \cos(\omega_i t + k_i x \cos \theta_l + k_i y \sin \theta_l + \phi_k(\omega_i, \theta_l) + \varepsilon_{il})$$



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Υδροδυναμικές παράμετροι πρόσθετης μάζας

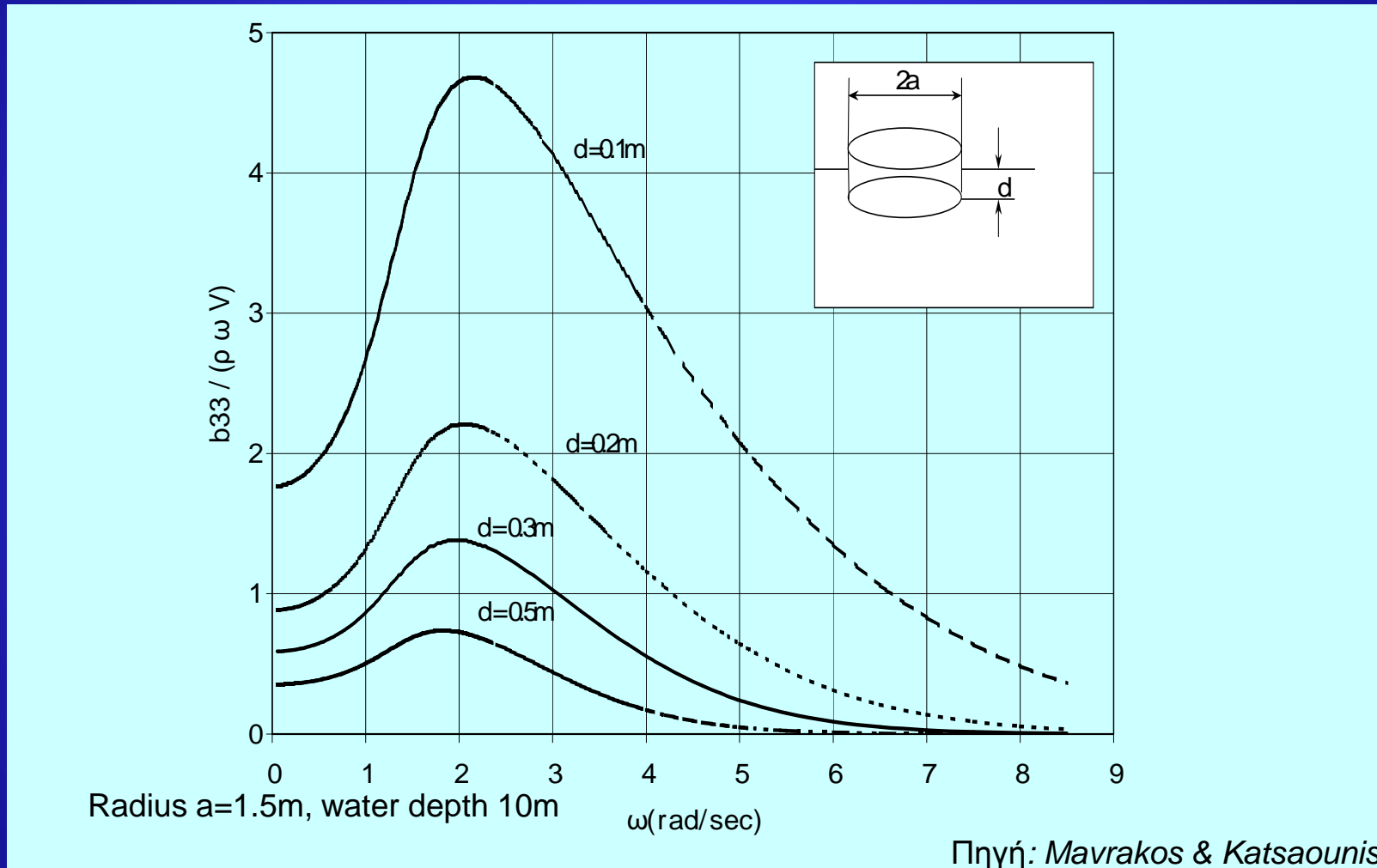


Πηγή: Mavrakos & Katsaounis



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

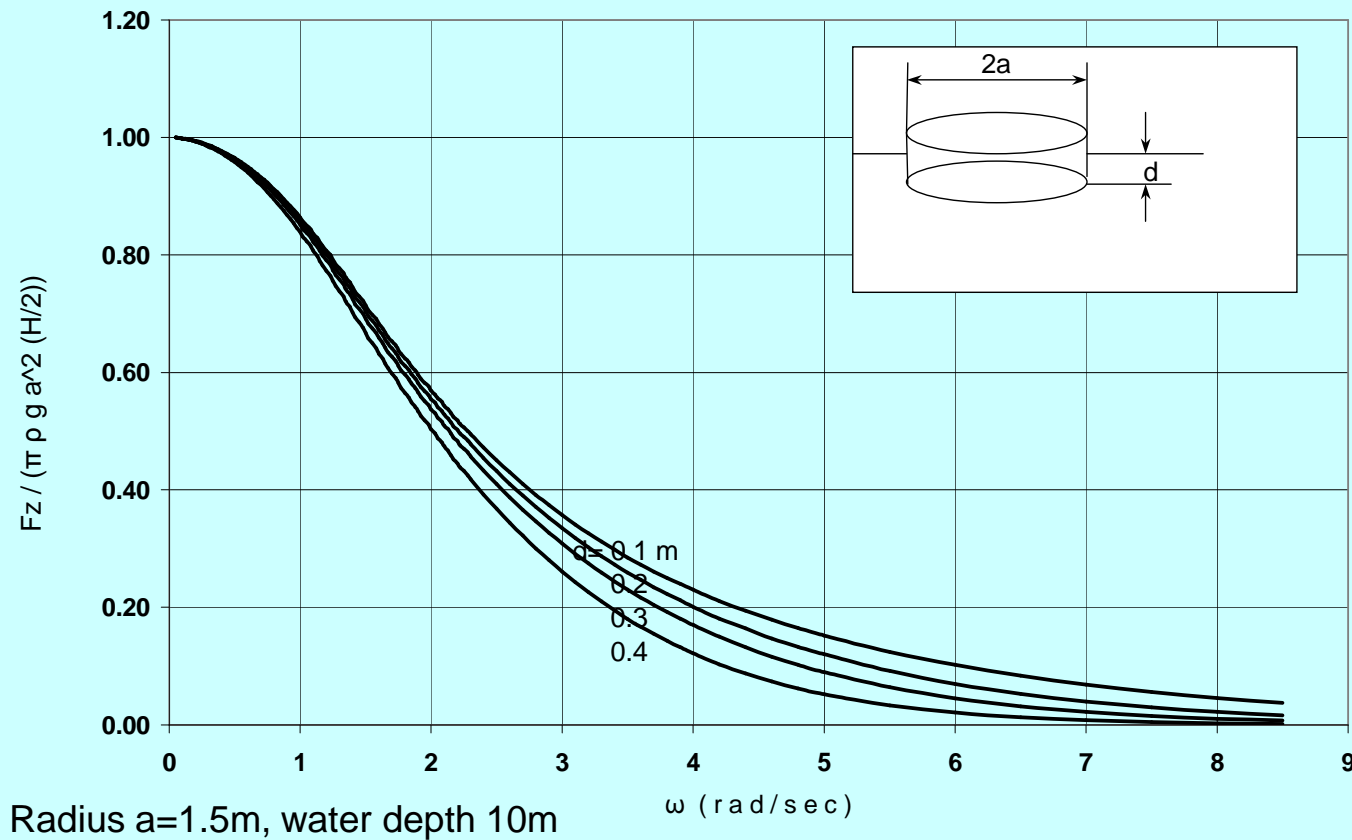
Υδροδυναμικές παράμετροι πρόσθετης απόσβεσης





ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Υδροδυναμικές διεγείρουσες δυνάμεις λόγω κυματισμού

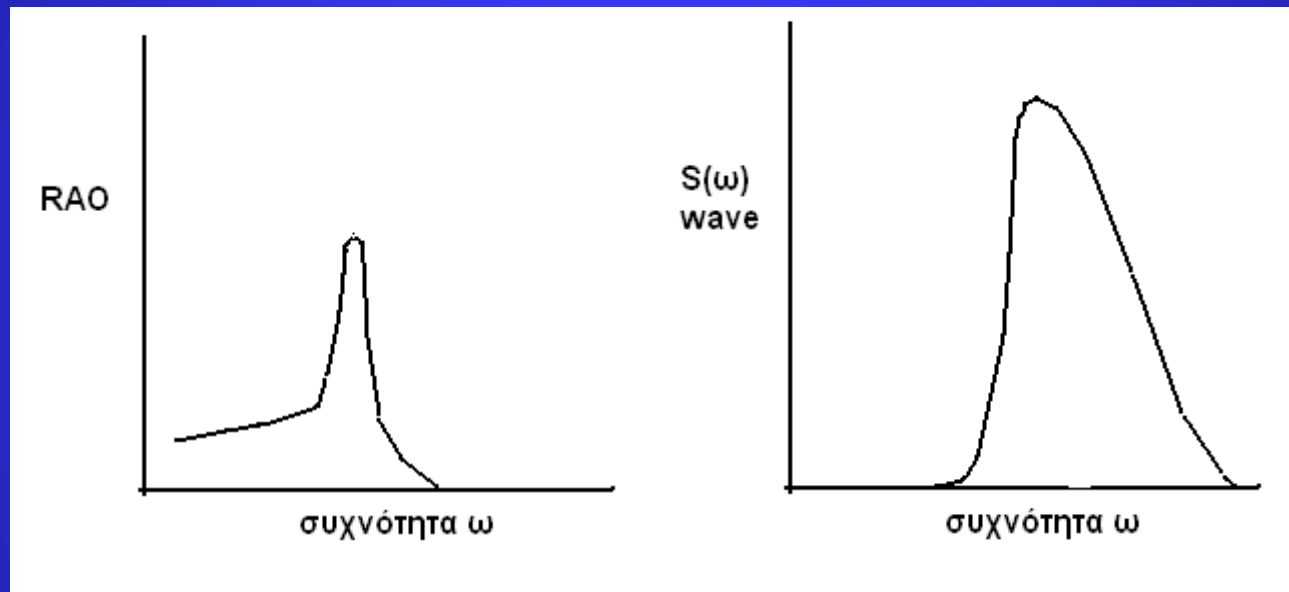


Πηγή: *Mavrakos & Katsaounis*



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Αποτέλεσμα της εξάρτησης των παραμέτρων κίνησης από τη συχνότητα αλλά και της ταλαντωτικής φύσης της συσκευής είναι να παρουσιάζει η αποκριση του συστήματος καταστάσεις συντονισμού



$$\text{Συχνότητα συντονισμού: } \omega \approx \sqrt{\frac{K}{m + m_a}}$$



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Παράδειγμα ετήσιας διακύμανσης ύψους και περιόδου ενέργειας κυματισμού

Bivariate frequency table of Hs and Te

LOCATION: CRETE - HERAKLION SEASON: Annual

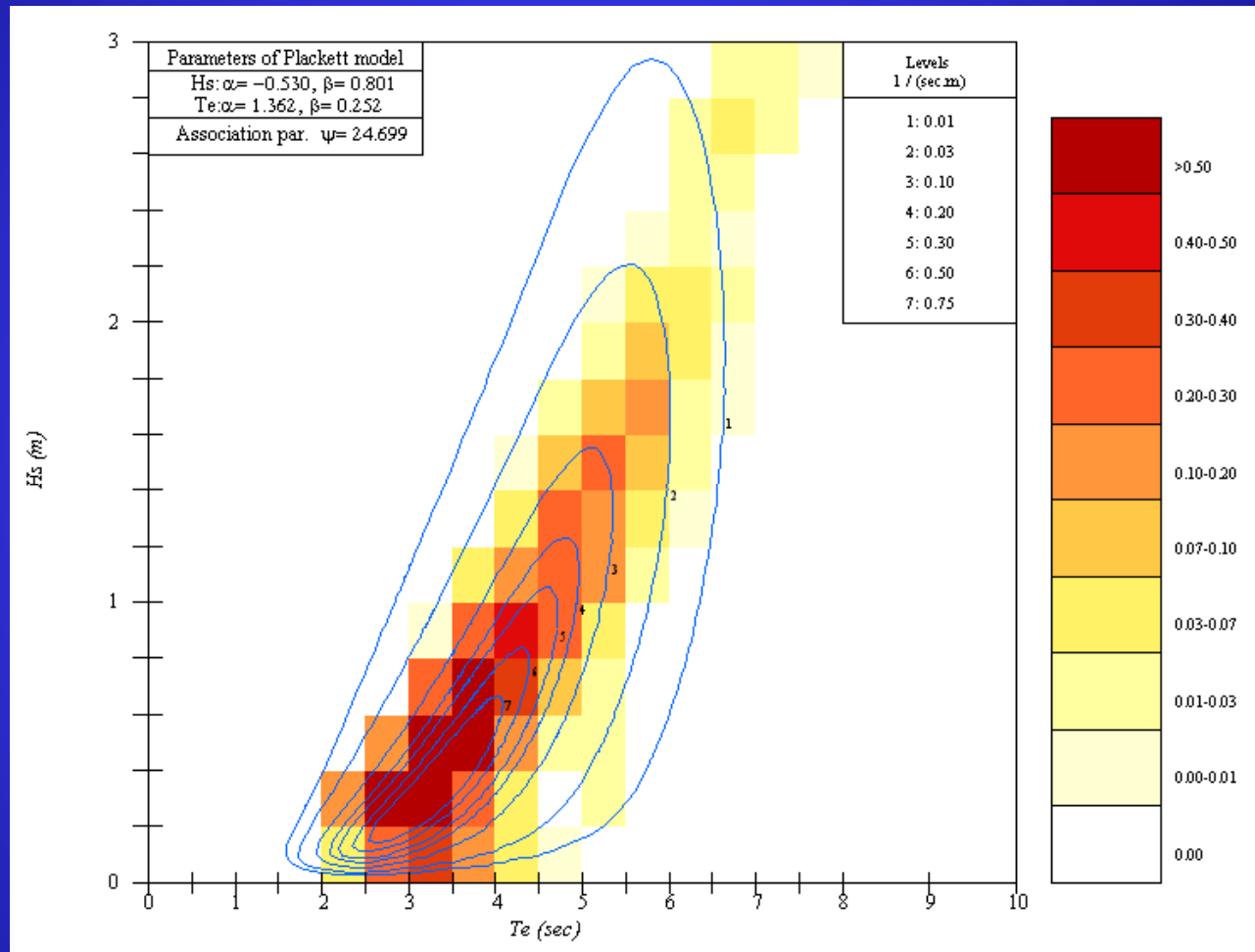
Hs(m)	Te(sec)																			TOTAL
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8	9	10	
0.00-0.20	0	0	0	0	7	30	34	12	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89
0.20-0.40	0	0	0	0	11	61	79	26	7	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	186
0.40-0.60	0	0	0	0	0	16	120	64	16	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	221
0.60-0.80	0	0	0	0	0	0	28	61	38	10	3	0	0	0	0	0	0	0	0	140
0.80-1.00	0	0	0	0	0	0	1	25	44	25	4	0	0	0	0	0	0	0	0	99
1.00-1.20	0	0	0	0	0	0	0	5	19	30	13	3	0	0	0	0	0	0	0	70
1.20-1.40	0	0	0	0	0	0	0	0	4	22	19	7	1	0	0	0	0	0	0	53
1.40-1.60	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8	22	9	2	0	0	0	0	0	0	42
1.60-1.80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10	11	2	1	0	0	0	0	0	26
1.80-2.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	9	5	1	0	0	0	0	0	18
2.00-2.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	4	2	0	0	0	0	0	11
2.20-2.40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0	5
2.40-2.60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	6
2.60-2.80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	2	0	0	0	0	8
2.80-3.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	0	0	0	6
3.0-4.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7	2	1	0	0	11
4.0-5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	4
5.0-6.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.0-10.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	0	0	0	0	18	107	262	193	134	101	79	44	22	16	11	5	3	0	0	1000

Πηγή Weratlas



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Παράδειγμα ετήσιας διακύμανσης ύψους και περιόδου ενέργειας κυματισμού



Πηγή Weratlas



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Ορια απορροφώμενης κυματικής ισχύος από σημειακούς απολήπτες

Επερχόμενη ισχύς κυματισμού:

$$J_w \sim 0.5 H_s^2 T_e \text{ kW/m}$$

H_s [m]: το σημαντικό ύψος κυματισμού

T_e [sec]: η περίοδος ενέργειας

Θεωρητικό όριο απόληψης ισχύος:

$$P \sim J_w^* \lambda / 2\pi \quad (\lambda: \text{μήκος κυματισμού})$$

Λειτουργικό όριο απόληψης ισχύος :

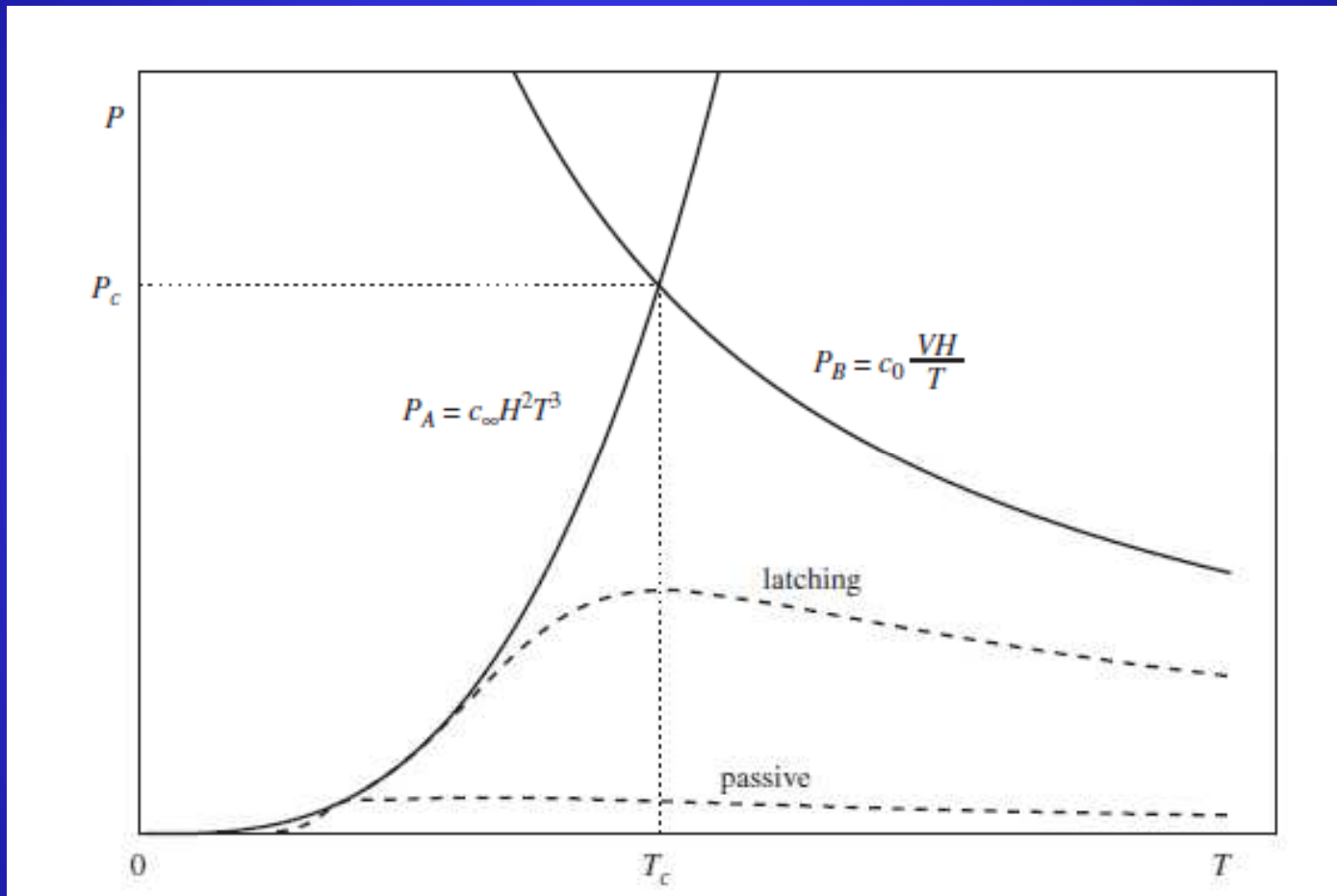
(ύστερα από λογικές υποθέσεις για τη μέγιστη ανύψωση και τον όγκο, που θεωρείται μικρός)

$$P < \pi \rho g V H / (4T) \quad (V \text{ ο βυθισμένος όγκος})$$



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Ορια απορροφώμενης κυματικής ισχύος από σημειακούς απολήπτες



Πηγή: Falnes 2007



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Η αύξηση της απορροφόμενης ισχύος γίνεται με:

- Τη διατύπωση των συνθηκών που πρέπει να ικανοποιούνται για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης
- Ο καθορισμός της μεθόδου με την οποία θα επιτευχθούν οι παραπάνω συνθήκες
- Ο σχεδιασμός των κατάλληλων μηχανισμών οι οποίοι θα ενσωματωθούν στη διάταξη του μετατροπέα ενέργειας και θα πραγματώσουν τα παραπάνω.



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Συνθήκες βελτιστοποίησης:

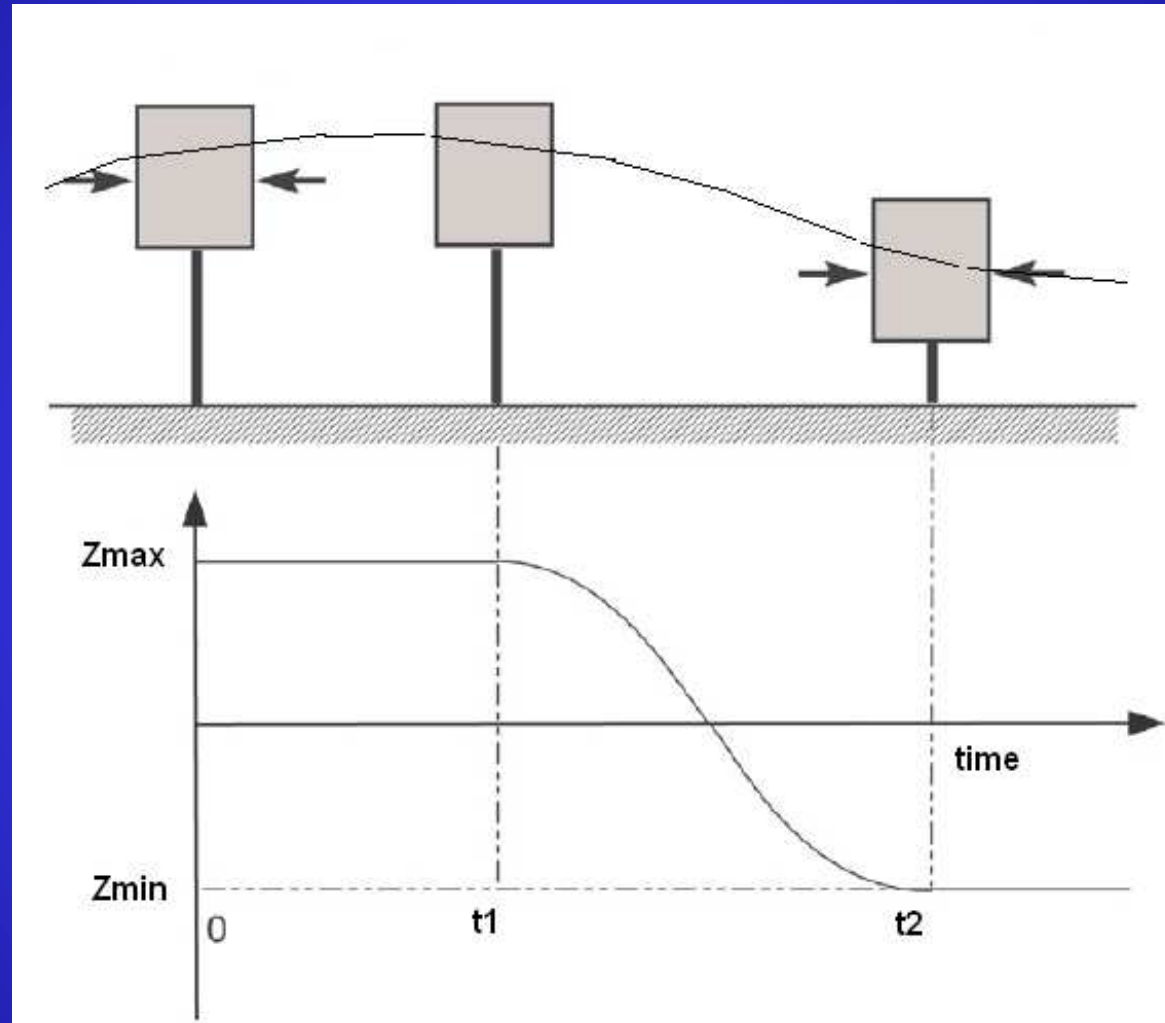
- Συνθήκη *βέλτιστης φάσης* μεταξύ της κίνησης του ταλαντευόμενου σώματος και της διεγείρουσας δύναμης από τον θαλάσσιο κυματισμό
- Συνθήκη *βέλτιστου εύρους κίνησης*, ώστε, τελικά, η διάταξη να απορροφά ποσό ενέργειας ίσο με αυτό που προσδίδεται στο υγρό από την καθαυτή κίνηση του σώματος.

Οι συνθήκες αυτές ικανοποιούνται στον συντονισμό, με την πρόσθετη απαίτηση, η γραμμική σταθερά απόληψης ισχύος να είναι ίση με την υδροδυναμική απόσβεση $b(\omega)$. Για λειτουργία σε συχνότητες εκτός συντονισμού ακολουθούνται οι μέθοδοι ελέγχου κίνησης



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

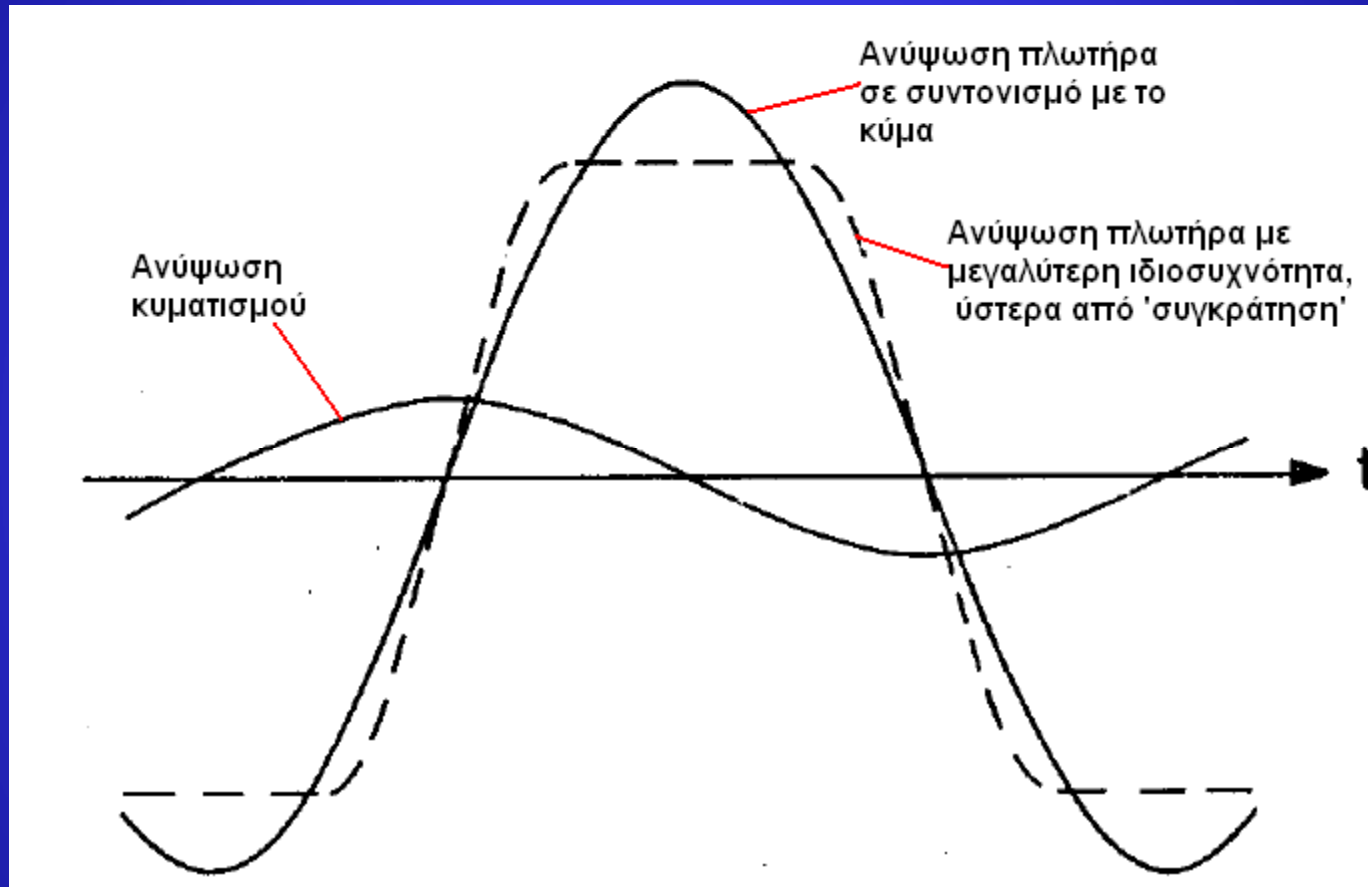
Μέθοδος συγκράτησης (latching control)





ΕΝΘΥ ΕΜΠ

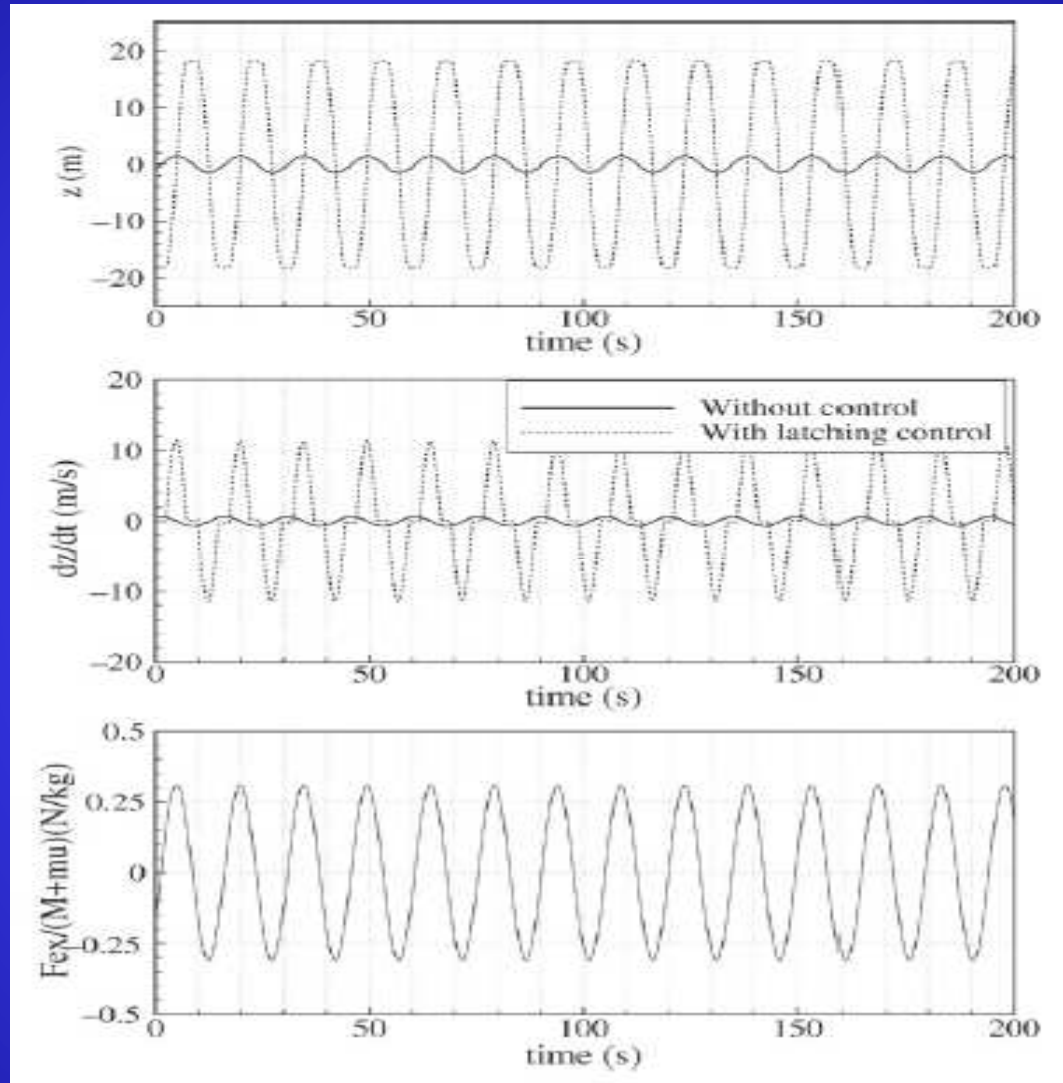
Μέθοδος συγκράτησης (latching control)





ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Μέθοδος συγκράτησης (latching control)

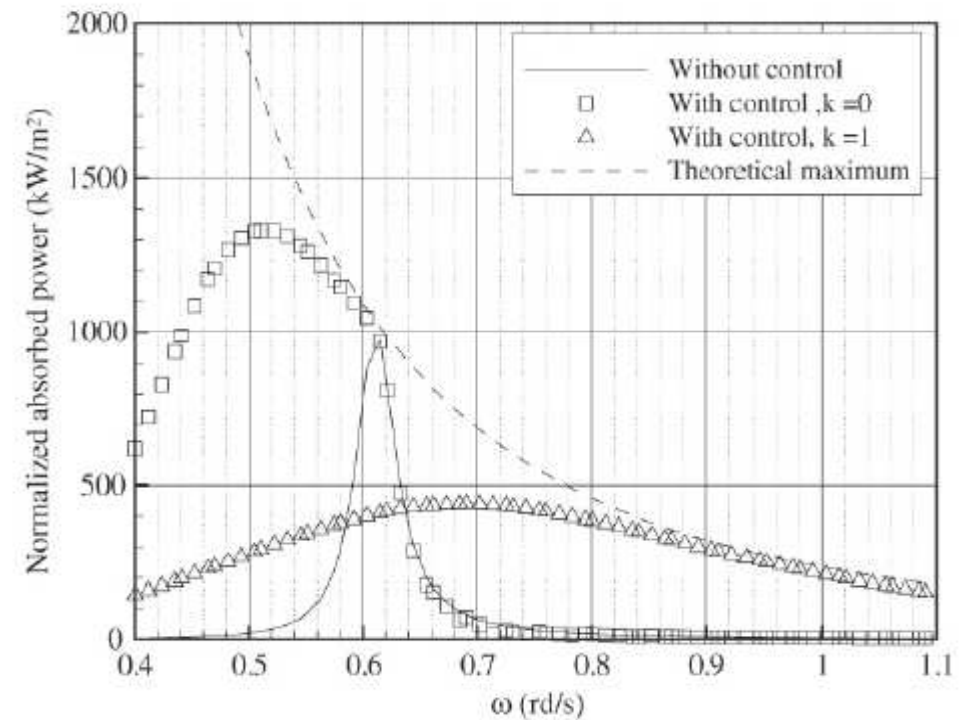
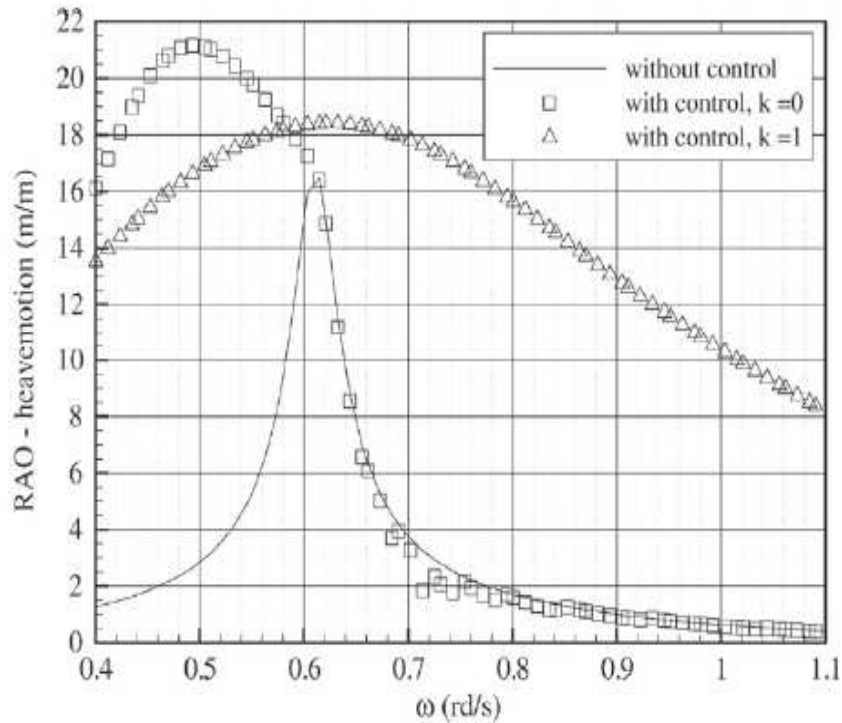


Πηγή: Babarit & Clement, 2006



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Μέθοδος συγκράτησης (latching control)



Πηγή: Babarit & Clement, 2006



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Ο έλεγχος με ανάδραση (*reactive control*):

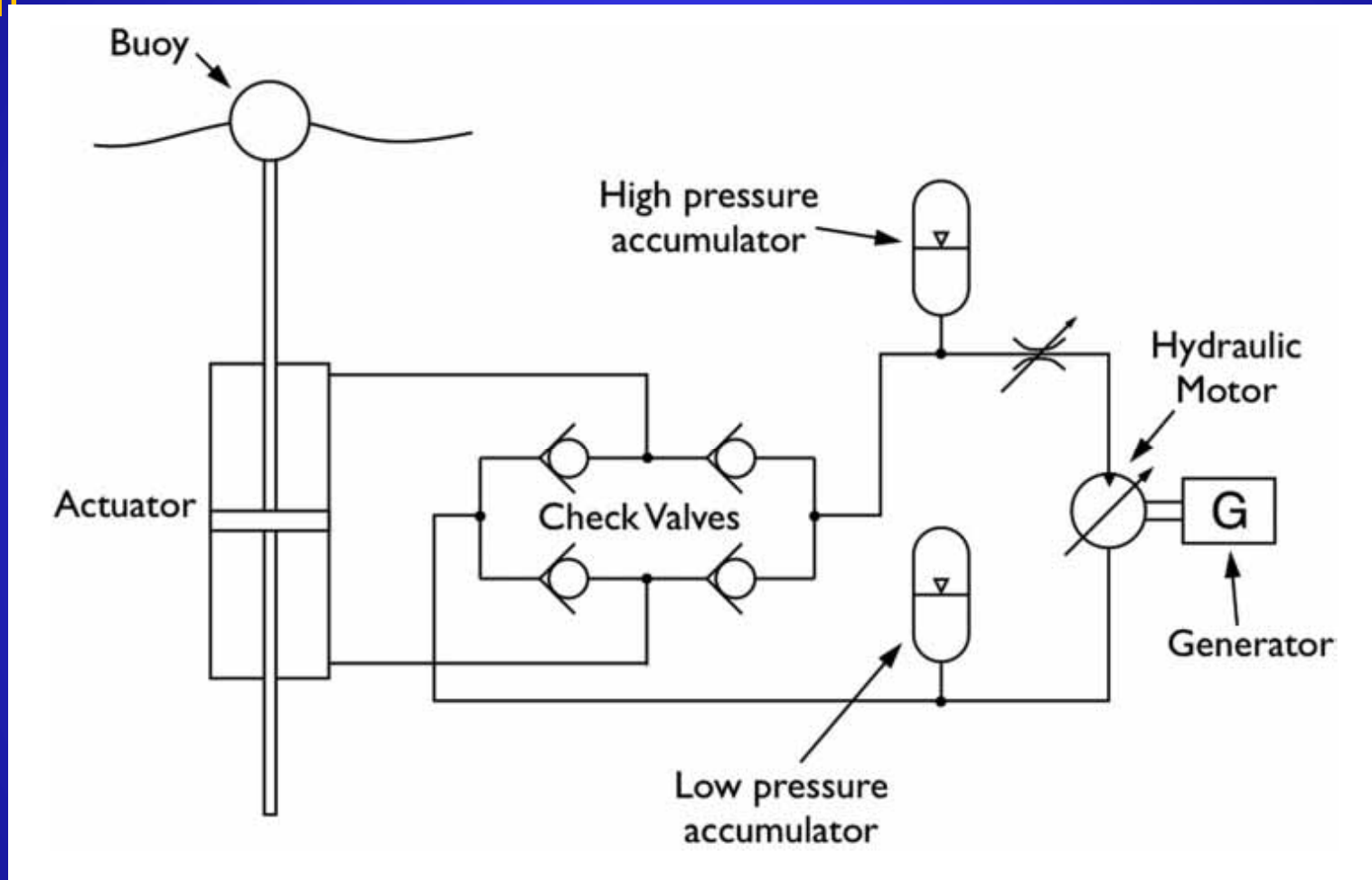
$$\begin{aligned} [m_s] \ddot{\vec{\xi}}(t) + [K] \vec{\xi}(t) = \\ \vec{F}_H(t) + \vec{F}_c(t) + B_0 \vec{k} - m g \vec{k} + \\ + \vec{F}_{PTO}(t) + [a] \ddot{\vec{\xi}}(t) + [b] \vec{\xi}(t) \end{aligned}$$

Επιβάλλονται στο σώμα δυνάμεις ανάλογες με την επιτάχυνσή του ή/και με την μετατόπισή του, ώστε να μεταβάλλονται τα αδρανειακά (inertial) χαρακτηριστικά του και η παράμετρος ‘ακαμψίας’ (stiffness). Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι οι παραπάνω δυνάμεις παράγονται από το υποσύστημα απόληψης ενέργειας, το οποίο μπορεί να λειτουργεί άλλοτε μεν σαν γεννήτρια ισχύος, άλλοτε δε σαν κινητήρας.



ΕΝΘΥ ΕΜΓ

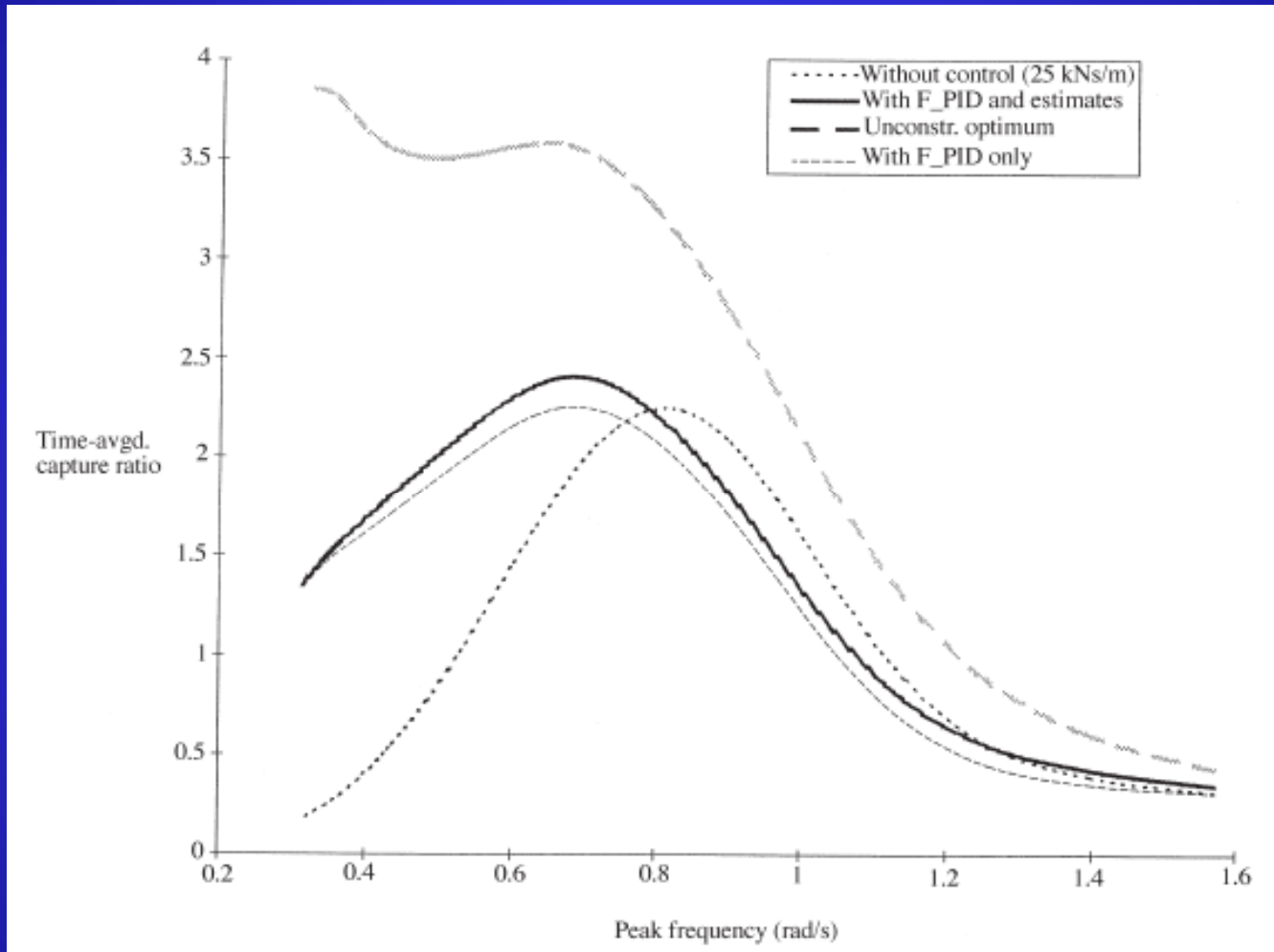
Επιβολή των δυνάμεων ελέγχου ανάδρασης από το PTO σύστημα (1)



Πηγή: *Drew et al, 2009*



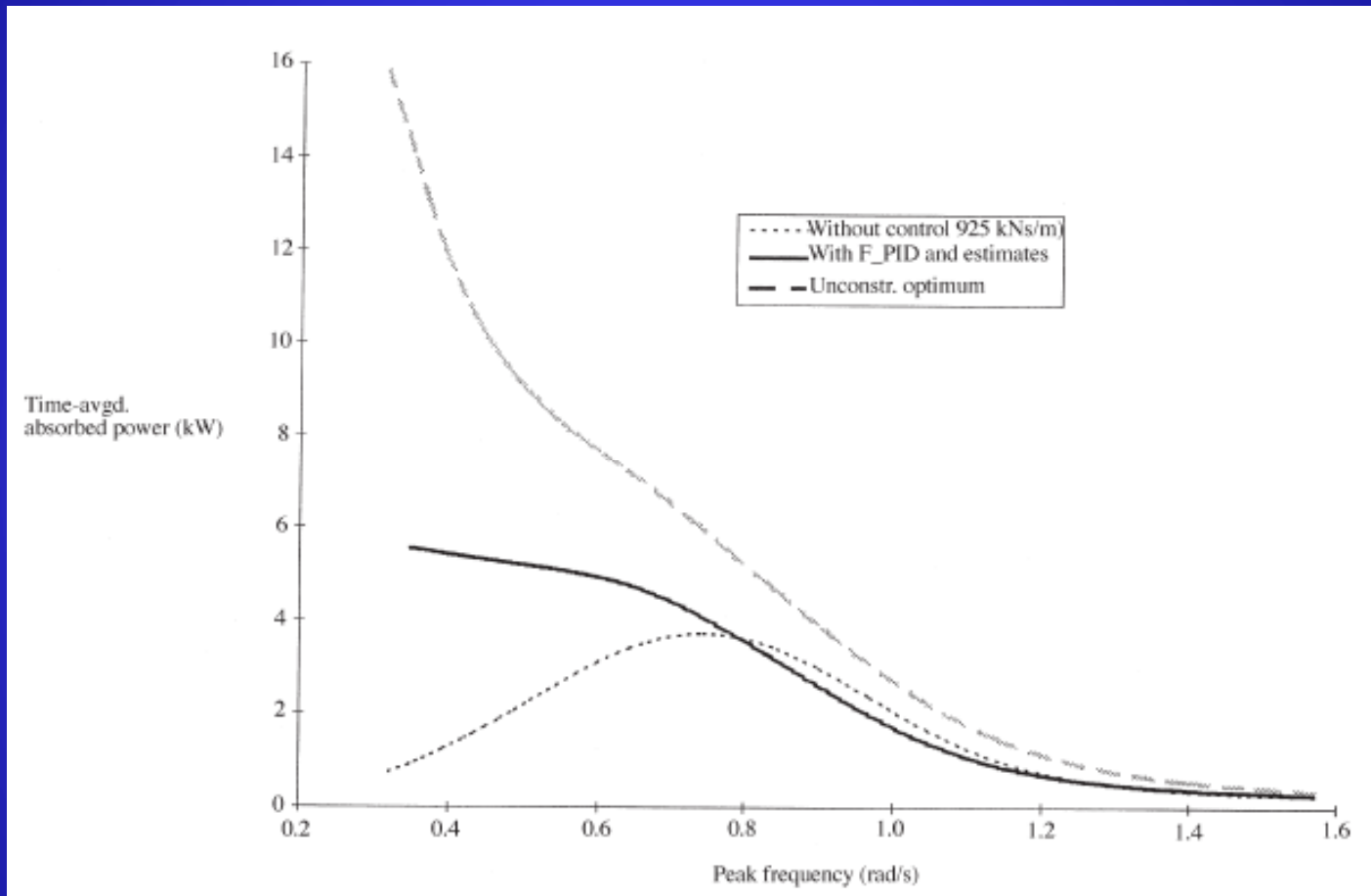
ΕΝΘΥ ΕΜΠ



Πηγή: Korde, 1999



ΕΝΘΥ ΕΜΠ



Πηγή: Korde, 1999



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

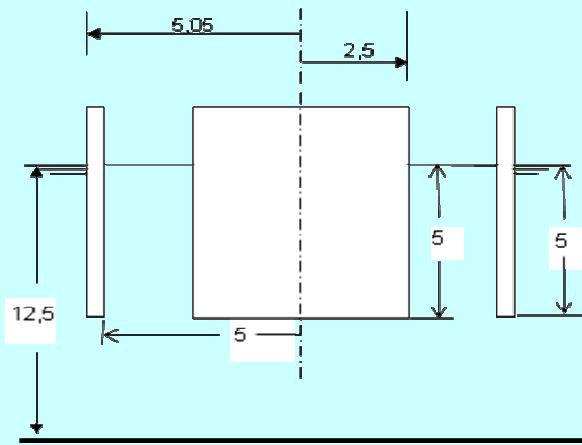
Ετσι, το πρόβλημα του επιτυχούς σχεδιασμού ενός σημειακού ΜΚΕ συνίσταται στον:

- ▶ Κατάλληλο υδροδυναμικό σχεδιασμό του πλωτήρα, ώστε να αλληλεπιδρά δραστικά με τους επικρατούντες κυματισμούς
- ▶ Κατάλληλο μηχανολογικό σχεδιασμό, ώστε να προκύπτουν είτε επιθυμητά αδρανειακά μεγέθη είτε να μπορούν να οδηγηθούν από συστήματα ελέγχου
- ▶ Κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος απόληψης ενέργειας, ώστε να μεγιστοποιεί την απορροφώμενη ενέργεια
- ▶ Εφαρμογή κατάλληλης μεθόδου ελέγχου κίνησης



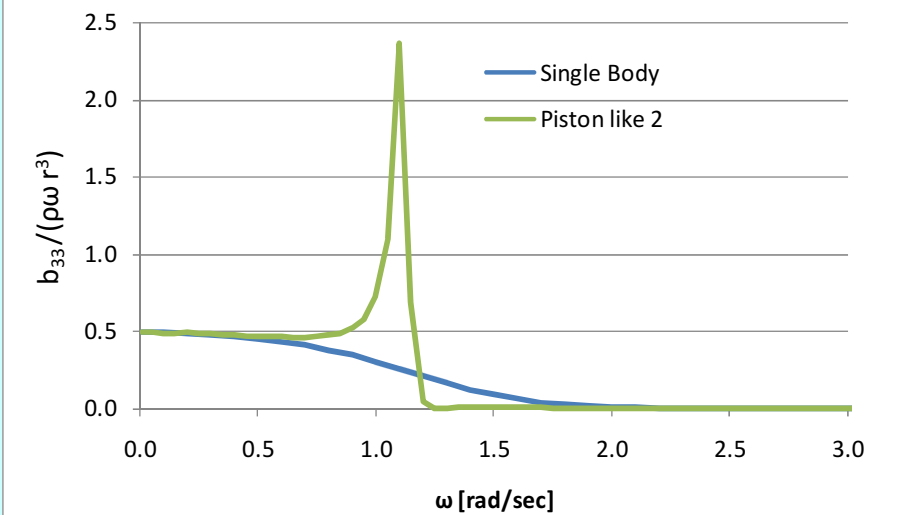
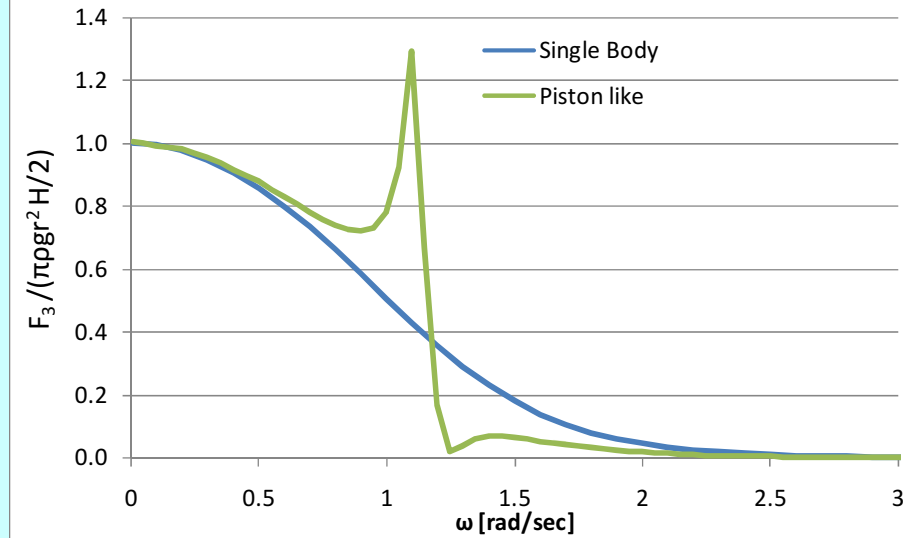
ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Καταστάσεις συντονισμού μπορούν να προκύψουν από κατάλληλο υδροδυναμικό σχεδιασμό



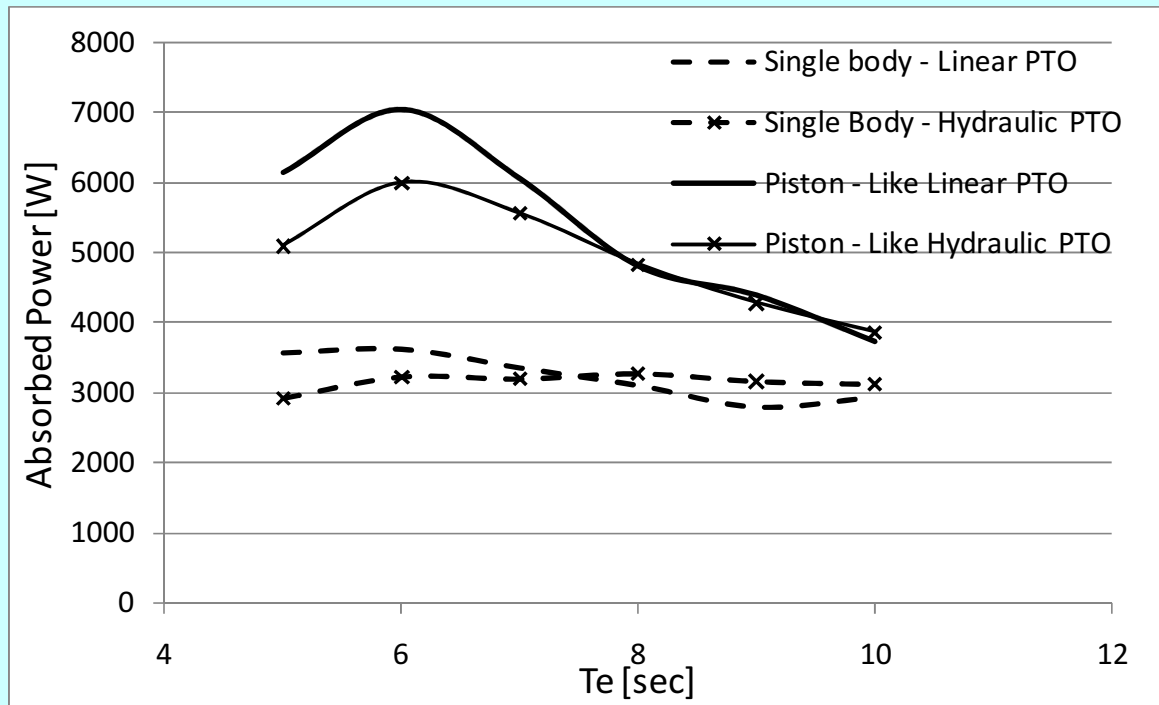
Σύγκριση μεμονωμένου σώματος και σώματος σε δακτύλιο

Πηγή: Mavrakos & Katsaounis, 2009





ΕΝΘΥ ΕΜΠ



Σύγκριση απορροφώμενης ισχύος μεταξύ
μεμονωμένου σώματος και σώματος σε δακτύλιο.
 $V=117.8\text{m}^3$

Πηγή: *Mavrakos & Katsaounis, 2009*



ΕΝΘΥ ΕΜΠ

Πειραματική δεξαμενή Εργαστηρίου ΕΝΘΥ ΕΜΠ





ΕΝΘΥ ΕΜΠ



Πειραματική διερεύνηση ΜΚΕ





ΕΝΟΥ ΕΜΠ



Intelligent Energy  Europe

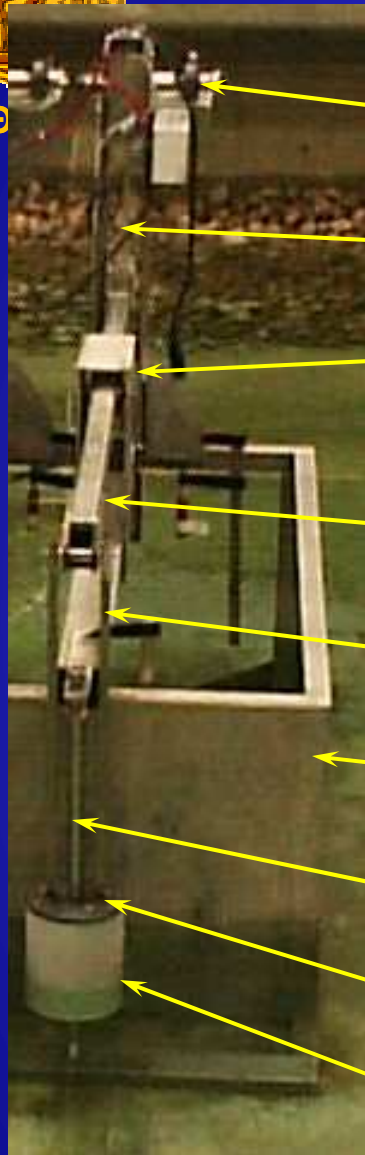


Αθήνα, 21 Οκτ. 2010 σελ. 38

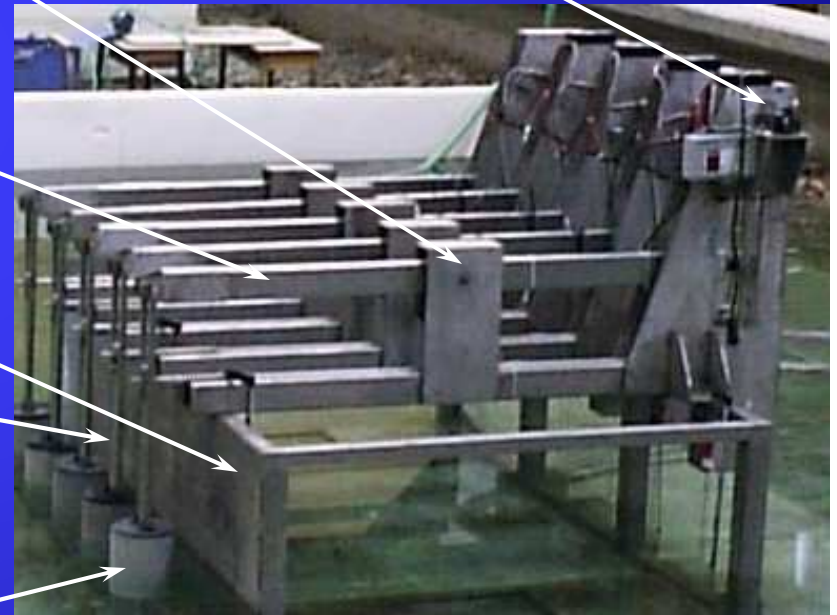


ENG

LABBUOY - NTUA



- Motor unit
- Belt
- Arm bearing
- Arm
- Vertical Rods
- Breakwater
- Driving rod
- Joint
- Float $d=20, h=30\text{cm}$





ΕΝΘΥ ΕΜΠ



Intelligent Energy  Europe

