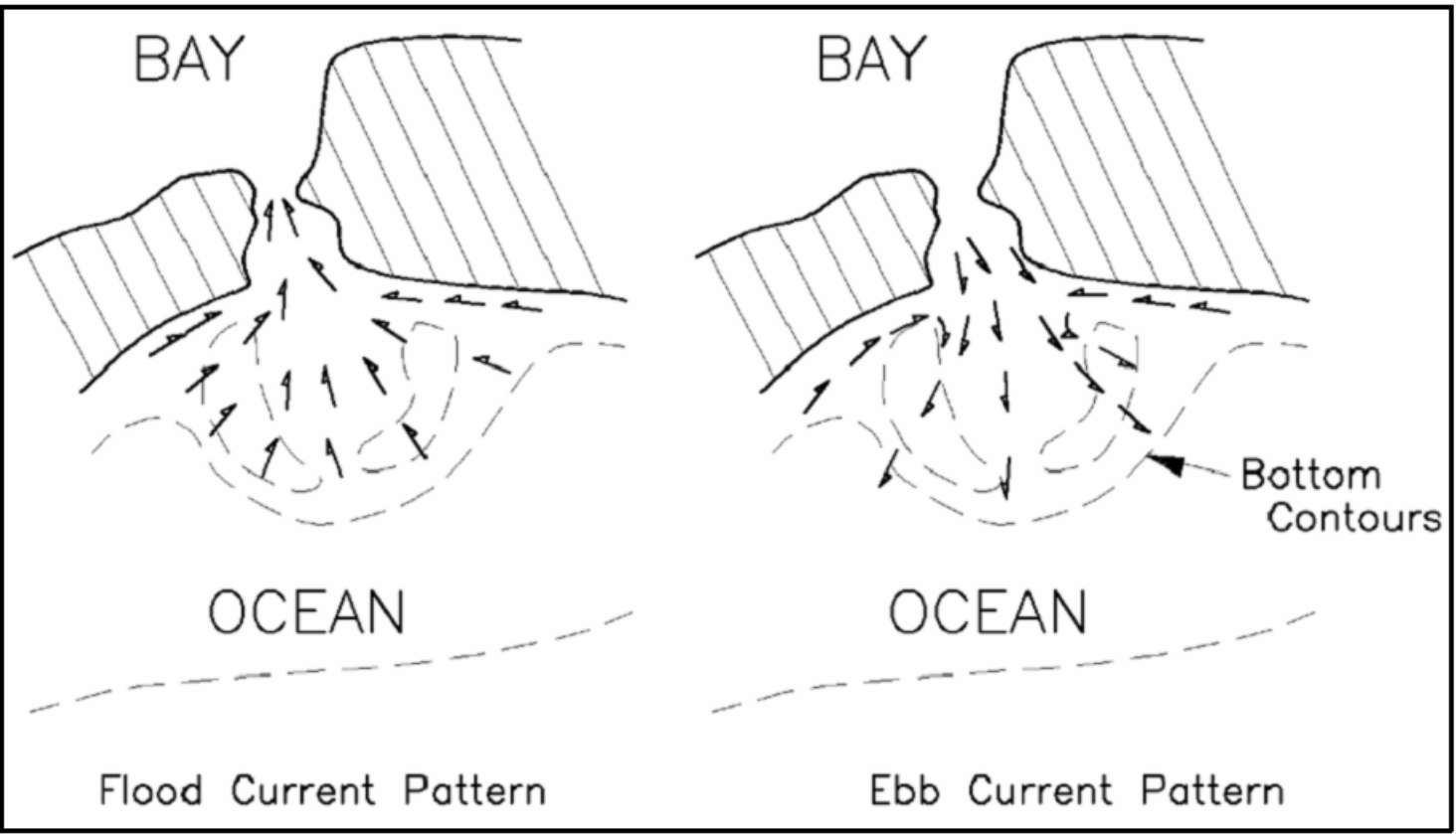


Παράκτια Υδραυλική & Τεχνολογία

Δυναμική Παλιρροιακών Στομίων

Δρ. Γιώργος Συλαίος
Ωκεανογράφος – Επ. Καθηγητής ΤΜΠ-ΔΠΘ



Τα παλιρροιακά στόμια είναι στενά και ρηχά κανάλια τα οποία συνδέουν την ανοικτή θάλασσα με τη παράκτια περιοχή. Όταν τα παράκτια υδάτινα σώματα είναι ρηχά και μικρών διαστάσεων, τότε το σύστημα ταλαντώνεται ολόκληρο σε φάση με την εφαρμοζόμενη παλίρροια στο ανοικτό όριο. Αυτό συμβαίνει όταν ισχύει:

$$T \gg \frac{L_b}{\sqrt{gd_b}}$$

Όπου L_b είναι η διαμήκης οριζόντια απόσταση από το στόμιο ως το ανώτερο σημείο του παράκτιου συστήματος, T είναι η περίοδος της ημι-ημερήσιας παλίρροιας ($12.42 \times 60 \times 60 = 44,712$ s).

Υδραυλική Παλιρροιακών στομίων

Η απλή ανάλυση της υδραυλικής των στομίων θεωρεί τη μονοδιάστατη εξίσωση της κίνησης και της συνέχειας, και αναζητά το προσδιορισμό :

- ✓ του μέγιστου διαμήκους ρεύματος στο στόμιο,
- ✓ του παλιρροιακού εύρους του παράκτιου σώματος, και
- ✓ της υστέρησης φάσης της παλιρροιακής ταλάντωσης στην ανοικτή θάλασσα ως προς αυτή στο εσωτερικό υδάτινο σώμα.

Τα παραπάνω θα προσπαθήσουμε να προσδιοριστούν ως προς εύκολα μετρήσιμες παραμέτρους, όπως:

- ✓ το εμβαδόν διατομής του στομίου,
- ✓ το μήκος του καναλιού του στομίου
- ✓ το εμβαδόν του εσωτερικού παράκτιου σώματος,
- ✓ το εύρος και τη περίοδο της ωκεάνιας παλίρροιας, και
- ✓ συντελεστές υδραυλικής απώλειας.

Θεωρούμε ότι:

- Τα τοιχώματα του υδάτινου σώματος είναι κατακόρυφα,
- δεν υπάρχει εισροή από ποτάμια ή χειμάρρους,
- δεν υπάρχουν ρεύματα πυκνότητας,
- η παλιρροιακή διακύμανση είναι ημιτονοειδής,
- το εμβαδόν διατομής του στομίου παραμένει σταθερό.

Η μονοδιάστατη εξίσωση κίνησης είναι:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = -g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{f}{8R} V |V|$$

Όπου V η ολοκληρωμένη με τη διατομή ταχύτητα, h η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, f ο συντελεστής τριβής, R η υδραυλική ακτίνα.

$$R = \frac{A_{avg}}{\text{Average Wetted Perimeter}} \approx \frac{A_{avg}}{\text{Average Width}}$$

Η εξίσωση της συνέχειας για ροή σε όλο το μήκος του στομίου:

$$VA_{avg} = A_b \frac{dh_b}{dt}$$

Όπου A_{avg} είναι το μέσο εμβαδόν διατομής σε όλο το μήκος του καναλιού, A_b το εμβαδόν το κόλπου, και dh_b/dt είναι η χρονική μεταβολή της στάθμης της θάλασσας σε όλο το κόλπο.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει ο αδιάστατος συντελεστής K :

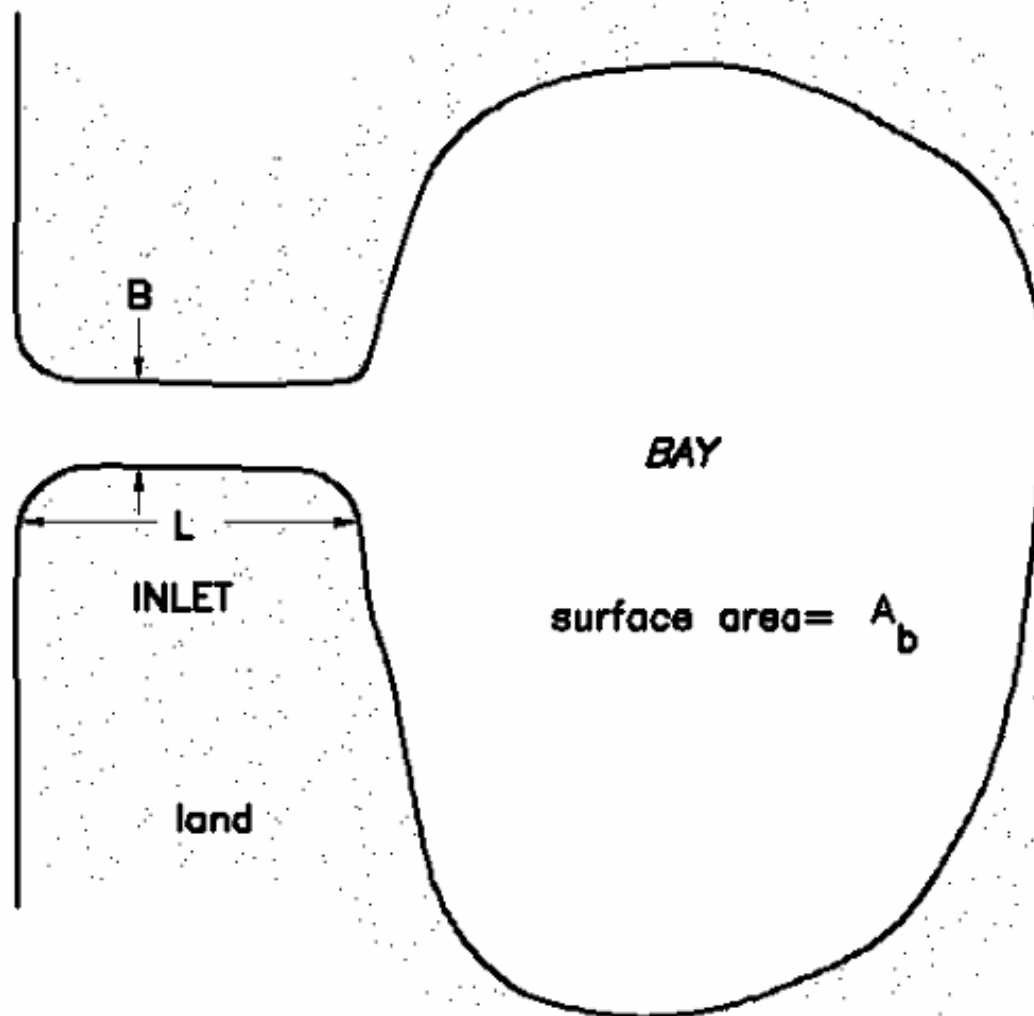
$$K = \frac{TA_{avg}}{2\pi A_b} \sqrt{\frac{2g}{a_o \left[k_{en} + k_{ex} + \frac{fL}{4R} \right]}}$$

Όπου T είναι η παλιρροιακή περίοδος, a_o είναι το παλιρροιακό εύρος στην ανοικτή θάλασσα, k_{en} ο συντελεστής απώλειας ενέργειας κατά την είσοδο, k_{ex} ο συντελεστής απώλειας ενέργειας κατά την έξοδο, L το μήκος του καναλιού και R η υδραυλική ακτίνα.

Plan View

inlet cross-sectional area = A_c

SEA



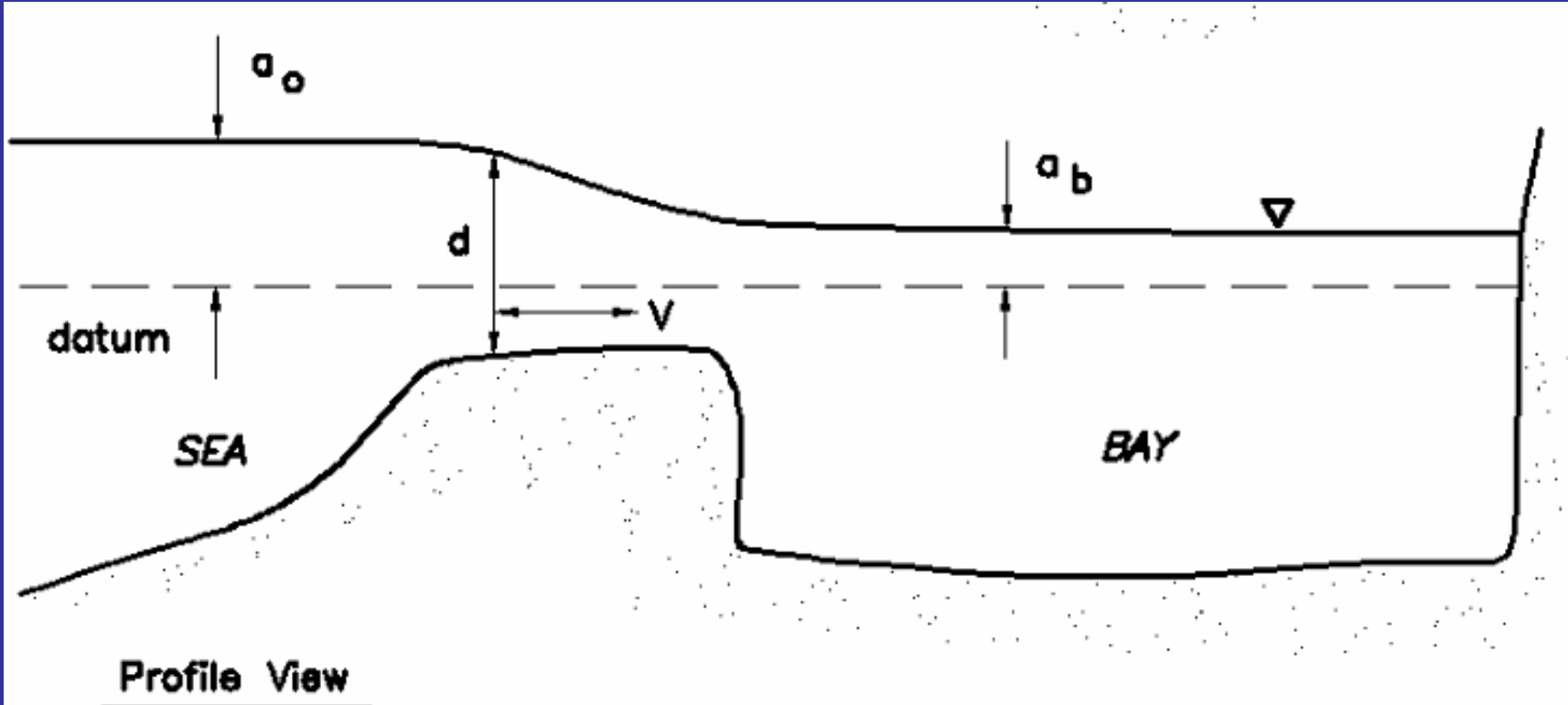
B

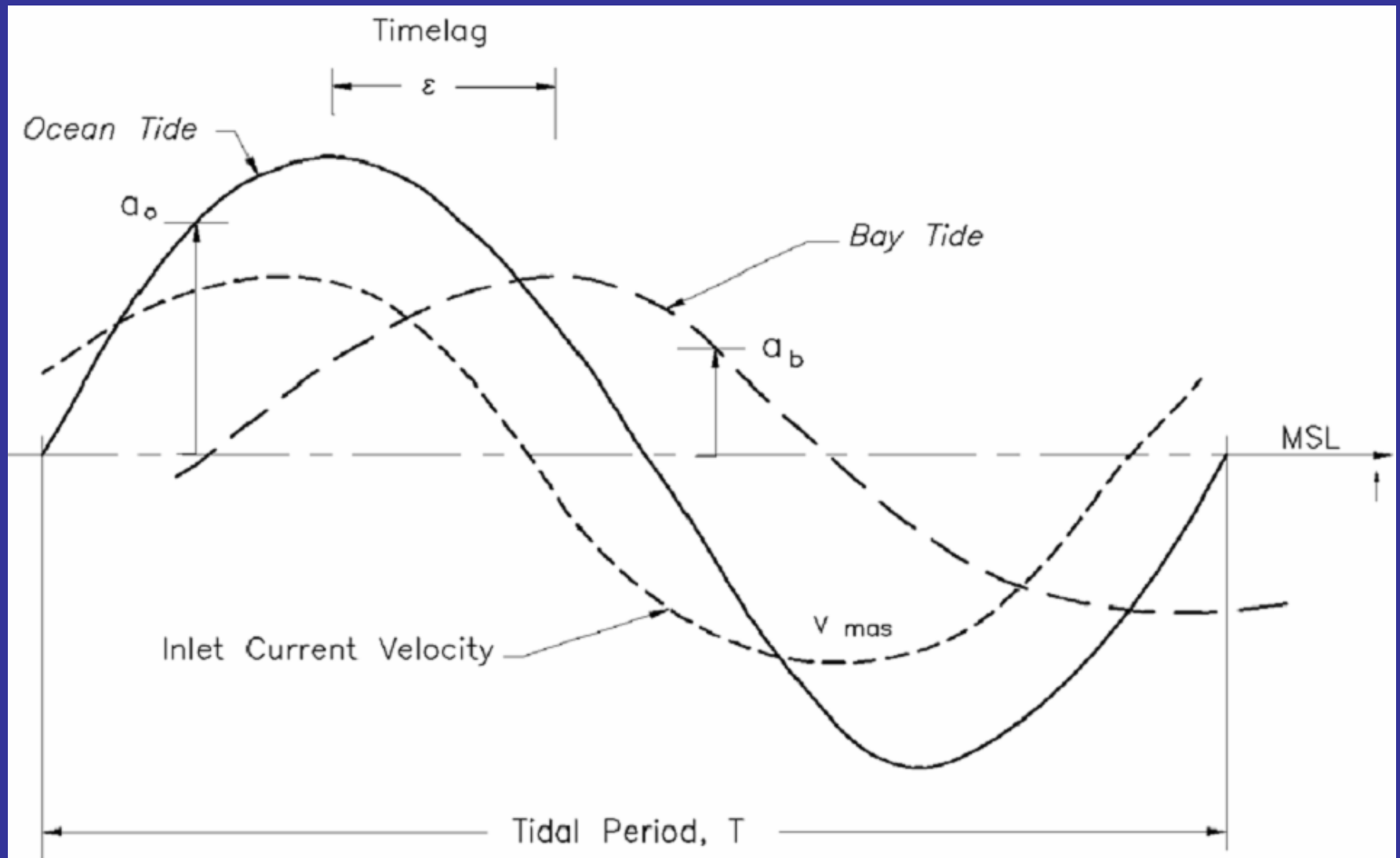
BAY

surface area = A_b

INLET

land





Για εισροή σε κανάλι, K_{en} κυμαίνεται από 0.005 έως 0.25. Σε φυσικά κανάλια ο συντελεστής K_{en} είναι μικρότερος του 0.05. Στη ροή εξόδου συνήθως βάζουμε K_{ex} περίπου ίσο με 1.0, άρα θεωρούμε ότι όλη η κινητική ενέργεια χάνεται κατά την έξοδο από το στόμιο.

Ορίζουμε την αδιάστατη ταχύτητα:

$$V'_m = \frac{A_{avg} T V_m}{2\pi a_o A_b}$$

Όπου V_m είναι η μέγιστη ολοκληρωμένη ταχύτητα σε ολόκληρη τη διατομή του στομίου και σε ένα πλήρη παλιρροιακό κύκλο.

Προσδιορίζονται δύο παράμετροι, με βάση τις παραμέτρους που ορίστηκαν προηγούμενα.

$$K_1 = \frac{a_o A_b F}{2 L A_{avg}}$$

$$K_2 = \frac{2\pi}{T} \sqrt{\frac{L A_b}{g A_{avg}}}$$

Όπου F είναι

$$F = k_{en} + k_{ex} + \frac{fL}{4R}$$

Η ολοκληρωμένη ταχύτητα της διατομής είναι:

$$V \approx V_m \sin \frac{2\pi t}{T}$$

Και η παλιρροιακή μεταβολή της στάθμης της θάλασσας στο κόλπο είναι:

$$h_b \approx a_b \cos \left(\frac{2\pi t}{T} - \varepsilon \right)$$

Όπου ε είναι η υστέρηση φάσης και a_b είναι το παλιρροιακό εύρος στο κόλπο.
Η σχέση του συντελεστή Keulegan με τις παραμέτρους K_1 , K_2 είναι:

$$K = \frac{1}{K_2} \sqrt{\frac{1}{K_1}}$$

Παλιρροιακό Πρίσμα

Ο όγκος του νερού που εισέρχεται στο παράκτιο σύστημα κατά την πλήμμη και αποχωρεί κατά την άμπωτη καλείται παλιρροιακό πρίσμα. Το παλιρροιακό πρίσμα υπολογίζεται:

$$P = 2 a_b A_b$$

Άλλη σχέση είναι μέσω της μετρούμενης ταχύτητας (ή παροχής) στο στόμιο. Θεωρούμε ημιτονοειδή μεταβολή και ολοκληρώνουμε ως προς την πλήμμη ή την άμπωτη :

$$P = \frac{T Q_{\max}}{\pi} \equiv P = \frac{T V_m A_{\text{avg}}}{\pi}$$

Για μη-ημιτονοειδή κύματα

$$P = \frac{T Q_{\max}}{\pi C} \equiv P = \frac{T V_m A_{\text{avg}}}{\pi C}$$

Με C μεταξύ 0.81 – 1.0. Γενικά για $0.1 < K < 1.8$ έχουμε $C=0.86$ και για $K > 1.8$ έχουμε $C=1.0$

Έστω κανάλι με μέσο βάθος 3.7 μ και πλάτος 180 μ και επικοινωνεί με παράκτια περιοχή εμβαδού $1.9 \times 10^7 \mu^2$ και μέσου βάθους 6 μ. Η περιοχή δέχεται την επίδραση ημι-ημερήσιας παλίρροιας με εύρος 1.30 μ. Ποια είναι η μέγιστη ταχύτητα ροής, η μέγιστη παροχή, και ο όγκος νερού που εισρέει και εκρέει στο παράκτιο σύστημα κατά τη διάρκεια ενός παλιρροιακού κύκλου με παλίρροια μεγάλου πλάτους (spring tide)?

Θεωρούμε $k_{en} = 0.1$, $k_{ex} = 1.0$, and $f = 0.03$

$$A_c = Bd = 180 (3.7) = 666 \text{ m}^2$$

Εμβαδόν διατομής στομίου

$$R = \frac{A_c}{(B + 2d)} = \frac{666.}{(180 + 2(3.7))} = 3.55 \text{ m}$$

Υδραυλική ακτίνα στο στόμιο

$$F = k_{en} + k_{ex} + \frac{fL}{4R} = 1.0 + 0.1 + \frac{0.03 (1100)}{4 (3.55)} = 3.42$$

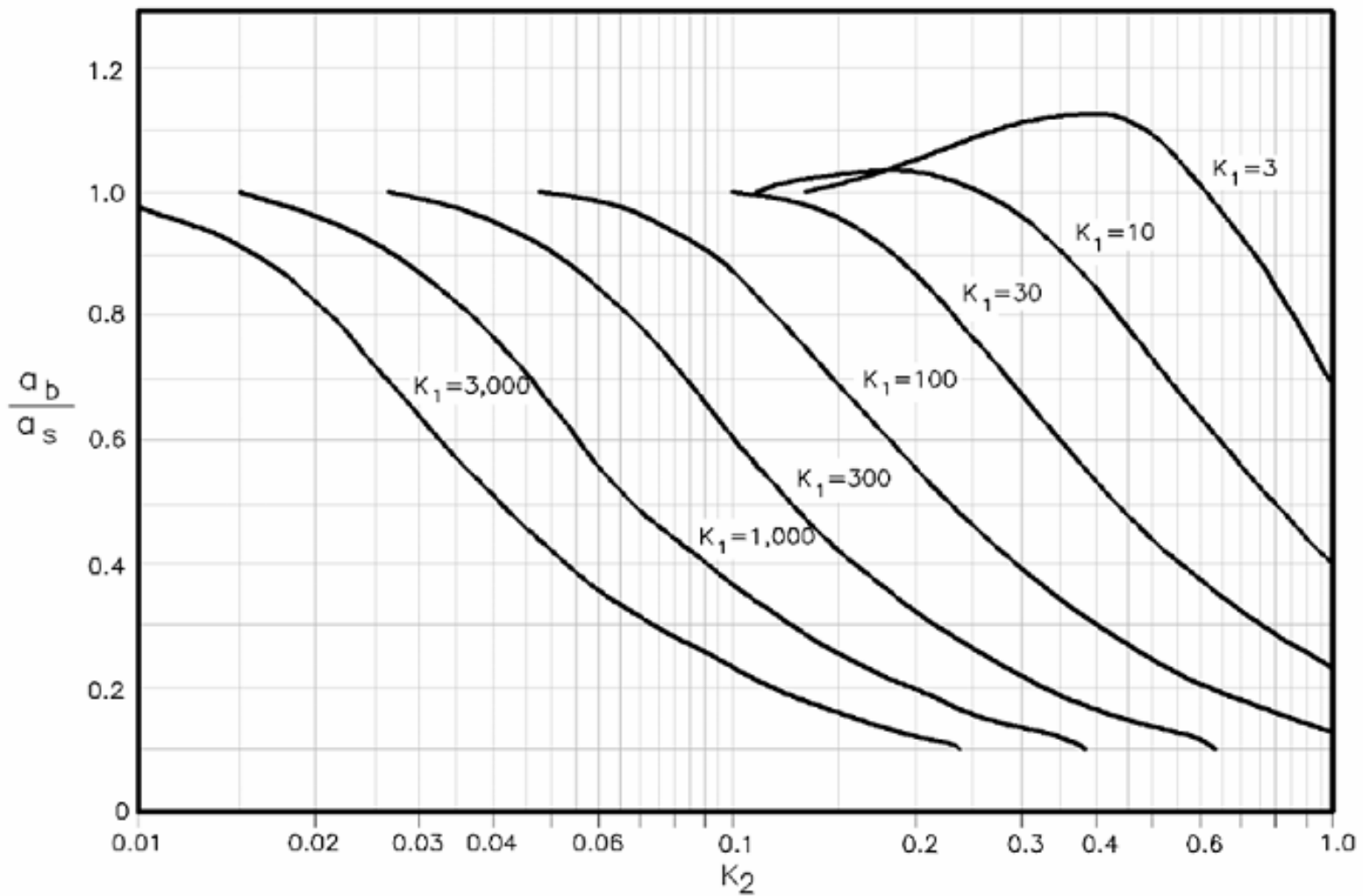
Συνολική Τριβή

$$K_1 = \frac{a_o A_b F}{2 L A_c} = \frac{(1.30/2 (1.9) (10^7) 3.42}{2 (1100) (666)} = 28.8$$

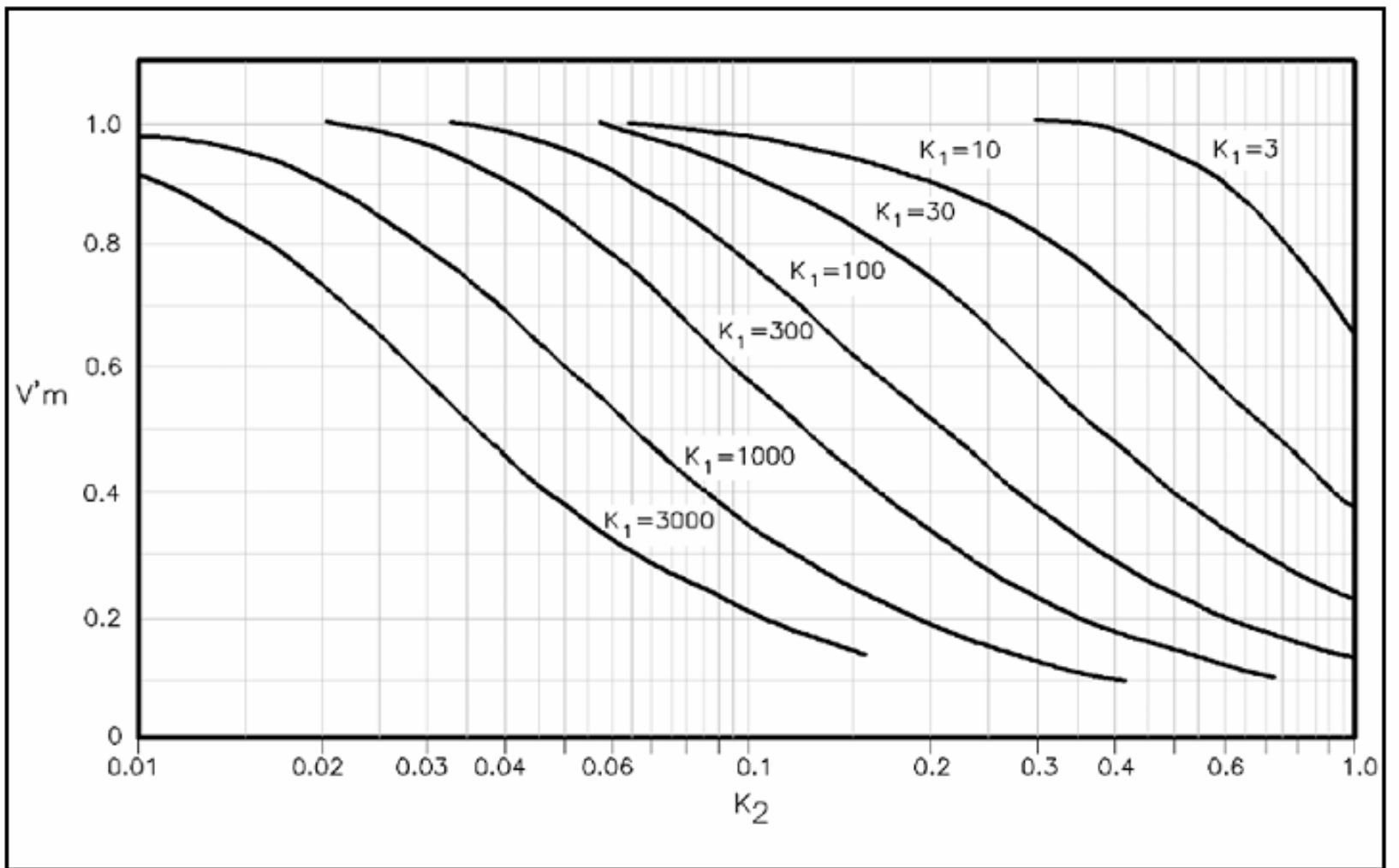
Παράγοντας K_1

$$K_2 = \frac{2\pi}{T} \sqrt{\frac{L A_b}{g A_c}} = \frac{2\pi}{12.4 (60 (60))} \sqrt{\frac{1100 (1.9) 10^7}{9.8 (666)}} = 0.25$$

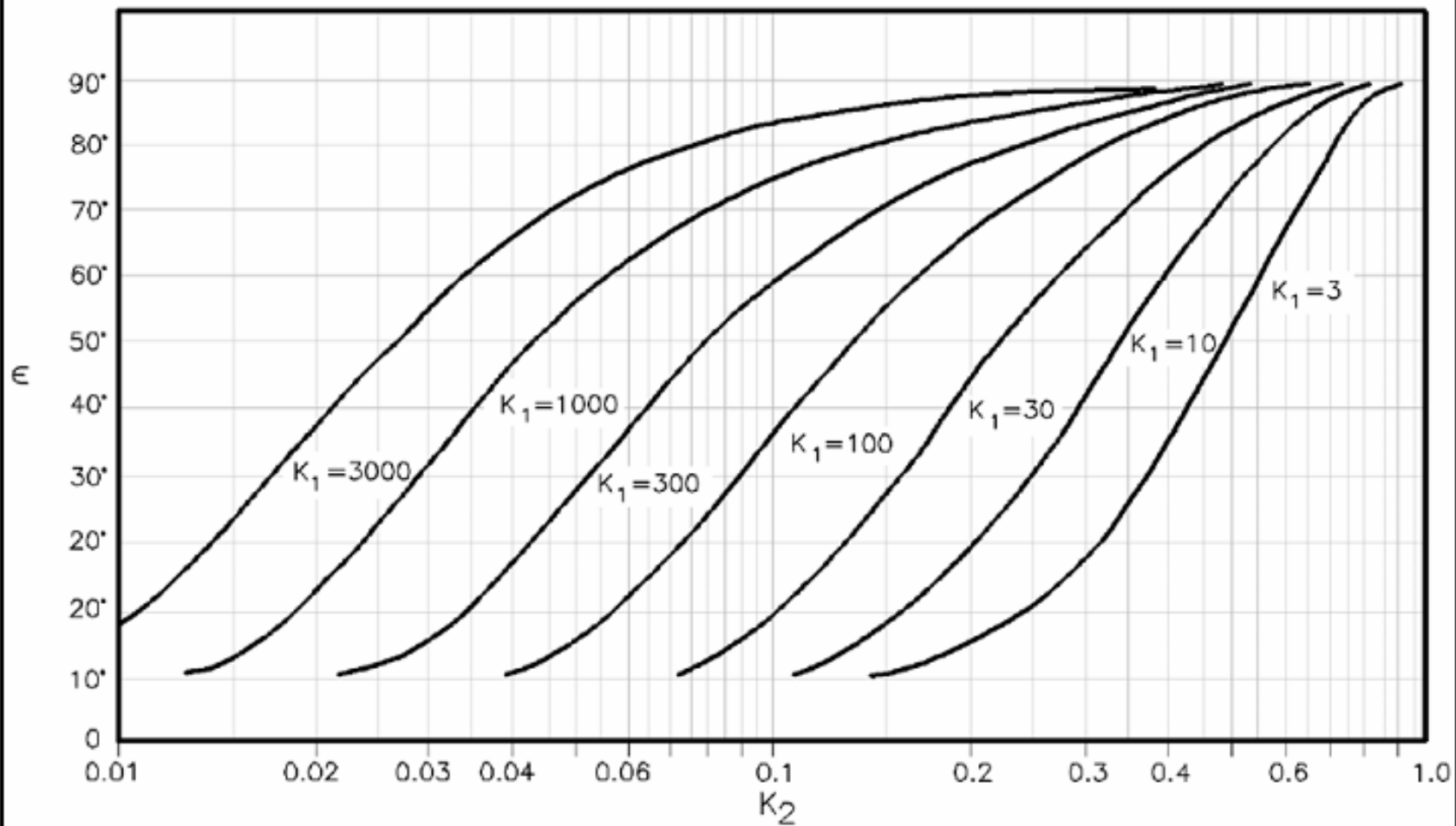
Παράγοντας K_2



$$\frac{a_b}{a_s} = 0.78$$



$$V'_m = 0.66$$



$$\epsilon = 53^\circ$$

$$V'_m = \frac{A_{avg} T V_m}{2\pi a_o A_b}$$

$$V_m = \frac{V'_m 2\pi a_s A_b}{A_c T}$$

$$V_m = \frac{0.66 (2) (3.14) (0.65) (1.9) 10^7}{666 (12.42) (3,600)} = 1.72 \text{ m/s}$$

Μέγιστη ταχύτητα

$$Q_m = V_m A_c = (1.72) (666) = 1145 \text{ m}^3/\text{s}$$

Μέγιστη παροχή

Εφόσον,

$$a_y/a_s = 0.78, a_b = 0.78 (0.65) = 0.51 \text{ m}$$

Άρα το παλιρροιακό εύρος στο κόλπο θα είναι 1.02 μ

$$2 a_b A_b = 2 (0.51) (1.90) (10^7) = 1.94 \times (10^7) \text{ m}^3$$

Παλιρροιακό πρίσμα

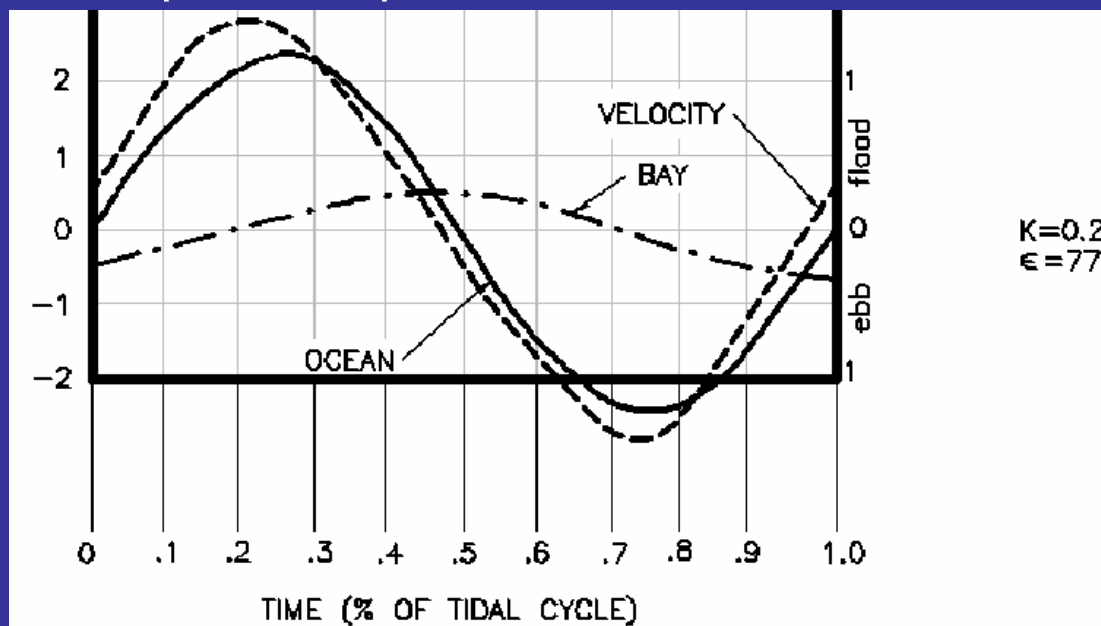
$$t_s = \frac{L_b}{\sqrt{gd_b}} = \frac{6000}{\sqrt{9.8 (6.0)}} = 782 \text{ sec or } 0.22 \text{ hr}$$

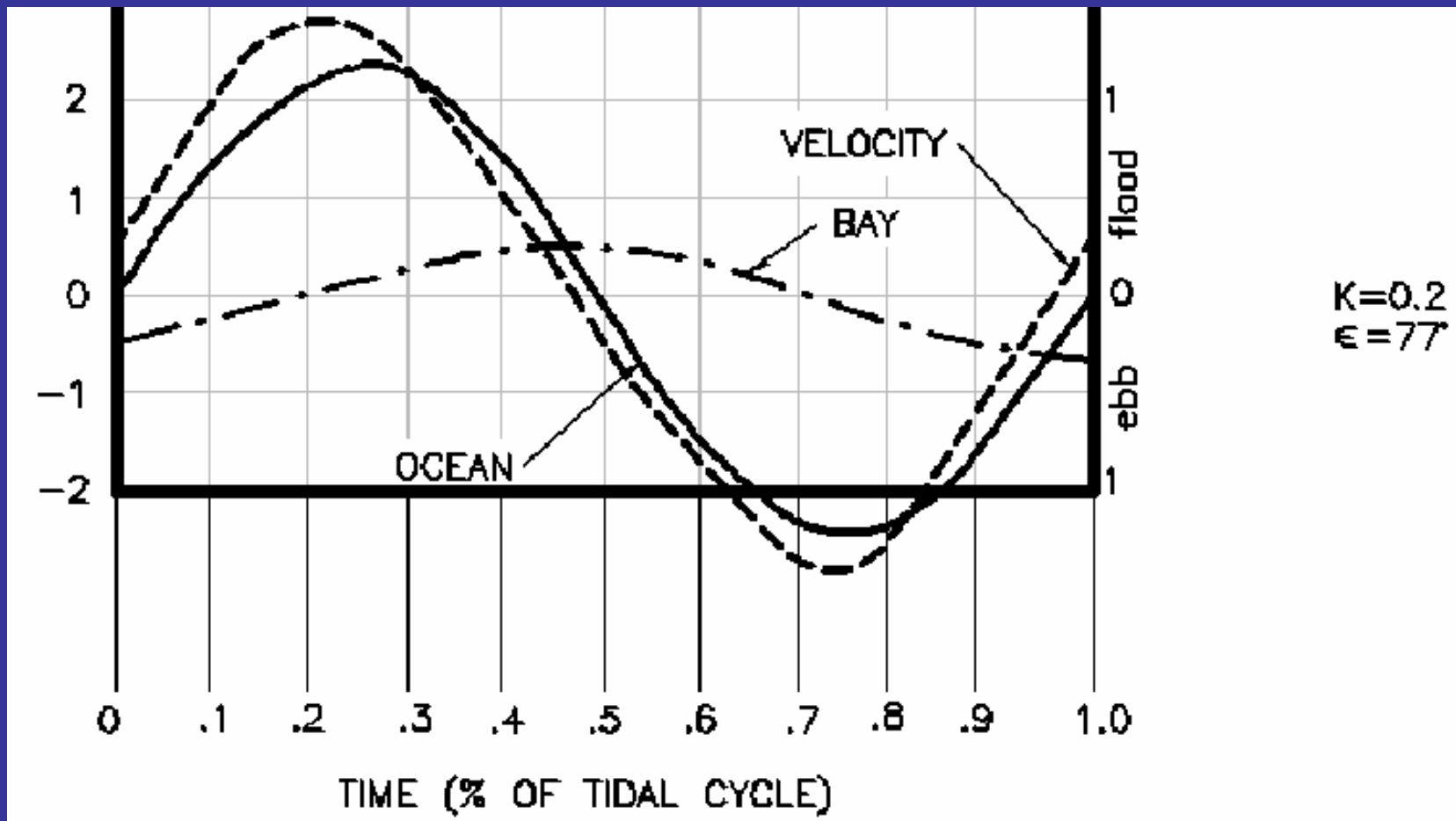
Χρόνος που απαιτείται να διασχίσει το κόλπο το παλιρροιακό κύμα

Δυναμική στομίων με βάση τη παράμετρο Keulegan, K

Η παράμετρος Keulegan, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη κατανόηση της επίδρασης της γεωμετρίας των στομίων στην υδραυλική τους. Ορίζουμε τρεις κλάσεις στομίων με βάση τη παράμετρο K:

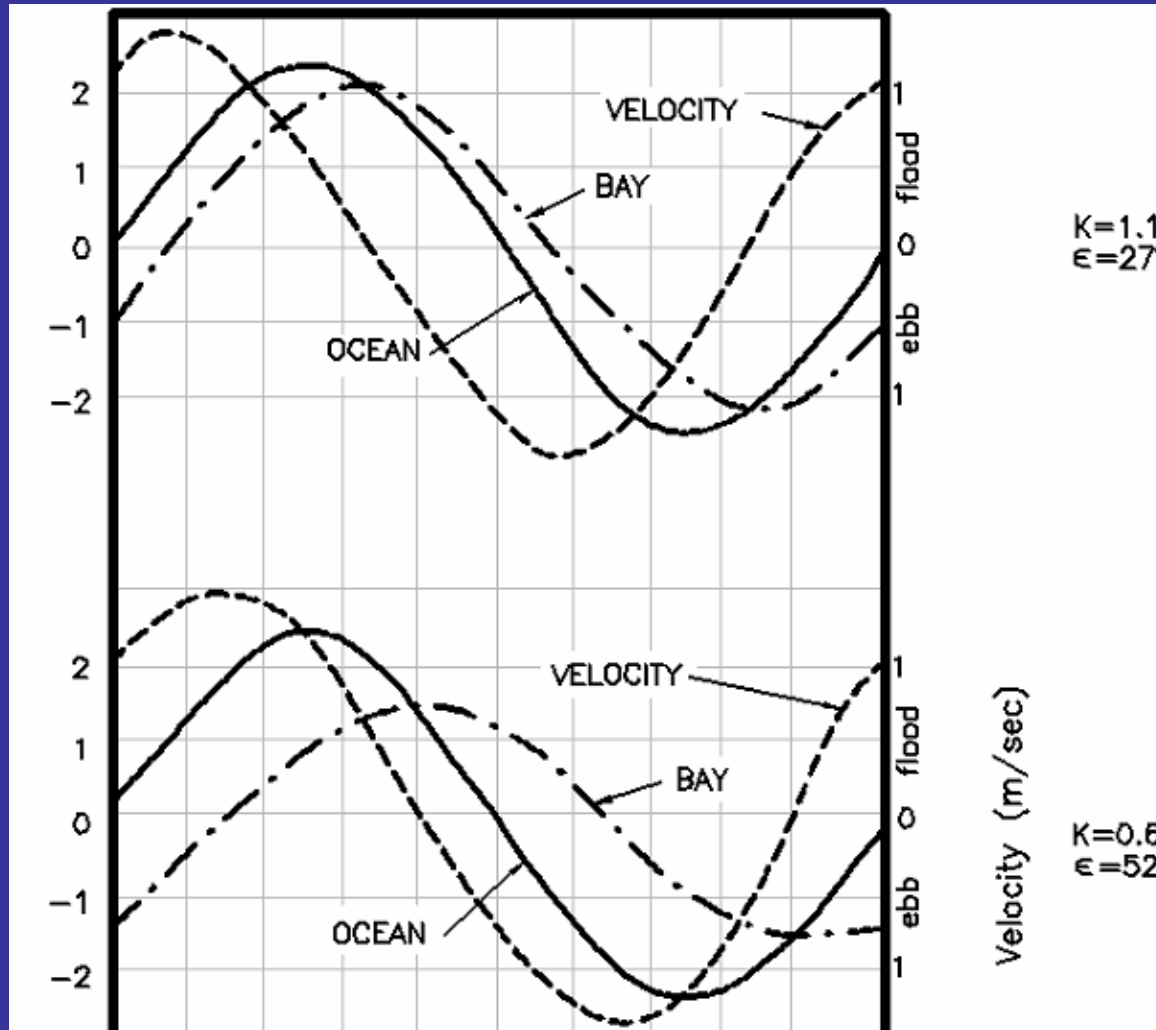
1. Στόμια με χαμηλή τιμή K, δείχνουν ότι η παλιρροιακή μεταβολή στο εσωτερικό της λεκάνης θα είναι μικρή, ενώ η παλιρροιακή διαφορά φάσης θα είναι σημαντική. Ως διαφορά φάσης ορίζουμε τη χρονική διαφορά μεταξύ της μέγιστης ανύψωσης (καταβύθισης) της στάθμης στη λεκάνη και στην ανοικτή θάλασσα.





Για $K = 0.2$, τα μέγιστα ρεύματα πλήμμης συμβαίνουν κοντά στη μέγιστη ανύψωση στάθμης και τα μέγιστα ρεύματα άμπωτης κοντά στη μέγιστη καταβύθιση στάθμης. Επομένως, για στόμια με χαμηλή τιμή K , η ροή πλήμμης συμβαίνει όταν τα βάθη στο στόμιο είναι μεγάλα (κοντά στο μέγιστο), επομένως η ροή είναι μικρότερης έντασης. Αντίθετα, τα ρεύματα άμπωτης συμβαίνουν όταν τα βάθη στο στόμιο είναι μικρά (κοντά στο ελάχιστο), και η ροή είναι μεγαλύτερης έντασης.

Όσο ο αριθμός K αυξάνει, η λεκάνη της λιμνοθάλασσας 'αισθάνεται' καλύτερα τη παλιρροιακή επίδραση της ανοικτής θάλασσας, και η διαφορά φάσης μεταξύ της παλίρροιας στην ανοικτή θάλασσα και στη λεκάνη μειώνεται.



Οι μεταβολές αυτές έχουν σημαντική επίδραση στη μεταφορά ιζημάτων από και προς τη λιμνοθάλασσα.

Όταν $0.6 < K < 0.8$, τότε το στόμιο έχει τη μεγαλύτερη δυνατότητα απομάκρυνσης των φερτών υλών από το εσωτερικό της λεκάνης.

Όταν $K > 0.8$, τότε επικρατεί η έντονη πλήμμη, η οποία μεταφέρει ιζήματα από την ανοικτή θάλασσα προς τη λιμνοθάλασσα.

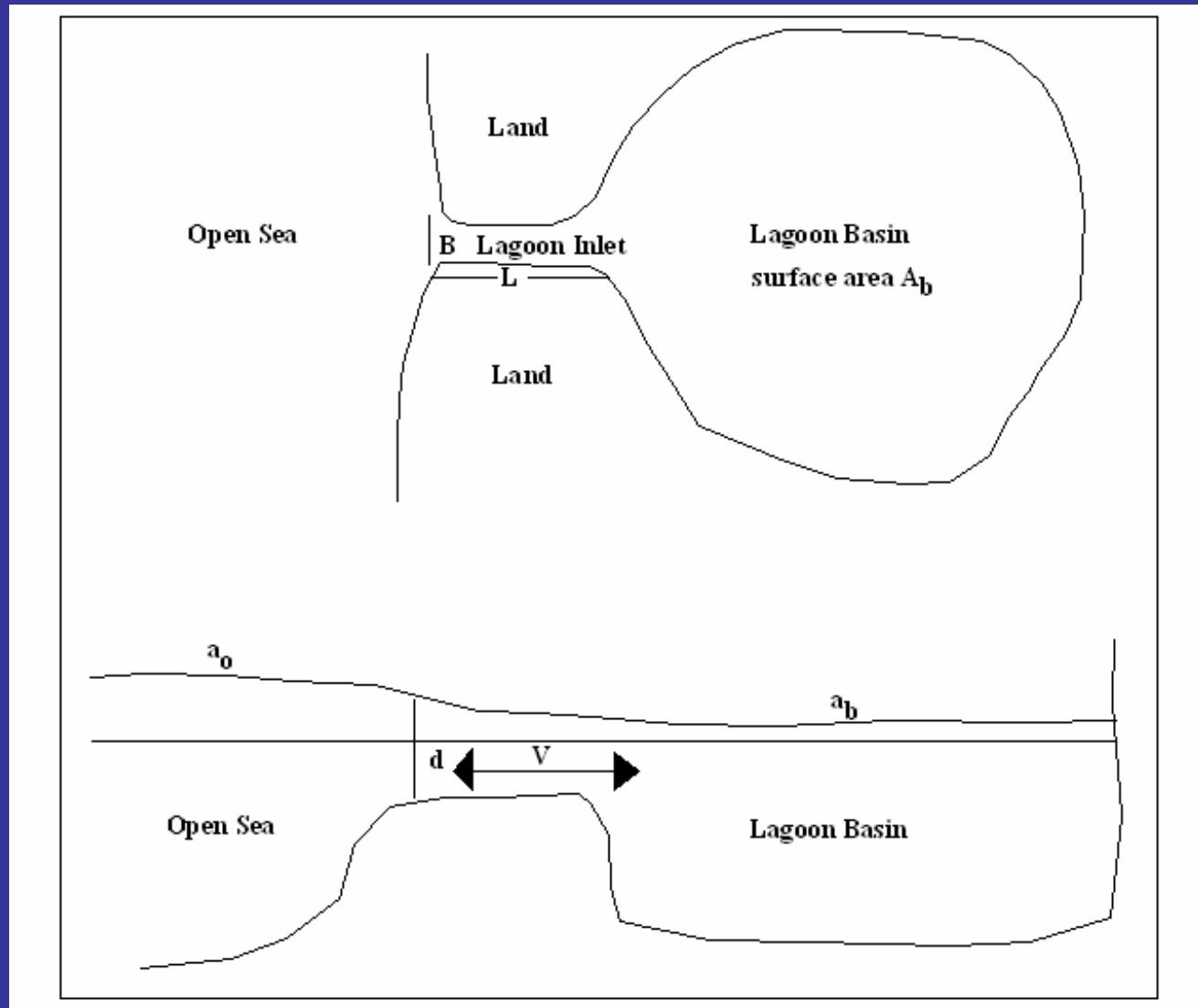
Όταν $K < 0.6$, τότε επικρατεί η έντονη άμπωτη η οποία μεταφέρει ιζήματα από τη λιμνοθάλασσα προς την ανοικτή θάλασσα.

Σύστημα υδραυλικής ταξινόμησης στομίων Jarett

- (a) Κλάση I: Keulegan $K < 0.3$. Η διαφορά φάσης (ϵ) είναι ίση ή μεγαλύτερη των 70 deg. Για ημι-ημερήσια παλίρροια, η διαφορά αυτή αντιστοιχεί σε περίπου 2 hr 25 min. Συνήθως πρόκειται για κόλπους και λιμνοθάλασσες σχετικά ανοικτές και ρηχές, με μόνο ένα στόμιο με χαμηλό λόγο A_c/A_b στο στόμιό τους.
- (b) Κλάση II: Keulegan $K > 0.80$. Η διαφορά φάσης (ϵ) είναι ίση ή μικρότερη των 40 deg. Για ημι-ημερήσια παλίρροια, η διαφορά αυτή αντιστοιχεί σε περίπου 1 hr 25 min. Πρόκειται συνήθως για μικρού μήκους βαθιά συστήματα, με μεγάλο λόγο A_c/A_b .
- (c) Κλάση III: $0.3 < K < 0.8$. Η διαφορά φάσης βρίσκεται μεταξύ 40 και 70 deg. Είναι ενδιάμεση των δύο παραπάνω κλάσεων.

Water Exchanges Control

THE LAGOON CONCEPTUAL MODEL



THE LAGOON CONCEPTUAL MODEL

Input Data

Inlet Depth, d
 Inlet Width, w
 Inlet Length, L
 Lagoon Area, A_b
 Tidal Period, T
 Tidal Range, a_o
 Discharge, Q_r

$$A_C = B d$$

$$R = [A_C / (B + 2d)]$$

$$F = k_{en} + k_{ex} + [(fL / 4R)]$$

$$K_1 = [(a_o a_b F) / (2L A_C)]$$

$$K_2 = [(2\pi / T)(L A_b / (g A_C))]^{1/2}$$

$$a_b / a_s = \dots$$

$$V_m = \dots$$

$$\varepsilon = \dots$$

$$V_m = \frac{V'_m 2\pi a_s A_b}{A_C T}$$

$$Q_m = V_m A_C$$

$$P = 2a_b A_b$$

$$Q_{\max-e} = U_{\max-e} A_C$$

$$Q_{\max-f} = U_{\max-f} A_C$$

$$U_{\max-e} = \frac{U'_{\max-e} 2\pi a_o A_b}{A_{avg} T}$$

$$U_{\max-f} = \frac{U'_{\max-f} 2\pi a_o A_b}{A_{avg} T}$$

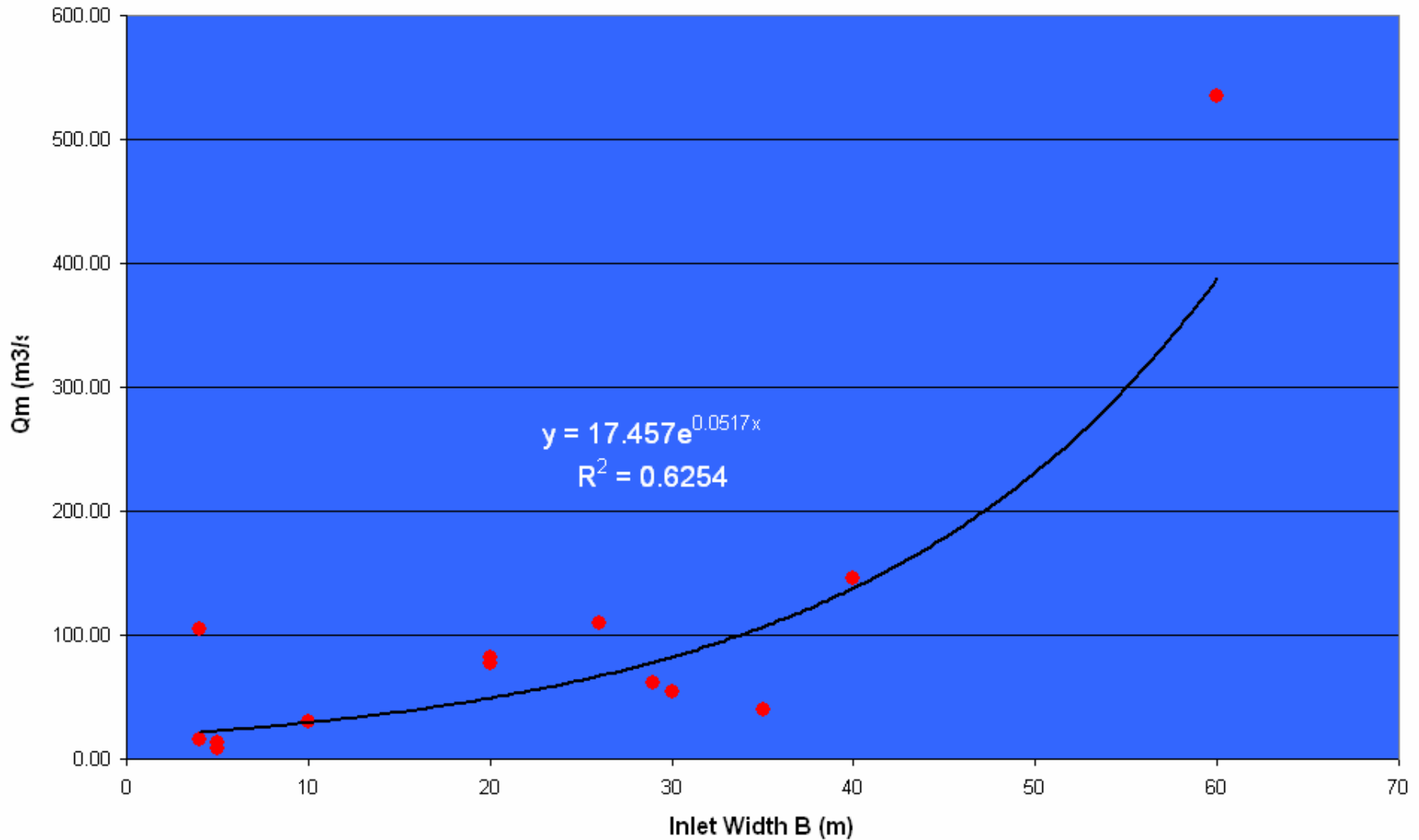
$$Q'_r = \frac{Q_r T}{2\pi a_o A_b}$$

$$K = \frac{1}{K_2} \sqrt{\frac{1}{K_1}}$$

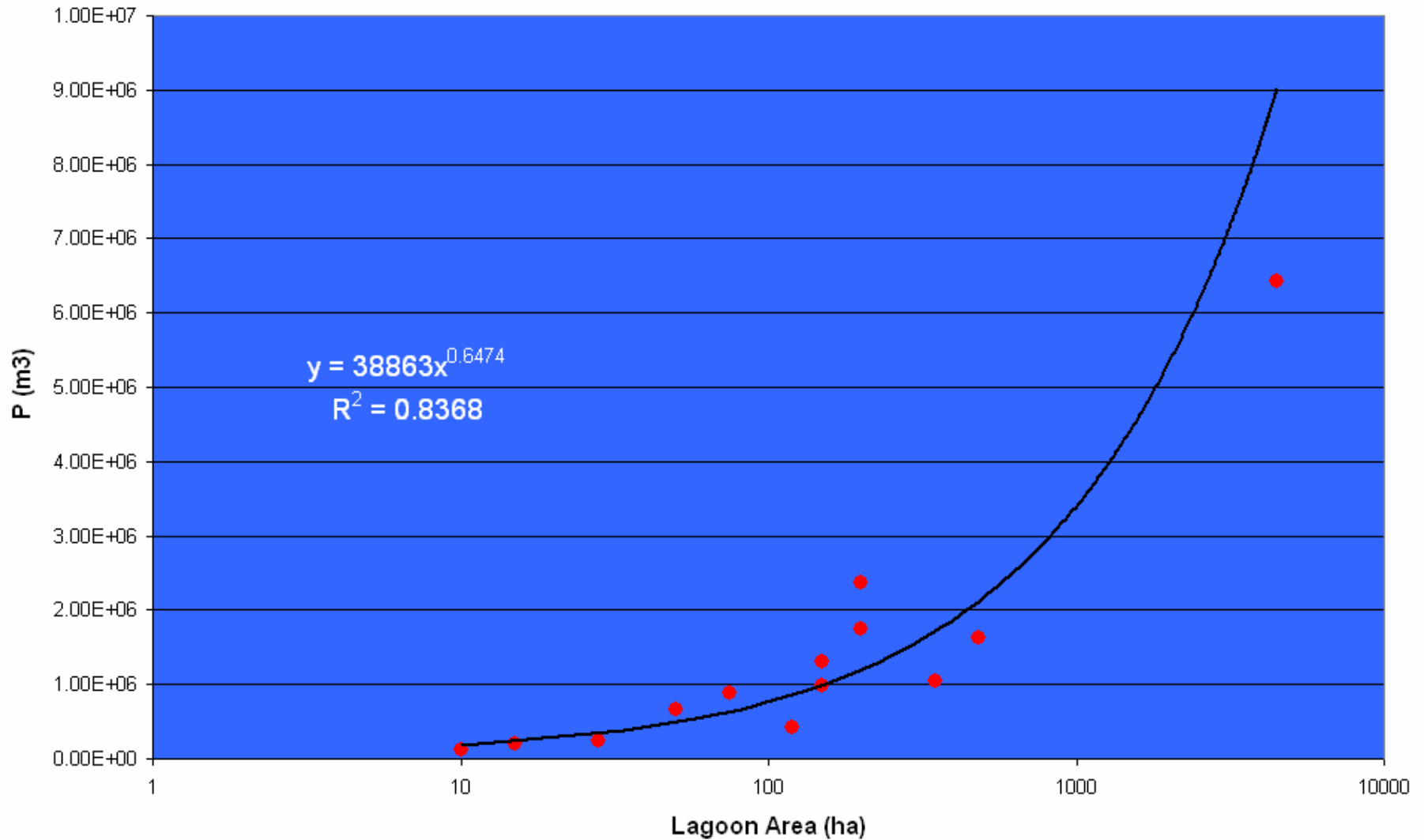
THE LAGOON CONCEPTUAL MODEL

Location	Lagoon Name	Inlet Channel Characteristics			Area (ha)
		Width (m)	Length (m)	Depth (m)	
Evros	Monolimni	26	45	0.5	150
Evros	Drana	4	4.8	2.0	480
Samothrak	Agios Andreas	5	20	1.0	10
Rodopi	Ptelea	40	90	1.3	200
Rodopi	Elos	40	80	1.3	200
Rodopi	Mavrolimni	20	80	1.2	150
Rodopi	Limni	35	3000	1.3	50
Rodopi	Aliki	20	200	1.4	30
Rodopi	Xirolimni	26	70	1.2	200
Xanthi	Divari	5	350	2.0	15
Xanthi	Vistonida	60	500	2.0	4500
Xanthi	Erasmio	4	60	1.0	28
Xanthi	Lafrouda	10	0	1.0	75
Xanthi	Lafri	10	300	1.0	120
Kavala	Eraitino	40	50	3.0	350
Kavala	Keramoti	22	150	2.0	150
Kavala	Vassova	30	120	1.5	70
Kavala	Haidefto	15	70	0,5-1,0	53
Kavala	Monastiraki	30	150	1.0	75

Relation between Inlet Width and Max Cross-sectional Discharge per Tidal Cycle



Relation between Lagoon Area and Tidal Prism



LAGOON CLASSIFICATION SCHEME

Class I: $K < 0.3$

Aliki $\rightarrow 0.23$

Drana $\rightarrow 0.03$

Lafri $\rightarrow 0.16$

Vistonis $\rightarrow 0.05$

Ebb – dominated Lagoons

During a typical tidal cycle ebb prevails over flood, meaning that outflux is stronger than influx \rightarrow tidal inequality

Fish entry into these lagoons is higher

Mostly open and shallow lagoons with small entrance canal (small A_c/A_b)

LAGOON CLASSIFICATION SCHEME

Class II: $K > 0.8$

Agios Andreas → 0.97

Divari → 0.940

Elos → 0.80

Limni → 0.81

Monastiraki → 0.93

Flood – dominated Lagoons

During a typical tidal cycle flood prevails over ebb, meaning that influx is stronger than outflux.

Lagoons with relatively deep entrance canals (high A_c/A_b)

Table II-6-1
Hydraulic Characteristics of Tidal Inlets by Cubature Method

Inlet	Mean Tidal Prism P , ft ³	Bay Surface Area A_b , ft ²	Avg Phase Range in Bay, $2a_b$	Ocean Tidal Range $2a_o$	a_b/a_o	K	ϵ deg
Atlantic Coast							
Shinnecock	1.82×10^9	3.65×10^8	0.50	2.90	0.17	0.15	80
Fire Island	1.59×10^9	2.69×10^8	0.59	4.10	0.14	0.14	83
Jones	7.89×10^8	4.48×10^8	1.76	4.50	0.39	0.35	67
East Rockaway	4.03×10^8	1.06×10^8	3.80	4.50	0.84	0.95	33
Rockaway	2.24×10^9	4.64×10^8	4.83	4.70	1.03	--	--
Manasquan	1.40×10^9	4.91×10^7	2.85	4.30	0.66	0.65	49
Barnegat	4.91×10^8	1.34×10^9	0.37	4.20	0.09	0.09	85
Indian River	4.00×10^8	4.20×10^8	1.02	4.10	0.25	0.22	75
Beaufort	4.20×10^8	2.56×10^8	1.64	3.60	0.46	0.41	63
New River	1.59×10^8	5.31×10^8	0.30	3.60	0.08	0.08	86
Winyah Bay	2.47×10^9	9.14×10^8	2.70	4.60	0.59	0.56	54
Port Royal Sd	1.25×10^{10}	2.40×10^9	5.22	6.60	0.78	0.82	40
Calibogue Sd	3.05×10^9	5.28×10^8	5.78	6.60	0.88	1.07	28
Wassaw Sd	3.34×10^9	5.84×10^8	5.72	6.90	0.83	0.95	33
Ossabaw Sd	5.82×10^9	1.17×10^9	4.98	7.20	0.69	0.70	46
Sapelo Sd	6.36×10^9	9.66×10^8	6.59	6.90	0.94	1.30	20
St. Catherines Sd	5.94×10^9	1.04×10^9	5.73	7.10	0.81	0.89	36
Doboy Sd	3.43×10^9	5.19×10^8	6.62	6.80	0.97	1.50	15
Altamaha Sd	2.45×10^9	5.01×10^8	4.90	6.60	0.74	0.75	43
St. Simon Sd	5.52×10^9	8.51×10^8	6.50	6.60	0.98	1.90	0
St. Andrew Sd	8.34×10^9	1.41×10^9	5.92	6.60	0.90	1.12	26
St. Marys	4.11×10^9	7.93×10^8	5.19	5.80	0.89	1.10	27
Nassau Sd	1.87×10^9	4.40×10^8	4.25	5.70	0.75	0.76	43
St. Johns	1.50×10^9	1.22×10^9	1.23	5.20	0.24	0.21	76
Ft. Pierce	5.10×10^8	1.10×10^9	0.46	2.60	0.18	0.16	80
Lake Worth	7.00×10^8	4.00×10^8	1.75	2.60	0.67	0.66	48

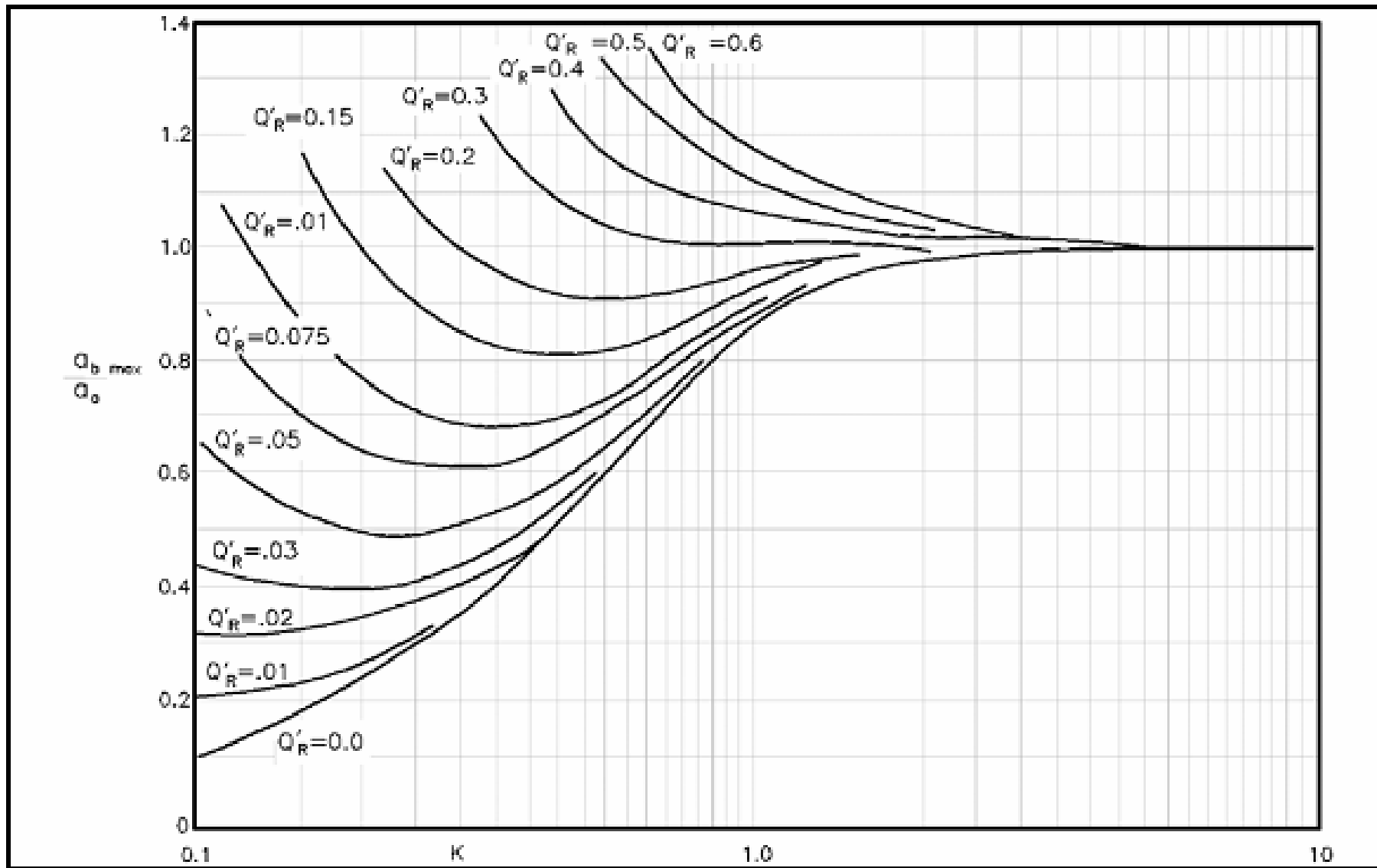
Επίδραση Εισροής Γλυκού Νερού στην Υδραυλική Στομίου

Αν υπάρχει εισροή γλυκού νερού στο κόλπο ή τη λιμνοθάλασσα, σημαντική ως προς το παλιρροιακό πρίσμα, τότε θα υπάρξουν σημαντικές αλλαγές στο παλιρροιακό εύρος και τη ταχύτητα στο στόμιο.

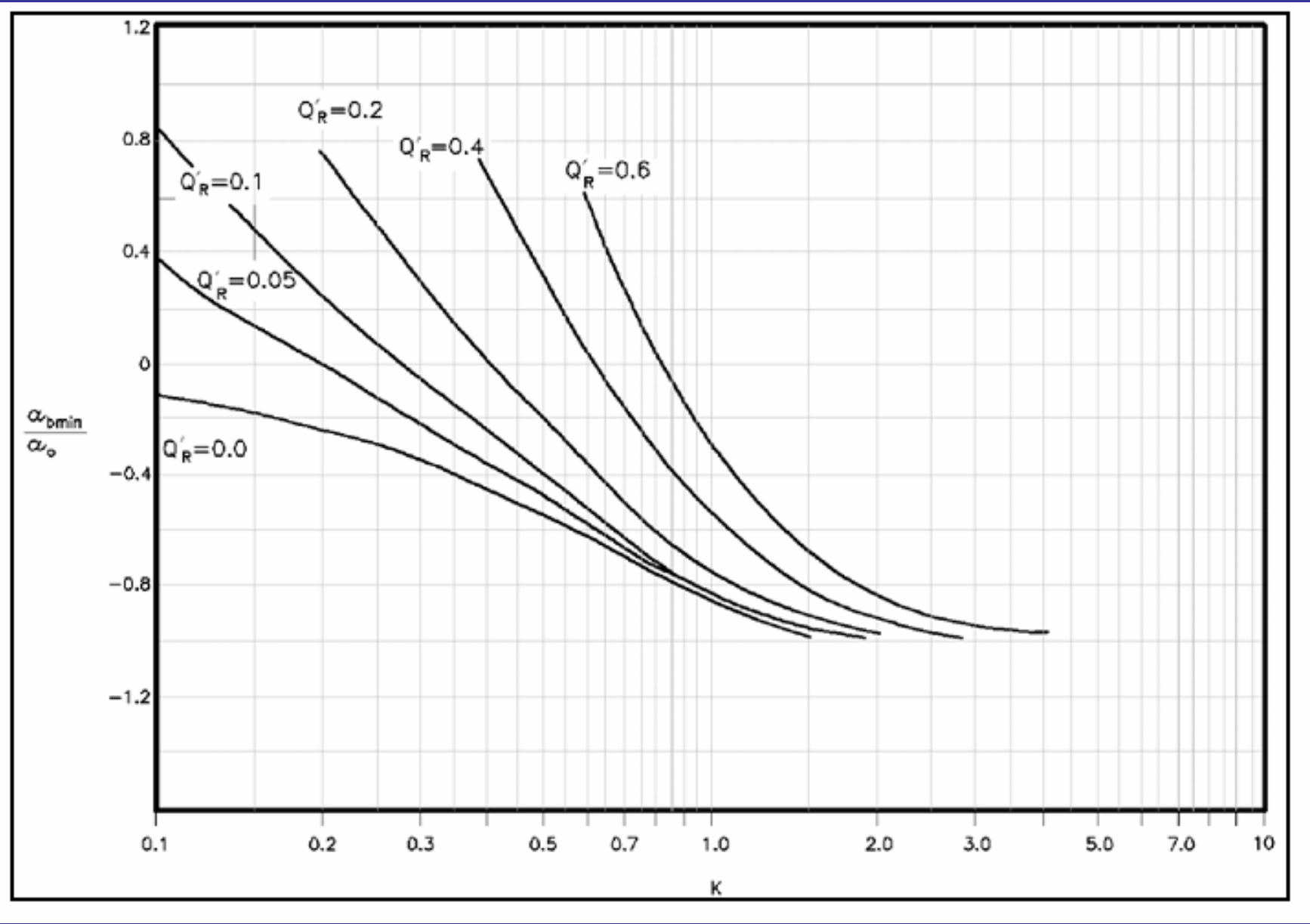
Ορίζουμε την αδιάστατη παράμετρο:

$$Q_r' = \frac{Q_r T}{2\pi a_o A_b}$$

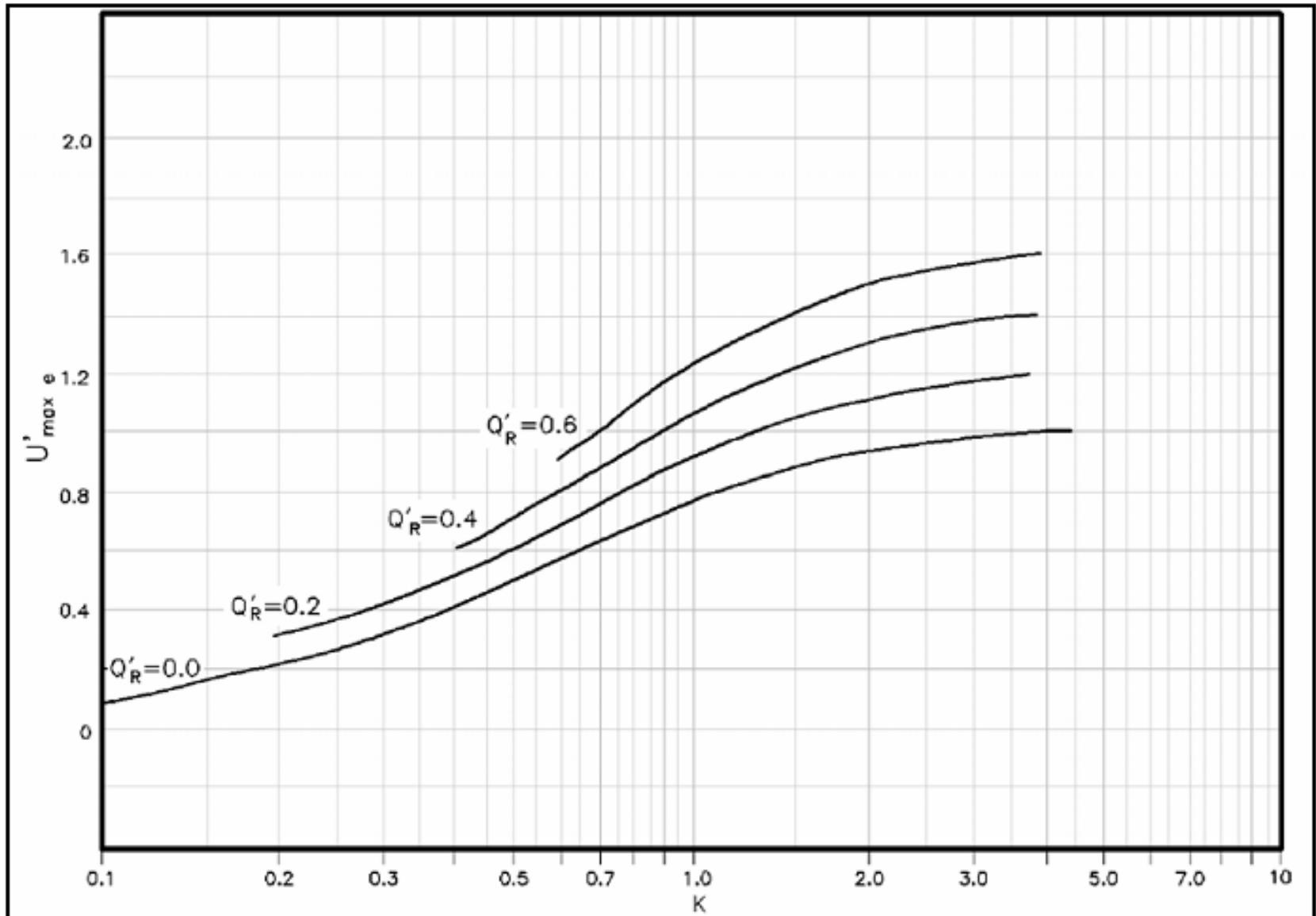
Όπου Q_r είναι η εισροή γλυκού νερού.



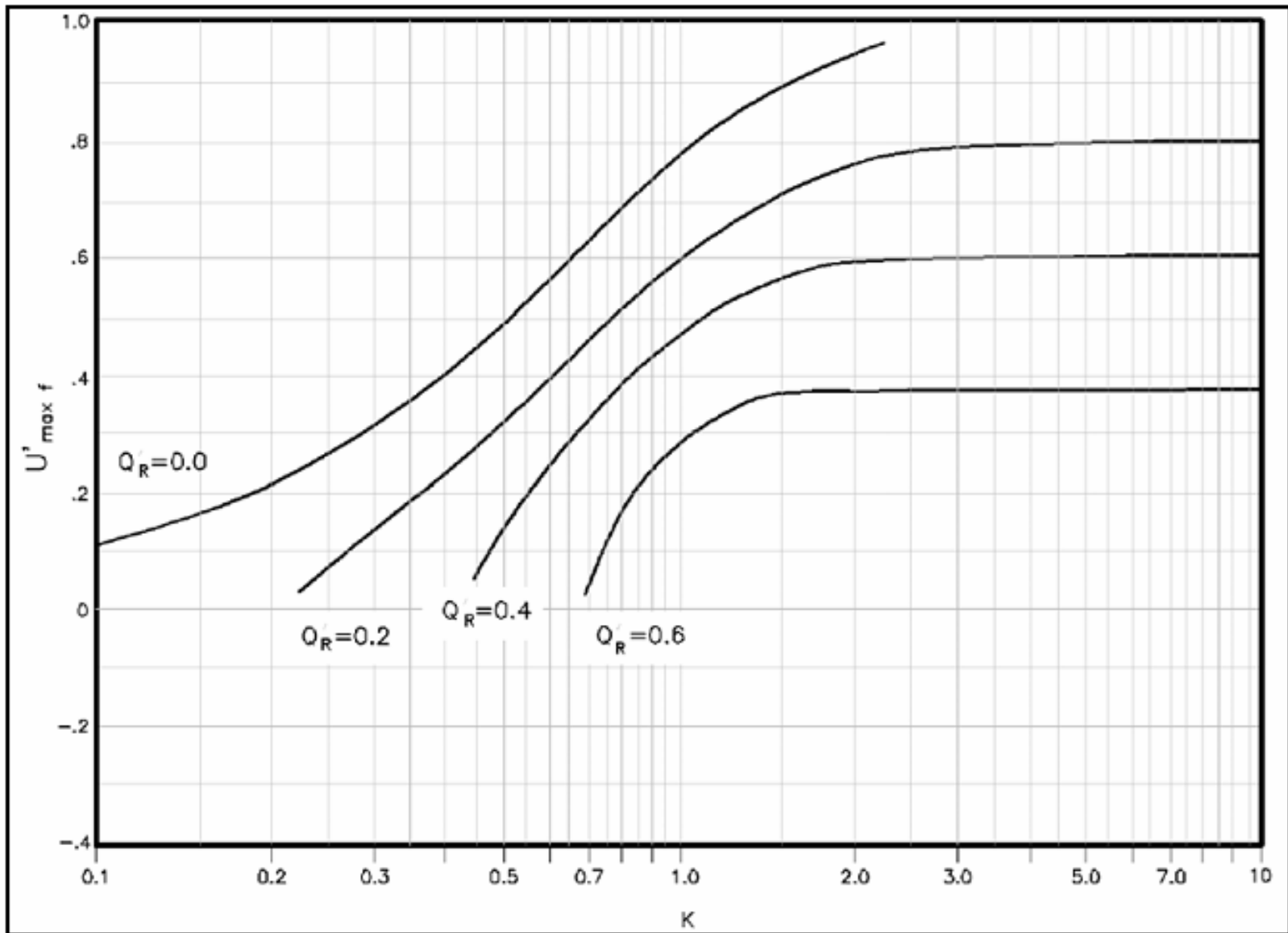
Συσχέτιση λόγου $\alpha_{b \max}/a_0$ ως προς τον αριθμό K για διάφορες τιμές Q'_r .



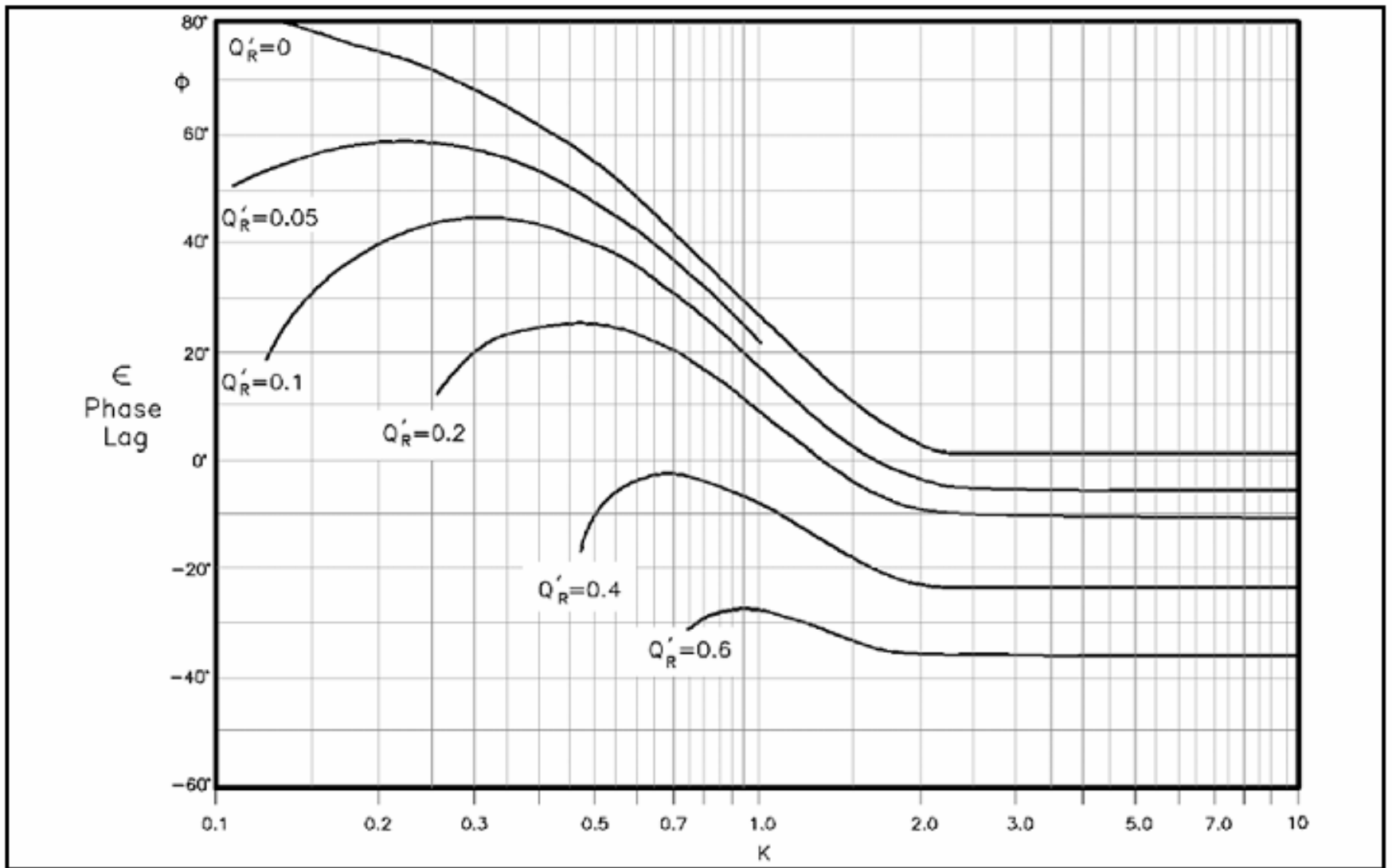
Συσχέτιση λόγου $\alpha_{b \min}/\alpha_0$ ως προς τον αριθμό K για διάφορες τιμές Q'_r .



Συσχέτιση παραμέτρου $U'_{\max-e}$ ως προς τον αριθμό K για διάφορες τιμές Q'_r .



Συσχέτιση παραμέτρου $U'_{\max-f}$ ως προς τον αριθμό K για διάφορες τιμές Q'_r .



Συσχέτιση παραμέτρου ϵ ως προς τον αριθμό K για διάφορες τιμές Q'_R .

Έστω κανάλι με μέσο βάθος 3.7 μ και πλάτος 180 μ και επικοινωνεί με παράκτια περιοχή εμβαδού $1.9 \times 10^7 \mu^3$ και μέσου βάθους 6 μ. Η περιοχή δέχεται την επίδραση ημι-ημερήσιας παλίρροιας με εύρος 1.30 μ. Ποια είναι η μέγιστη ταχύτητα ροής, η μέγιστη παροχή, και ο όγκος νερού που εισρέει και εκρέει στο παράκτιο σύστημα κατά τη διάρκεια ενός παλιρροιακού κύκλου με παλίρροια μεγάλου πλάτους (spring tide)?

Ποια η επίδραση εισροής $Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$ στο παραπάνω σύστημα.

$$Q_r' = \frac{Q_r T}{2\pi a_o A_b}$$

$$Q_r' = \frac{350 (44712)}{2(3.14) (1.30/2) (1.90 \times 10^7)} = 0.20$$

$$K = \frac{1}{k_2} \sqrt{\frac{1}{K_1}}$$

$$K = \frac{1}{0.25} \sqrt{\frac{1}{28.8}} = 0.75$$

$$\frac{a_{b \max}}{a_o} = 0.92$$

$$a_{b \max} = 0.92 (0.65) = 0.60 \text{ m}$$

$$\frac{a_{b \min}}{a_o} = -0.56$$

$$a_{b \min} = -0.56 (0.65) = -0.36 \text{ m}$$

Άρα, το παλιρροιακό εύρος στο εσωτερικό της λιμνοθάλασσας είναι 0.96 μ χωρίς συμμετρία ως προς το μέσο βάθος λόγω της επίδρασης της ποτάμιας παροχής.

$$U'_{maxe} = 0.80$$

$$U_{maxe} = \frac{U'_{maxe} 2\pi a_o A_b}{A_{avg} T} = \frac{0.80 (2) (3.14) (0.65) (1.90) 10^7}{666 (12.42) (3600)} = 2.08 \text{ m/s}$$

$$U'_{maxf} = 0.50$$

$$U_{maxf} = \frac{U'_{maxf} 2\pi a_o A_b}{A_{avg} T} = \frac{0.50 (2) (3.14) (0.65) (1.90) 10^7}{666 (12.42) (3600)} = 1.30 \text{ m/s}$$

$$Q_{maxe} = U_{maxe} A_c = 2.08 (666) = 1385 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{maxf} = U_{maxf} A_c = 1.30 (666) = 866 \text{ m}^3/\text{s}$$

Συνεπώς, η ποτάμια εισροή αυξάνει τη ροή της άμπωτης και μειώνει τη ροή της πλήμμης. Η διαφορά φάσης προσδιορίστηκε σε $\varepsilon = 19^\circ$. Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη στάθμη συμβαίνει νωρίτερα από ότι χωρίς τη ποτάμια παροχή.

Πολλαπλά Στόμια

$$K_{inlet\ 1} + K_{inlet\ 2} + \dots\dots\dots K_{inlet\ n} = K_{all\ inlets}$$

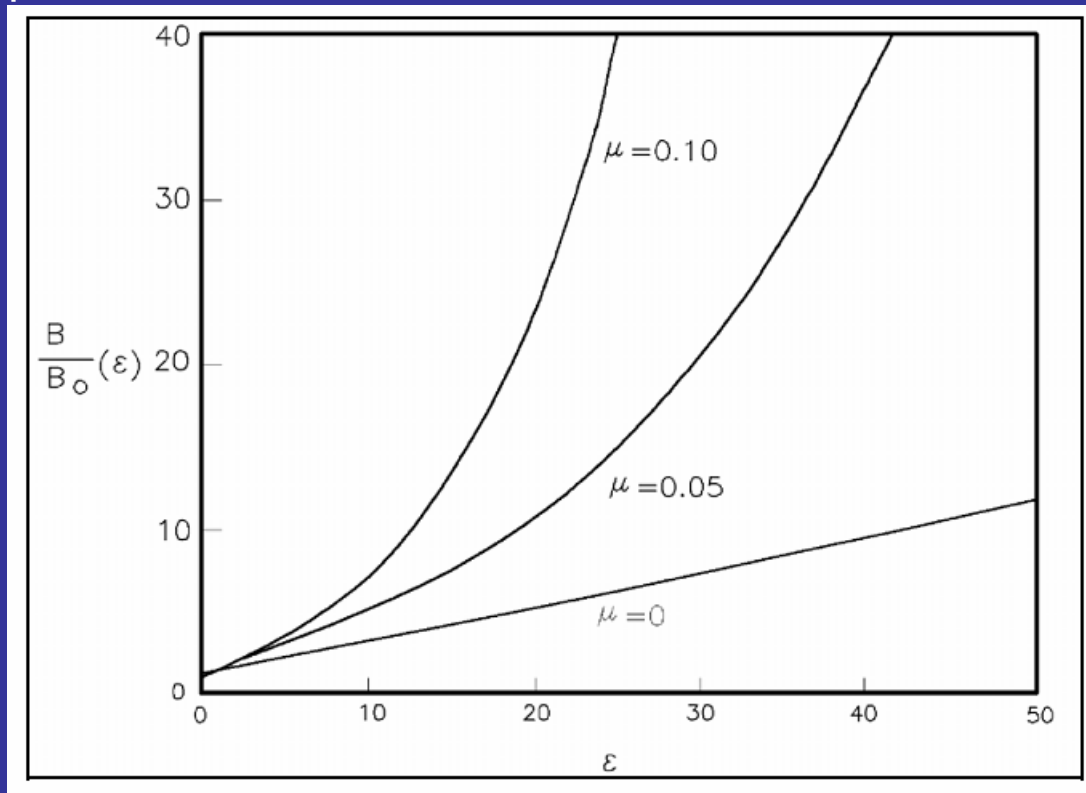
$$Q_{max} = \frac{2\pi}{T} a_o A_b V_{max}$$

$$Q_{max} = Q_{1max} + Q_{2max} + Q_{3max} + \dots\dots$$

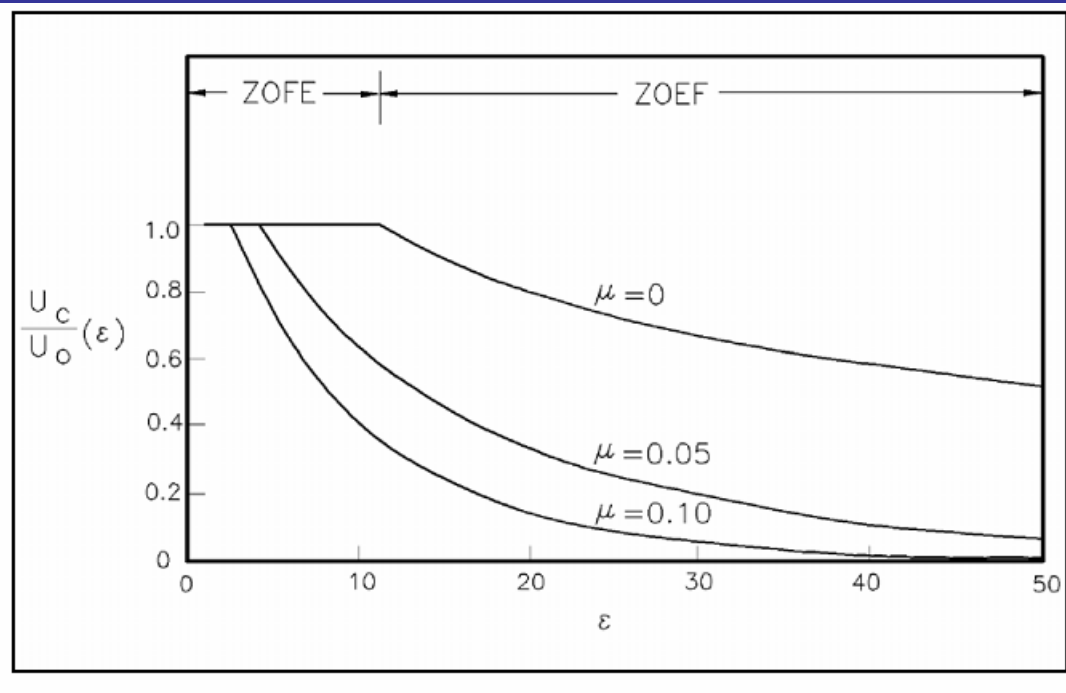
Παλιρροιακά Πλούμια

Αφορούν τη ροή της εξερχόμενης μάζας νερού από το στόμιο του κόλπου ή της λιμνοθάλασσας κατά την άμπωτη.

Γενικά, όσο η τριβή πυθμένα αυξάνει, το εξερχόμενο πλούμιο αποκτά μεγαλύτερο πλάτος και η ταχύτητα κατά μήκος της κεντρικής ροής (centerline) μειώνεται.



Διάγραμμα πλάτους εξάπλωσης πλουμίου ως προς τη παράμετρο ϵ για διάφορες τιμές της τριβής μ



Διάγραμμα κεντρικής ταχύτητας πλουμίου ως προς τη παράμετρο ε για διάφορες τιμές της τριβής μ

Ποιο το πλάτος ενός εξερχόμενου κατά την άμπωτη πλουμίου και η μέγιστη ταχύτητά του κατά μήκος της κεντρικής γραμμής σε απόσταση 2000 μ μακριά από το στόμιο. Δίνεται το πλάτος του στομίου (200 μ) και το βάθος του (8 μ). Ο πυθμένας του στομίου θεωρείται επίπεδος και ο συντελεστής manning $n=0.02$. Η μέγιστη ταχύτητα στο στόμιο είναι 1.5 m/s.

Ο συντελεστής τριβής πυθμένα είναι:

$$\mu = \frac{g b_o n^2}{h_o^{0.75}} = \frac{(9.8) (100) (0.02)^2}{(8)^{0.75}} = 0.08$$

Όπου b_o = το ήμισυ του πλάτους του στομίου = $200/2 = 100$ μ.
Ορίζουμε την αδιάστατη παράμετρο ξ ως

$$\xi = \frac{x}{b_o}$$

Για την απόσταση μακριά από το στόμιο. Άρα $x = 2000$ μ
Άρα $\xi = 20$.

Από τα διαγράμματα

$$\frac{b}{b_o}(\xi) = 18.5 \quad \Rightarrow \quad b = 100 (18.5) = 1850 \text{ m}$$

$$\frac{u_c}{u_o}(\xi) = 0.2 \quad \Rightarrow \quad u_c = 0.2 (1.5) = 0.3 \text{ m/s}$$

Άρα κατά την έξοδό του το πλούμιο της άμπωτης από το στόμιο, αυξάνει το πλάτος του από τα 200 μ στα 1850 μ ενώ μειώνει τη ταχύτητά του από 1.5 m/s σε 0.3 m/s, σε απόσταση 2.000 μ από το στόμιο.

Ρεύματα και Υπολειπόμενα Ρεύματα σε Παλιρροιακά Στόμια

Η δυναμική ανταλλαγών των παράκτιων Μεσογειακών Λιμνοθαλασσών εξαρτάται από:

- Παλιρροιακή κυκλοφορία
 - ⇒ Μικρο-παλιρροιακό περιβάλλον
 - ⇒ Παλιρροιακό σήμα ενισχυμένο στα στόμια των λιμνοθαλασσών
- Υπολειπόμενη Κυκλοφορία (Residual circulation)
 - ⇒ ρεύματα πυκνότητας
 - ⇒ επίδραση ανέμου
 - ⇒ έκχυση γλυκού νερού
 - ⇒ μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ της παλιρροιακής ροής και της παράκτιας τοπογραφίας (Stokes drift)

Γιατί απαιτείται ο προσδιορισμός των ανταλλαγών μεταξύ των λιμνοθαλασσών και της ανοικτής θάλασσας?

➤ Ροές Νερού (Water fluxes)

⇒ ελέγχουν την ανανέωση νερού της Λ/Θ

⇒ ελέγχουν τη ποιότητα νερού της λεκάνης

⇒ μεταφέρουν από/προς τη Λ/Θ θρεπτικά, ίζημα, πλαγκτόν, κλπ

➤ Ροές Άλατος (Salt fluxes)

⇒ προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά του συστήματος

⇒ καθορίζουν τη κατανομή βενθικής χλωριδας και πανίδας

⇒ επηρεάζουν τη χωρική κατανομή ψαριών

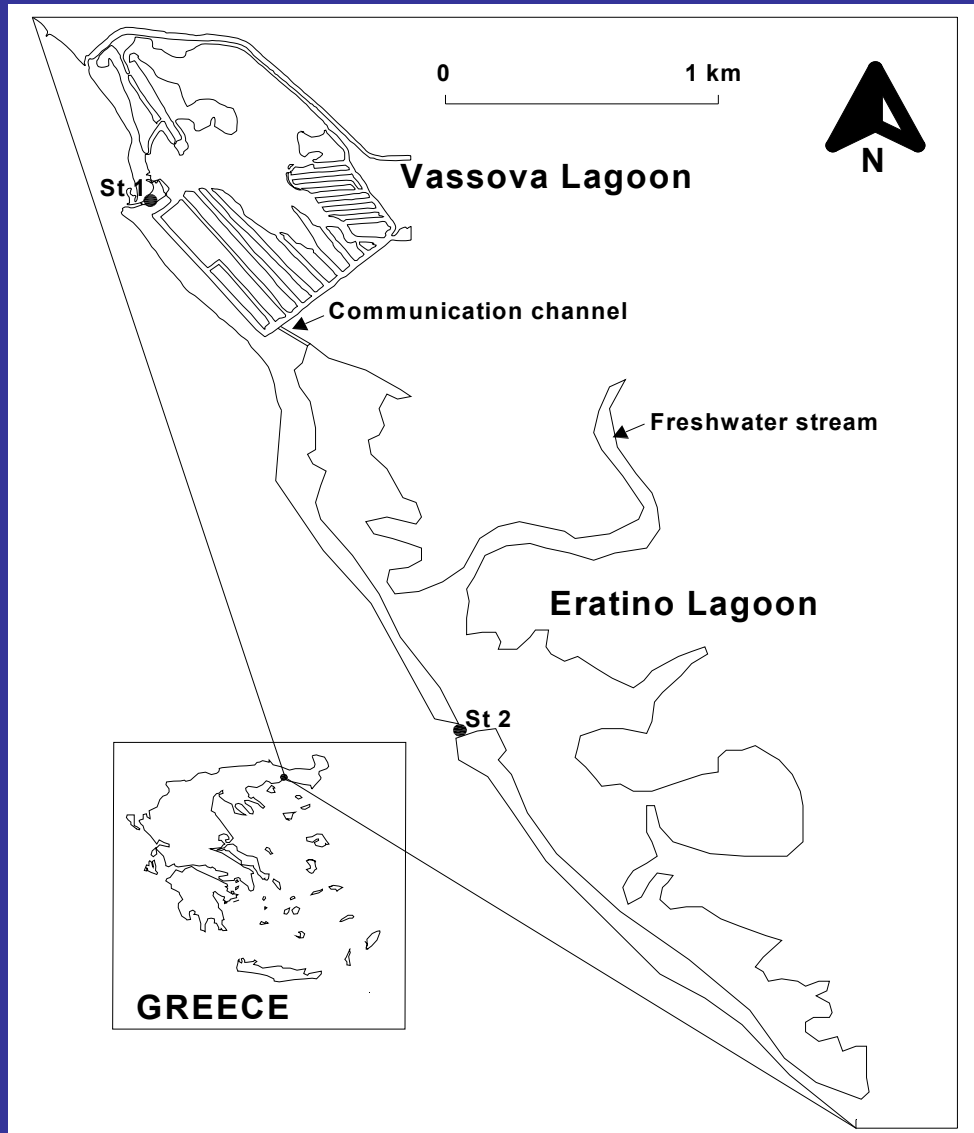
➤ Ροές θρεπτικών (DIN, DIP, DIC fluxes)

⇒ καθορίζουν τους ρυθμούς αποθήκευσης, μετασχηματισμού και εισροής/εκροής ενώσεων αζώτου, φωσφόρου, κλπ.

Μεθοδολογική Προσέγγιση

- Σημειακή παρακολούθηση ρευμάτων, T, S, στάθμης θάλασσας και θρεπτικών αλάτων στο στόμιο της Λ/Θ, κατά τη διάρκεια διαφορετικών παλιρροιακών κύκλων
- Κατανόηση των μηχανισμών ανταλλαγής
- Συσχέτιση στιγμιαίων και υπολειπόμενων ροών με εξωτερικούς παράγοντες (άνεμος, βροχόπτωση, παλιρροιακό εύρος, κλπ)
- Σύγκριση διεργασιών ανταλλαγής μεταξύ διαφορετικών Λ/Θ

Χάρτης Περιοχής Μελέτης



➤ Λ/Θ Βάσσοβα
Εμβαδόν: 0.7 km²,
Μέσο Βάθος: 0.8 m
Διαστάσεις Στομίου
Πλάτος: 15 m, Μήκος: 200 m,
Βάθος: 0,8 m

➤ Λ/Θ Ερατεινό
Εμβαδόν: 3.5 km²,
Μέσο Βάθος: 1.1 m
Διαστάσεις Στομίου
Πλάτος: 30 m, Μήκος: 50 m,
Βάθος: 0,7 m

Κανάλι Επικοινωνίας
Πλάτος: 2 m, Μήκος: 30 m
Βάθος: 0.7 m

Περιοχή και Όργανα Δειγματοληψίας



Παράμετροι Πεδίου και Εργαστηρίου

□ Πεδίου

- Θερμοκρασία (T)
- Αγωγιμότητα - Αλατότητα
- pH
- Διαλ.Οξυγόνο (DO)
- Παλιρροιακή Στάθμη
- Ροή Νερού
- Ένταση – Διεύθυνση Ανέμου
- Ατμοσφαιρική Πίεση
- Υγρασία Αέρα
- Εξάτμιση
- Βροχόπτωση

□ Εργαστηριακές

- BOD
- COD
- TKN
- Αμμωνιακά (NH_4)
- Νιτρώδη (NO_2)
- Νιτρικά (NO_3)
- Ορθοφωσφορικά (PO_4)
- Ολικός Φώσφορος (TP)
- Ολικά Βακτήρια (TC)

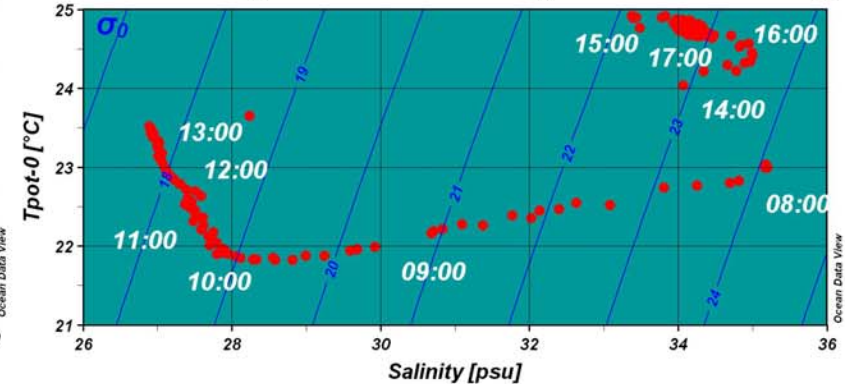
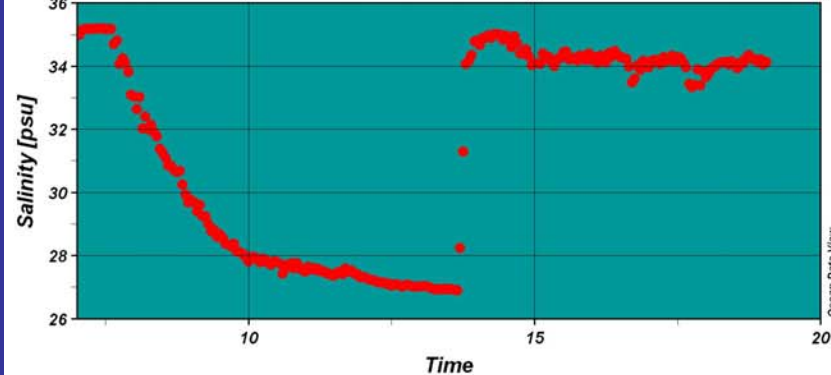
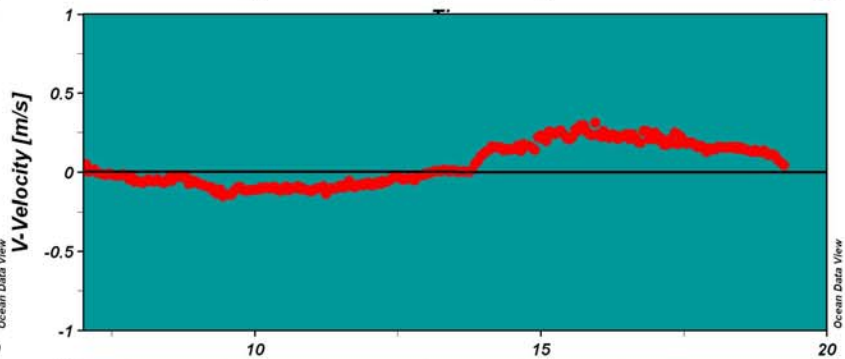
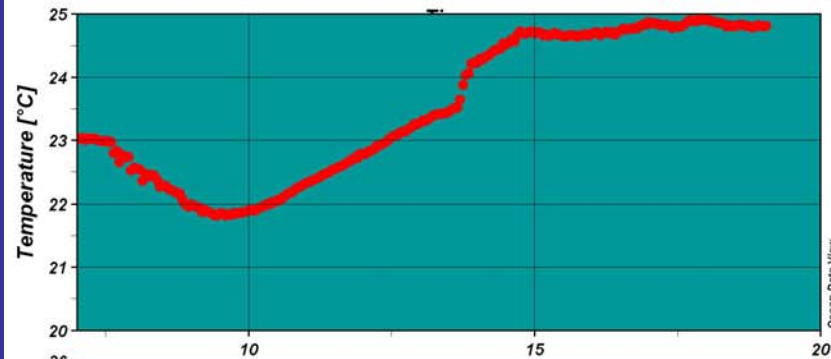
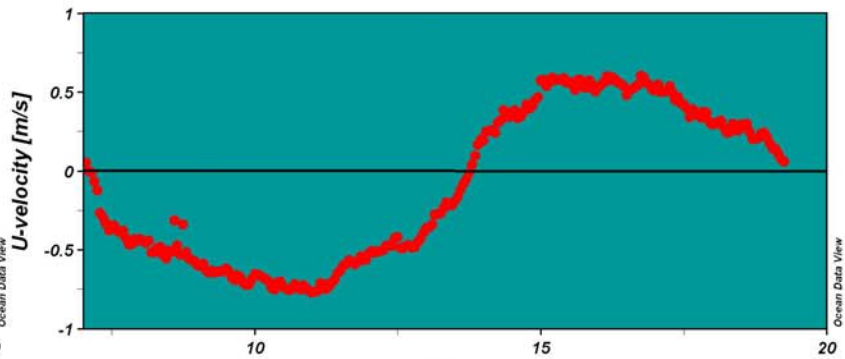
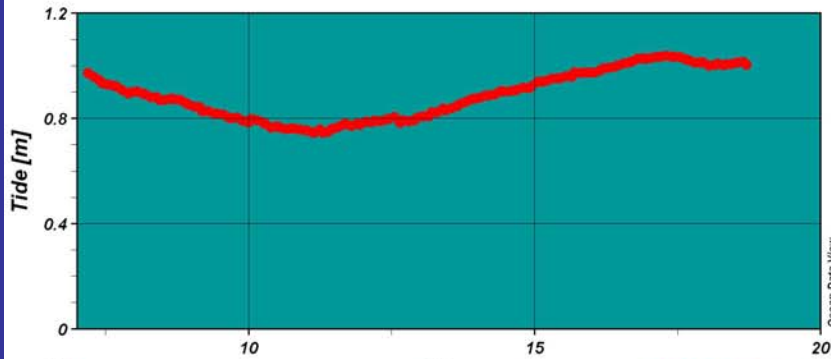
Δειγματοληψία στη Λ/Θ Βάσσοβα

Date	Tidal Range (A)	Tidal Status	Rainfall (mm)	Wind Speed (m/s)	Wind Direction
22/04/01	0.39	Spring tide	0.025	1.73	S
12/05/01	0.14	Neap tide			
17/06/01	0.20	Neap tide	0.0	0.7	S
01/07/01	0.18	Neap tide	0.0	0.6	S
27/09/01	0.23	Spring tide	31.2	0.8	S
03/10/01	0.29	Spring tide	0.3	0.3	NE
31/01/02	0.35	Spring tide	0.4	0.4	NE
07/03/02	0.07	Neap tide	0.0	0.5	SW
21/03/02	0.18	Neap tide	0.0	1.1	NE
28/03/02	0.37	Spring tide	0.0	0.6	NE
04/04/02	0.12	Neap tide	0.0	2.1	NE
11/04/02	0.31	Spring tide			
21/04/02	0.07	Neap tide	0.0	0.9	NE
26/05/02	0.36	Spring tide			

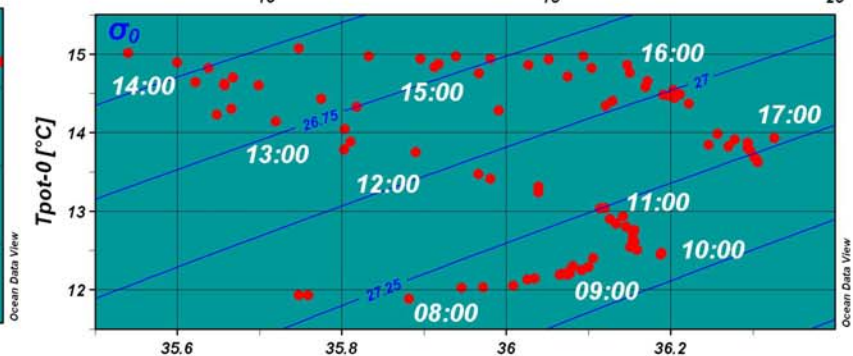
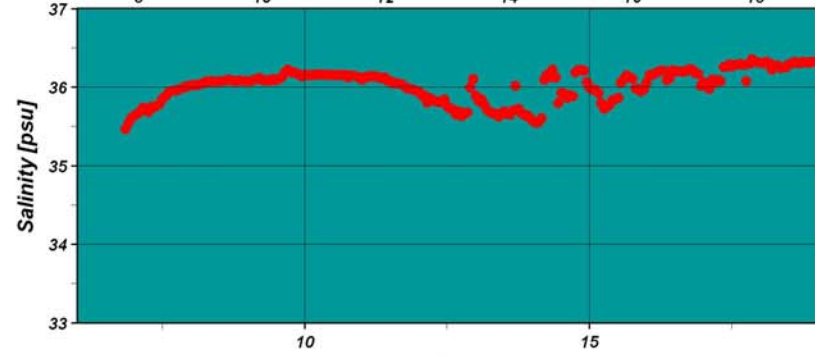
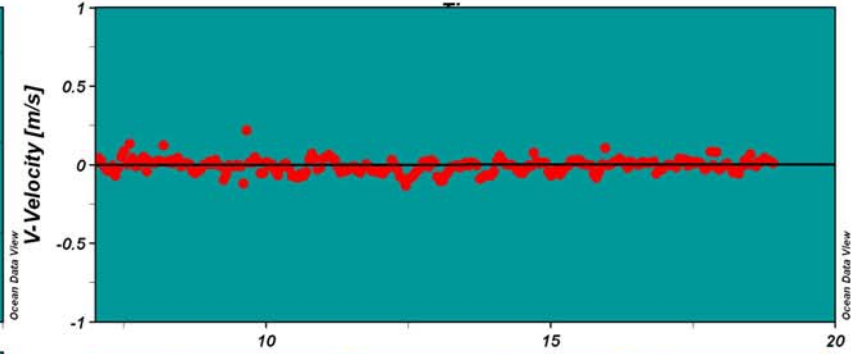
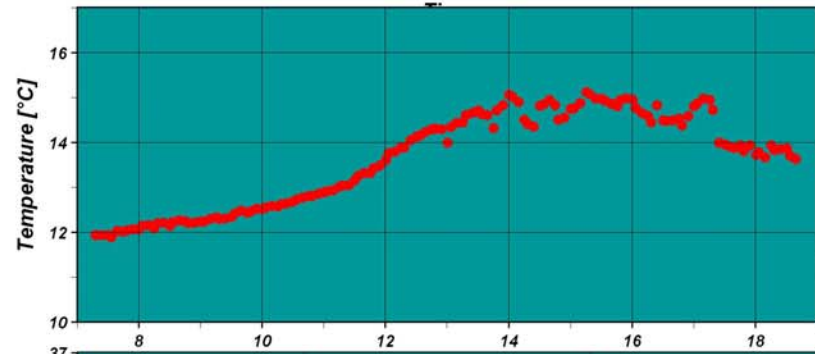
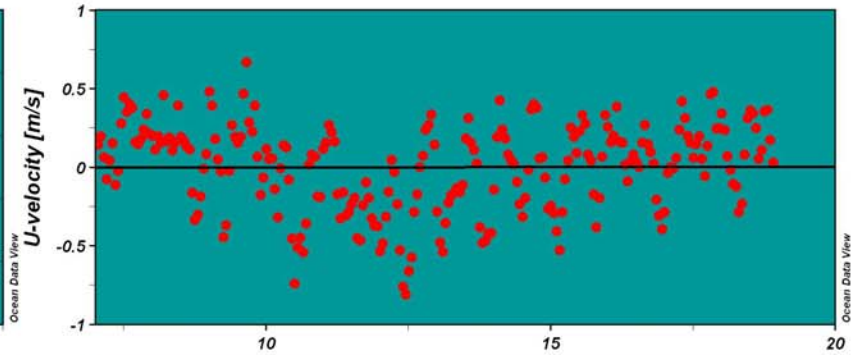
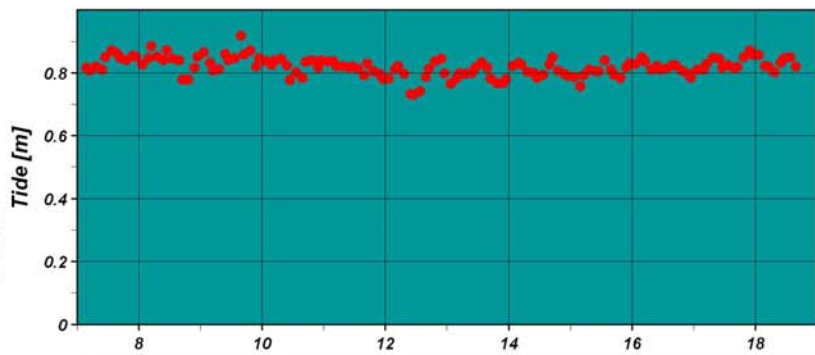
Δειγματοληψία στη Λ/Θ Ερατεινό

Date	Tidal Range (A)	Tidal Status	Rainfall (mm)	Wind Speed (m/s)	Wind Direction
5/3/03	0.227	Spring tide	0	-	-
13/3/03	0.133	Neap tide	0	1.9	SE
20/3/03	0.282	Neap tide	0	4.1	WS
27/3/03	0.147	Neap tide	0	2.1	E
7/5/03	0.084	Spring tide	0	2.7	SE
15/5/03	0.373	Spring tide	0	0.9	SE
23/5/03	0.122	Spring tide	0	3.6	SE
2/6/03	0.244	Neap tide	0	2.0	SE

Αποτελέσματα από τη Λ/Θ Βάσσοβα (spring-3/10/02)



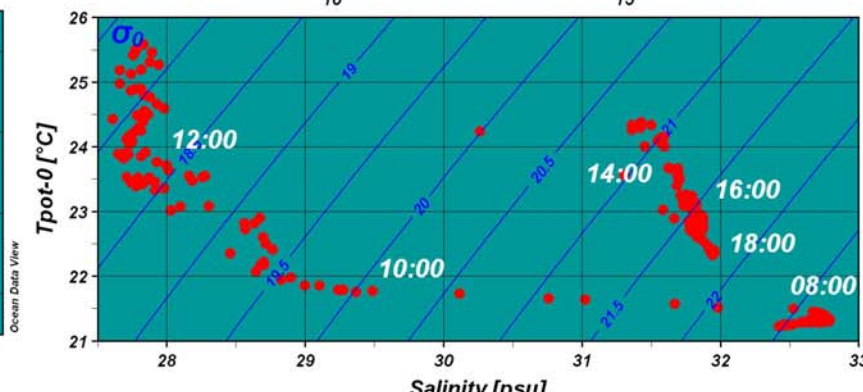
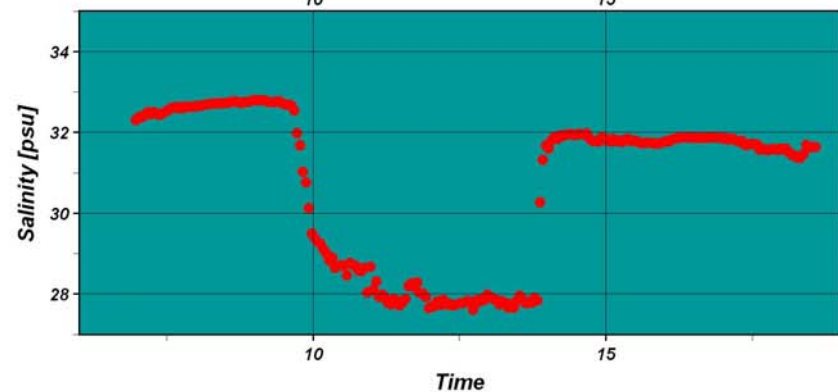
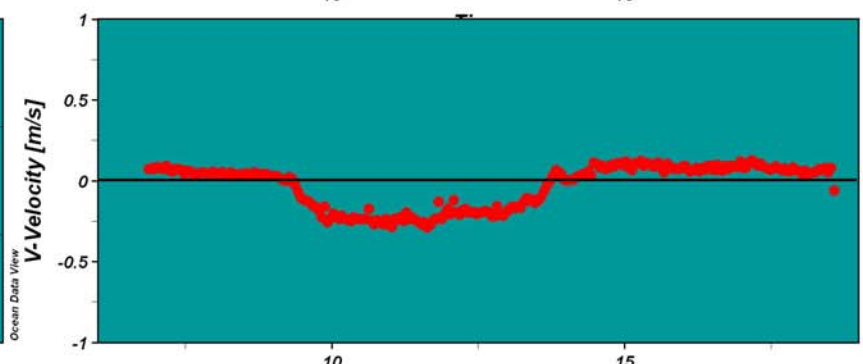
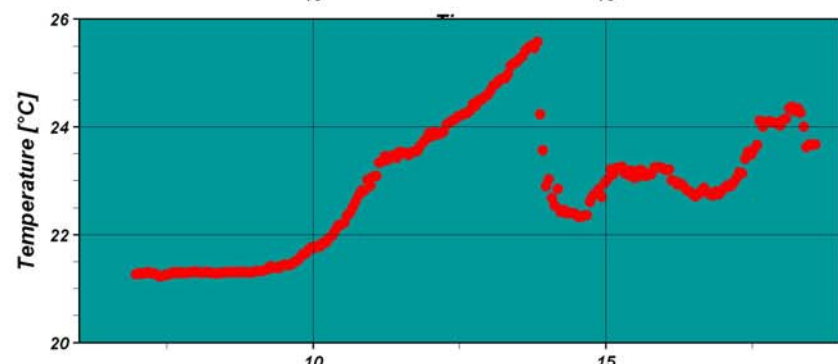
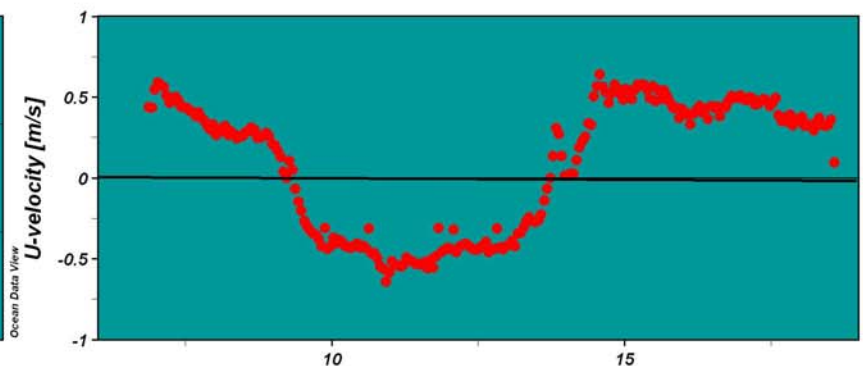
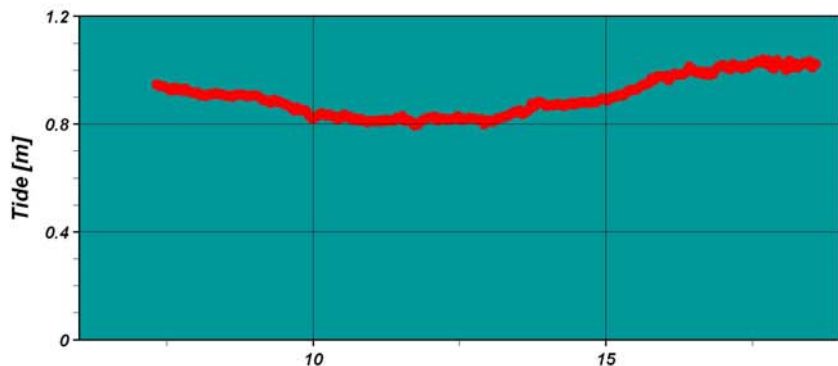
Αποτελέσματα από τη Λ/Θ Βάσσοβα (near – 21/3/02)



Time

Salinity [psu]

Αποτελέσματα από τη Λ/Θ Ερατεινό (spring-2/6/03)



Ο στιγμιαίος ρυθμός μεταφοράς νερού από και προς τη Λ/Θ (ανά μονάδα πλάτους στομίου) μέσω στομίου βάθους H (m) δίνεται από:

$$Q = H \bar{U} = H (\bar{u}, \bar{v})$$

Όπου u, v (m/s) είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας U , και η μπάρα συμβολίζει τη μέση με το βάθος τιμή.

Η ολοκληρωμένη με το βάθος μεταφορά νερού στο στόμιο της Λ/Θ είναι το αθροιστικό αποτέλεσμα ροών του ολοκληρωμένου με το βάθος υπολειπόμενου ρεύματος Euler και του Stokes drift (μη-γραμμική αλληλεπίδραση ταχύτητας και στάθμης)

$$\langle Q \rangle = \langle H \rangle (V_1 + V_2)$$

Όπου $\langle n \rangle$ αντιπροσωπεύει τη μέση παλιρροιακή τιμή της παραμέτρου, V_1 είναι το ολοκληρωμένο με το βάθος υπολειπόμενο ρεύμα Euler και V_2 το Stokes drift.

$$V_1 = \langle \bar{U} \rangle$$

$$V_2 = \langle \tilde{H}\tilde{U} \rangle / \langle H \rangle$$

Όπου \sim συμβολίζει τις μέσες με το βάθος στιγμιαίες αποκλίσεις από τη παλιρροιακή μέση τιμή

Όμοια η στιγμιαία ροή άλατος Q_s ($\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1}$) ανά μονάδα πλάτους του στομίου είναι:

$$Q_s = H \bar{U} S$$

Η ολοκληρωμένη με το βάθος ροή άλατος στο στόμιο της Λ/Θ είναι το αθροιστικό αποτέλεσμα ροών μεταφοράς άλατος από την υπολειπόμενη ροή Euler, το Stokes drift άλατος (μη-γραμμική αλληλεπίδραση παλιρροιακών μεταβολών ταχύτητας και αλατότητας) και ροής λόγω της κατακόρυφης διατμητικής τάσης στα παλιρροιακά και υπολειπόμενα ρεύματα

$$\langle Q_S \rangle = \langle H \rangle [V_{S,1} + V_{S,2} + V_{S,3}]$$

$$V_{S,1} = \langle Q \rangle \langle \bar{S} \rangle / \langle H \rangle$$

$$V_{S,2} = \langle \tilde{Q} \tilde{S} \rangle / \langle H \rangle$$

$$V_{S,3} = \langle H \overline{U'S'} \rangle / \langle H \rangle$$

Όπου U' και S' συμβολίζουν τις στιγμιαίες αποκλίσεις της ταχύτητας και αλατότητας από τη μέση με το βάθος τιμή τους.

Ο όγκος νερού που εισέρχεται κατά την πλήμμη και εξέρχεται κατά την άμπωτη κατά τη διάρκεια ενός παλιρροιακού κύκλου, δίνεται:

$$V_{flood} = \int_{t=0}^{t=\tau} Q(y, t) dt$$

$$V_{ebb} = \int_{t=\tau}^{t=T} Q(y, t) dt$$

Όπου το $V_{Flood(y)}$ και το $V_{Ebb(y)}$ ($m^3 m^{-1}$) αντιστοιχούν στο παλιρροιακό πρίσμα κατά τη πλήμμη και την άμπωτη, αντίστοιχα, ανά μονάδα πλάτους του στομίου, T είναι η παλιρροιακή περίοδος (45,000 sec) και $t = 0$, $t = \tau$ και $t = T$ αντιστοιχεί στην ώρα αλλαγής φάσης παλίρροιας.

Εφόσον οι παραπάνω όγκοι είναι περίπου ίσοι, το παλιρροιακό πρίσμα της Λ/Θ υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας με το πλάτος του κάθε στομίου.

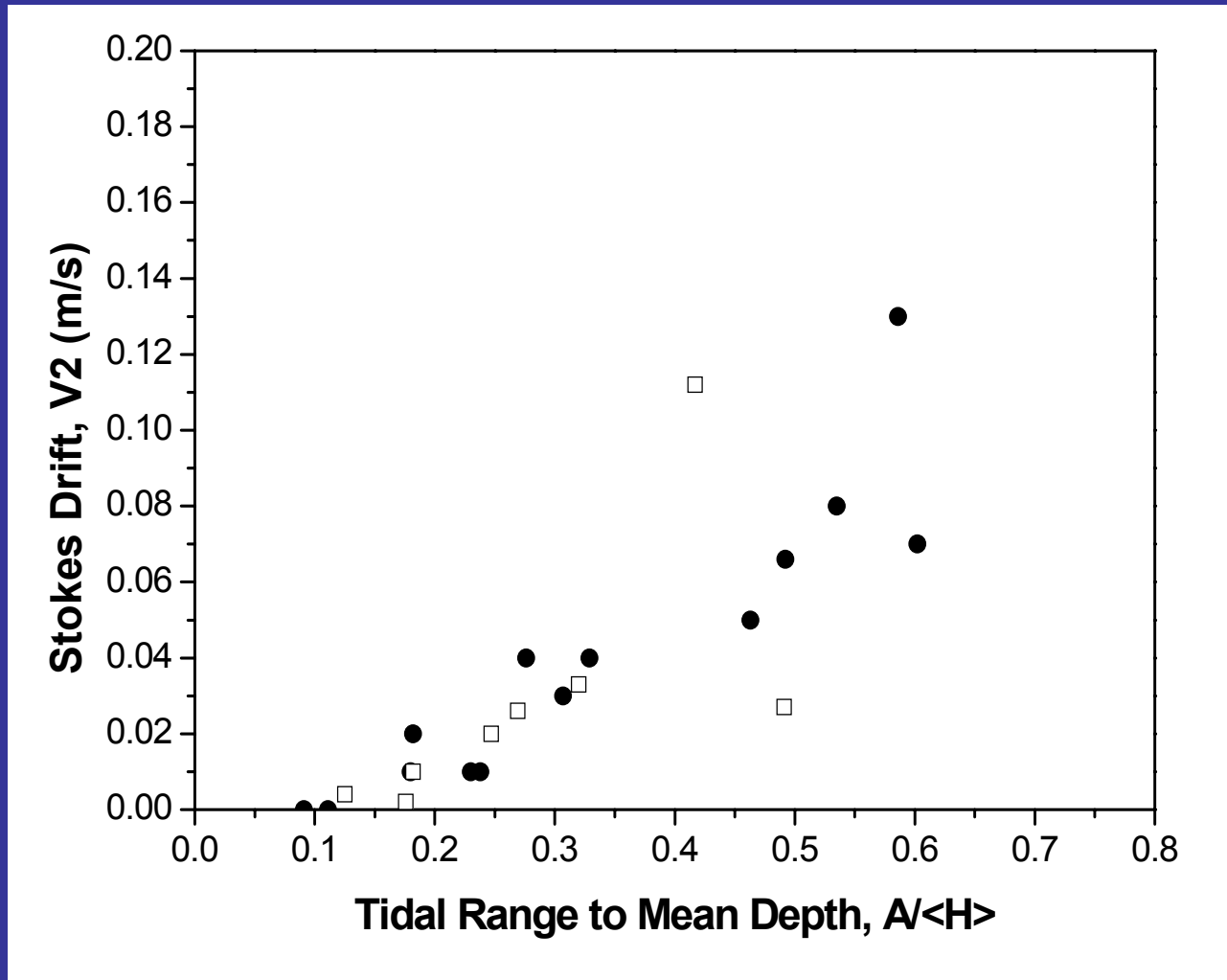
Υπολειπόμενα ρεύματα και ροές άλατος (Βάσσοβα)

Date	Mean Depth (m)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V_{s1} (g m ² /s)	V_{s2} (g m ² /s)
22/04/01	0.74	0.14	0.08	7.71	0.36
12/05/01	0.79	0.15	0.02	5.79	0.11
17/06/01	0.66	0.08	0.03	3.62	0.40
01/07/01	0.66	0.05	0.04	2.77	0.66
27/09/01	0.97	-0.25	0.01	-7.05	0.57
03/10/01	0.89	-0.10	0.04	-1.73	1.17
31/01/02	0.59	0.22	-0.13	-2.83	0.12
07/03/02	0.77	0.09	0.001	3.11	-0.01
21/03/02	0.81	-0.001	0.01	0.18	0.01
28/03/02	0.62	-0.12	0.07	-2.06	0.01
04/04/02	0.63	0.10	0.01	3.90	0.01
11/04/02	0.67	-0.11	0.05	-2.06	0.01
21/04/02	0.71	0.05	0.002	1.11	0.01
26/05/02	0.74	0.20	0.07	9.00	-0.13

Υπολειπόμενα ρεύματα και ροές άλατος (Ερατεινό)

Date	Mean Depth (m)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V_{s1} (g m ² /s)	V_{s2} (g m ² /s)
5/3/03	0.71	-0.18	0.03	-5.22	0.02
13/3/03	0.73	0.12	0.01	4.65	0.06
20/3/03	0.68	0,17	0.11	9.93	0.42
27/3/03	0.60	0.04	0.02	2.18	0.24
7/5/03	0.67	-0.18	0.00	-6.22	0.02
15/5/03	0.76	-0.04	0.03	-0.46	0.25
23/5/03	0.77	-0.12	0.00	-3.70	0.08
2/6/03	0.91	0.10	0.03	3.76	0.58

Stokes drift to $\varepsilon = A/\langle H \rangle$ relation



Μοντέλο Παλιρροιακού Πρίσματος (Luketina, 1998)

$$(V_{Lagoon} + V_{Prism}) S_{HW} = (1 - f) (V_{Lagoon} + V_{Prism}) S_{OC} \Rightarrow f = 1 - \frac{S_{HW}}{S_{OC}}$$

Όπου V_{Lagoon} είναι ο όγκος της Λ/Θ (m^3), V_{Prism} είναι ο όγκος παλιρροιακού πρίσματος (m^3) και S_{HW} και S_{OC} (psu) είναι η αλατότητα της Λ/Θ κατά τη μέγιστη στάθμη και η αλατότητα της ανοικτής θάλασσας.

Ο όγκος γλυκού νερού που εισέρχεται στη Λ/Θ κατά τη διάρκεια ενός παλιρροιακού κύκλου δίνεται:

$$V_R = f V_{Prism}$$

Και η παροχή γλυκού νερού δίνεται ως

$$Q_R = V_R / T$$

Για μία Λ/Θ σε κατάσταση ισορροπίας, η σχέση ανάμεσα στην αλατότητα κατά τη μέγιστη σταθμη και την αλατότητα της ανοικτής θάλασσας είναι:

$$S_{HW} = \frac{\sin \theta - \frac{Q_R T}{\pi V_{Prism}} (\pi - \theta)}{\sin \theta + \frac{Q_R T}{\pi V_{Prism}} \left(\frac{\theta + b (\pi - \theta)}{1 - b} \right)} S_{OC}$$

Όπου θ είναι η διαφορά φάσης του παλιρροιακού κύματος έξω και μέσα στη Λ/Θ, λόγω της επίδρασης της τοπογραφίας του στομίου και της εκροής γλυκού νερού

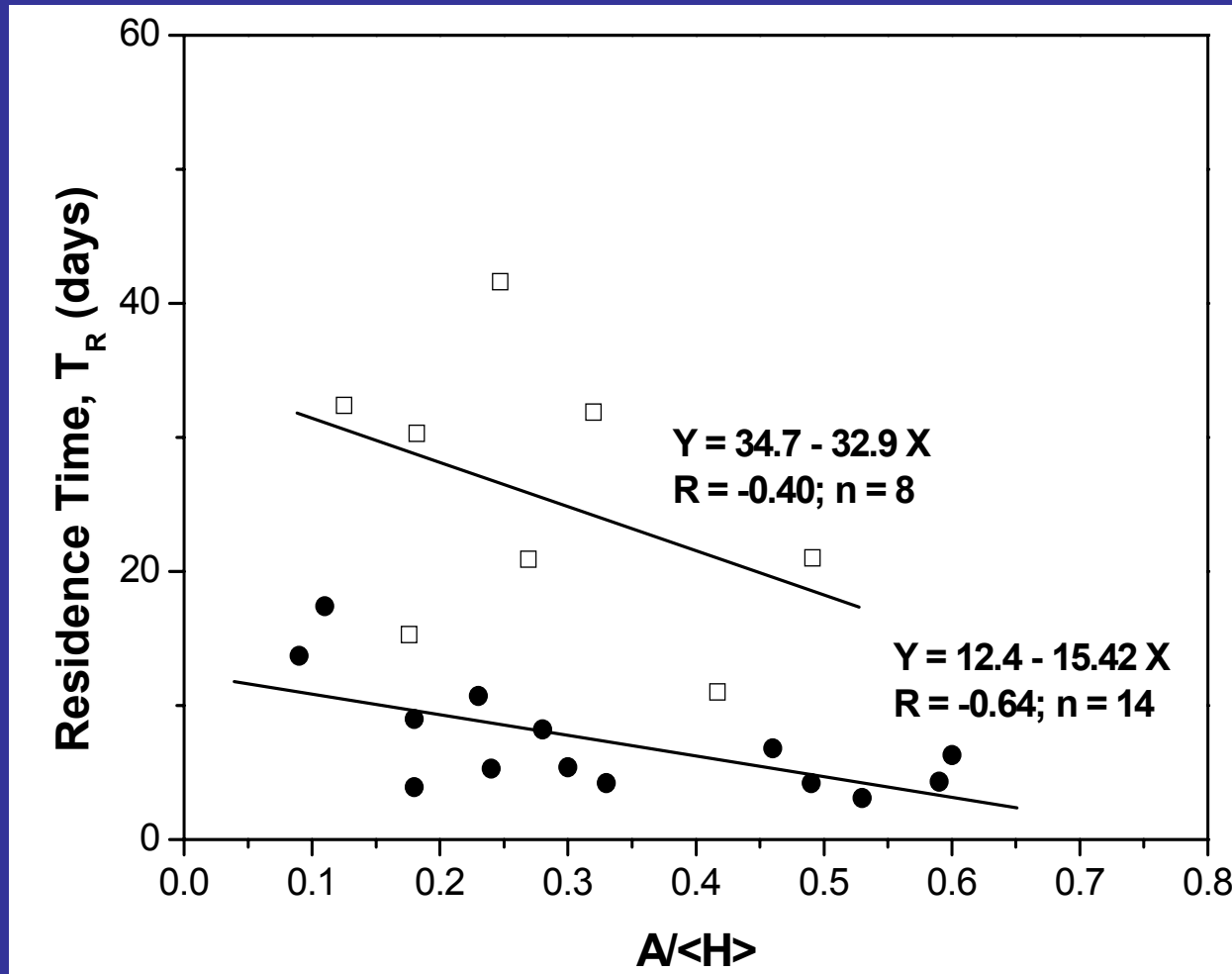
$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{Q_R T}{\pi V_{Prism}} \right)$$

Και b είναι ο παράγοντας επιστροφής νερού (return flow factor) με τιμές μεταξύ 0 και 1. Αν $b=0$ σημαίνει ότι η Λ/Θ έχει καλή έκπλυση, λόγω παράκτιων διαμηκών ρευμάτων. Λύνουμε τη παραπάνω εξίσωση ως προς b .

Χρόνος ανανέωσης της Λ/Θ , με βάση τη μέθοδο παλιρροιακού πρίσματος του Luketina

$$t_{RES} = \frac{V_{Lagoon} + V_{Prism}}{(1-b) \frac{V_{Prism}}{T} + (1+b) \frac{Q_R}{2}}$$

Residence time to ε relation



Η σχετική επίδραση της βαροτροπικής δράσης, της βαροκλιτικής δράσης και του ανέμου στη συνολική διαδικασία ανταλλαγής Λ/Θ – θάλασσας προσδιορίζεται από:

$$R_{Tide} = \frac{\mu}{t_{Tide}} \frac{V_{Prism}}{V_{Lagoon}}$$

Βαροτροπική Επίδραση

Όπου μ είναι ο συντελεστής κατακράτησης (retention coefficient) = $1 - V_{Channel}/V_{Prism}$, V_{Prism} το παλιρροιακό πρίσμα και $V_{Channel}$ ο όγκος του στομίου

$$R_{Baroclinic} = \frac{A_c \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho}} g h_{Channel}}{4V_{Lagoon}}$$

Βαροκλιτική Επίδραση

Όπου $\Delta\rho$ η διαφορά πυκνότητας Λ/Θ – Θάλασσας, $h_{Channel}$ το βάθος του καναλιού εισόδου και A_c το εμβαδόν διατομής του στομίου.

$$R_{Wind} = \frac{\mu}{t_{Wind}} \frac{V_{Wind}}{V_{Lagoon}}$$

Μετεωρολογική Επίδραση

Όπου t_{wind} η διάρκεια πνοής του ανέμου, και V_{wind} η αλλαγή στον όγκο της Λ/Θ λόγω της επίδρασης του ανέμου

$$V_{Wind} = \frac{V_{Lagoon} \Delta\eta}{2h}$$

Όπου h το μέσο βάθος της Λ/Θ

$$\Delta\eta = \frac{\beta C_w \rho_{air} L}{\rho g h} U W$$

Όπου β συντελεστής ανεμογενούς επίδρασης (~ 0.8), ρ_{air} είναι η πυκνότητα αέρα ($= 1.2 \text{ kg m}^{-3}$), C_w η διατμητική τάση λόγω σύρσης στην επιφάνεια της θάλασσας ($= 0.001$), L το μήκος της λεκάνης της Λ/Θ, W η ένταση του ανέμου, και U τη διαμήκη (παράλληλα προς το στόμιο) ένταση του ανέμου.

Βαροτροπική Επίδραση

Vassova Lagoon

0.10 – 0.30

Eratino Lagoon

0.05 – 0.12

Βαροκλιτική Επίδραση

0.01

0.04

Μετεωρολογική Επίδραση

0.05 – 0.10

0.22 – 0.31